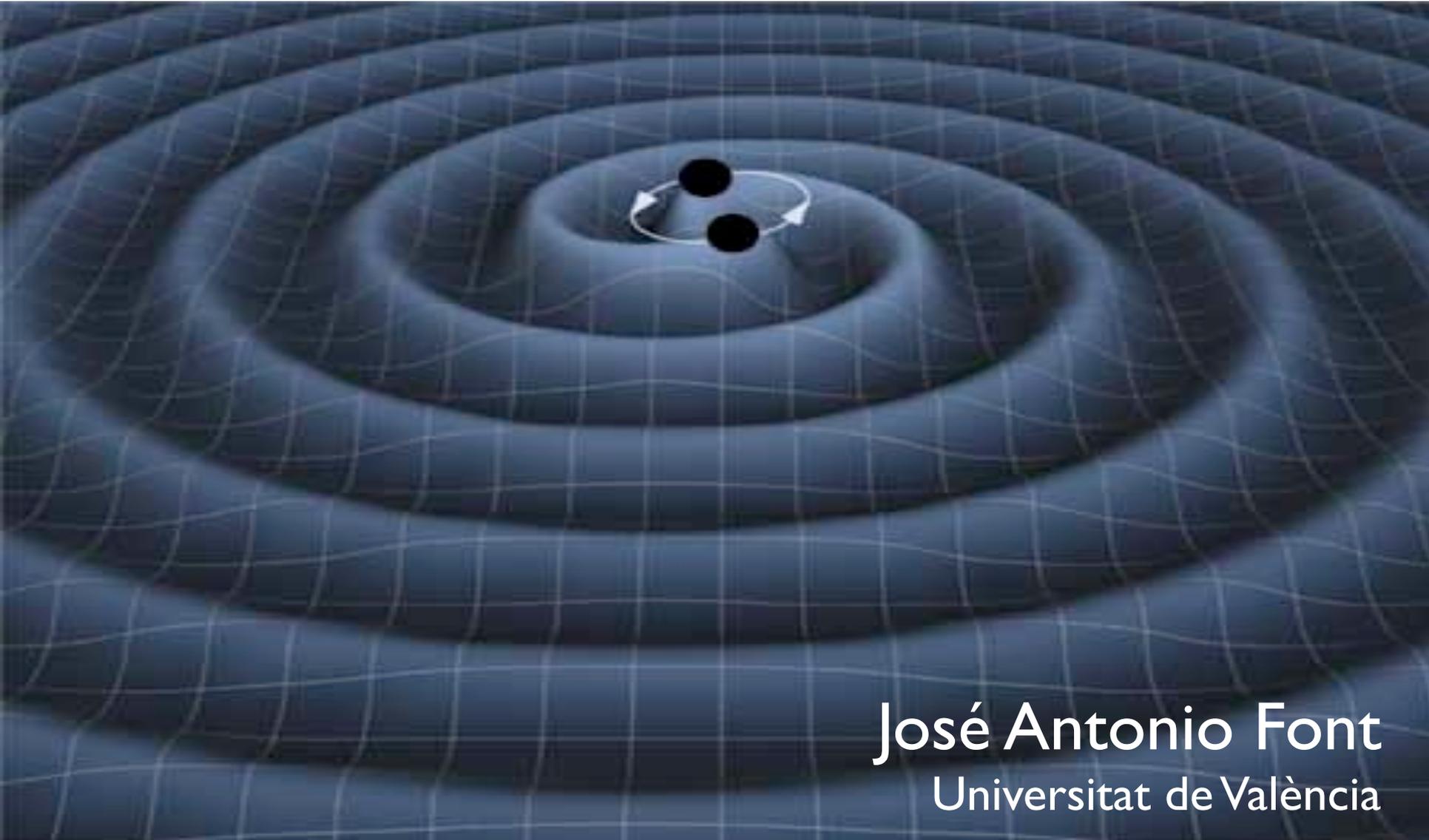
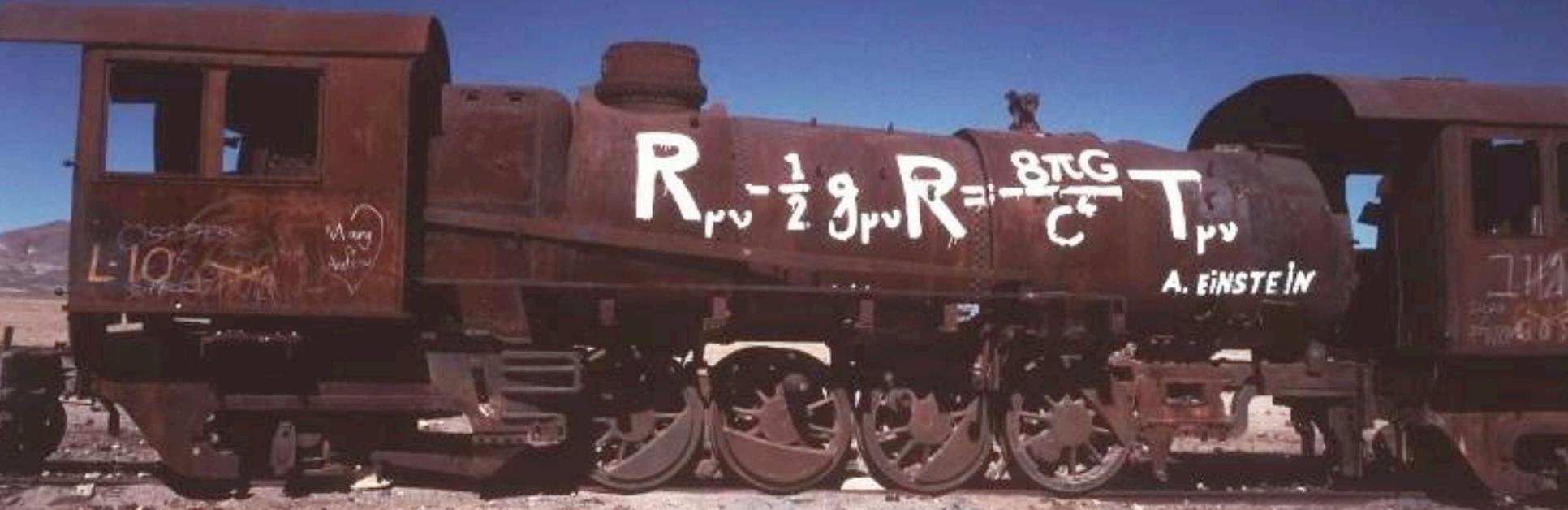


Radiación Gravitatoria: A las puertas de saber si Einstein vuelve a tener razón



José Antonio Font
Universitat de València

Ecuaciones de Einstein



Cementerio de Trenes, Uyuni (Bolivia), 1999 - Foto de Gianni Battimelli

¿Cómo resolverlas? Relatividad Numérica

Relatividad General

“a theorist’s Paradise but an experimentalist’s Hell”

(Misner, Thorne & Wheeler, *Gravitation* (1973))

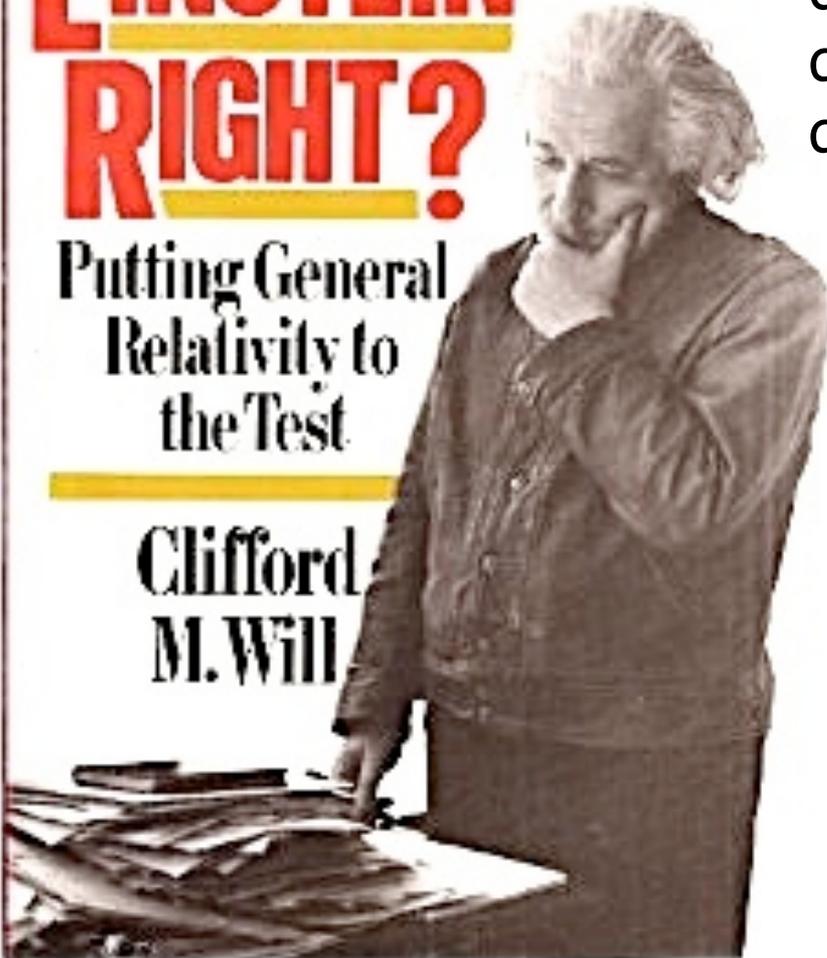
- Nada mejor ejemplifica esta afirmación que las ondas gravitatorias.
- Evidencia observacional convincente de su existencia obtenida 70 años después de su predicción (Pulsar Binario).
- Tras muchos años de búsqueda, su detección directa todavía no se ha producido.
- Se confía en tener una detección directa hacia el centenario de la teoría.

Centennial Day: 25 de Noviembre de 2015.

WAS EINSTEIN RIGHT?

Putting General
Relativity to
the Test

Clifford
M. Will



La teoría de la Relatividad General revolucionó nuestra comprensión de la gravitación de tal manera que estuvo sometida a todo tipo de verificaciones experimentales desde sus inicios.

Según C. Will (2014), la relatividad experimental se puede dividir en 4 periodos:

- Génesis (1887-1919)
- Glaciación (1920-1960)
- Edad de Oro (1960-1980)
- Búsqueda de la Gravedad Intensa (1981-)

Génesis (1887-1919)

Periodo que abarca los dos grandes experimentos que constituyen la fundación de la física relativista

- el **experimento de Michelson-Morley** (1887)
- el **experimento de Eötvös** (>1885)

y las dos confirmaciones inmediatas de la relatividad general

- la **desviación de la luz** por cuerpos masivos (1919)
- el **avance anómalo del perihelio de Mercurio.**

Los desarrollos teóricos van desde la formulación de la **Relatividad Especial** (1905) a resultados que fueron previos a la formulación de las ecuaciones de campo: principio de equivalencia, corrimiento al rojo gravitatorio, desviación de la luz (factor 2 incorrecto), etc.

El experimento de Eötvös

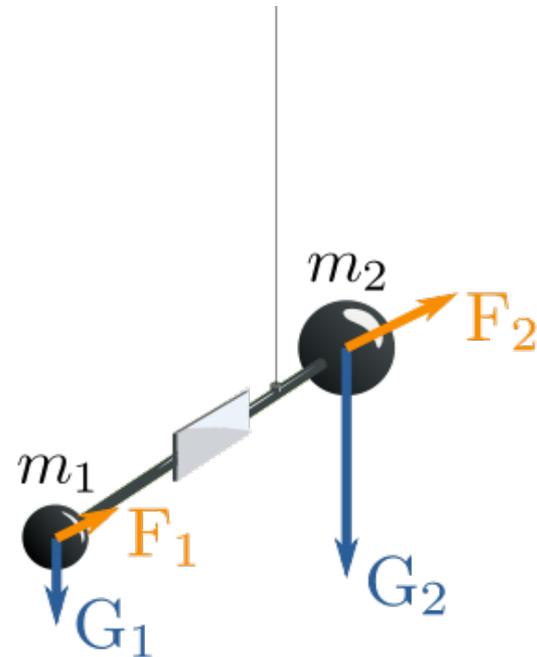
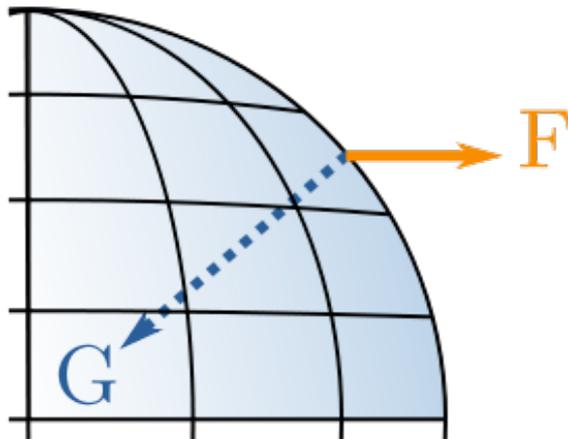
Comprobación de la equivalencia entre la masa inercial y la masa gravitatoria.

$$F = m a \qquad F = G \frac{M m}{r^2}$$

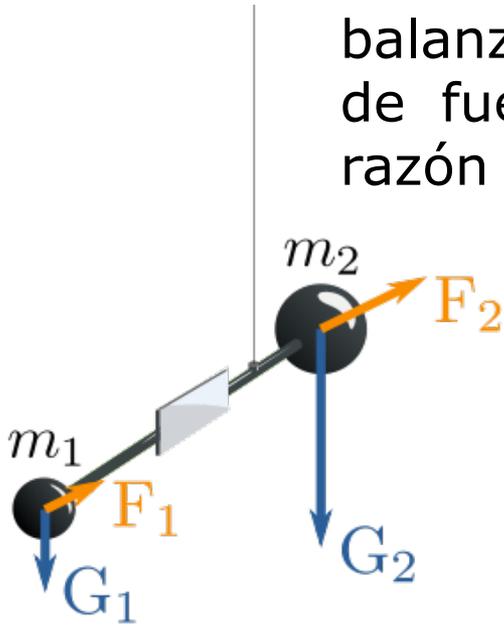
Antecedentes: Newton (1642-1727), Bessel (1784-1846)

Hacia 1885 Eötvös diseñó un experimento más preciso que los predecesores basado en una **balanza de torsión**.

Dirección de la fuerza centrífuga **F** y de la fuerza de la gravedad **G** en la superficie terrestre.



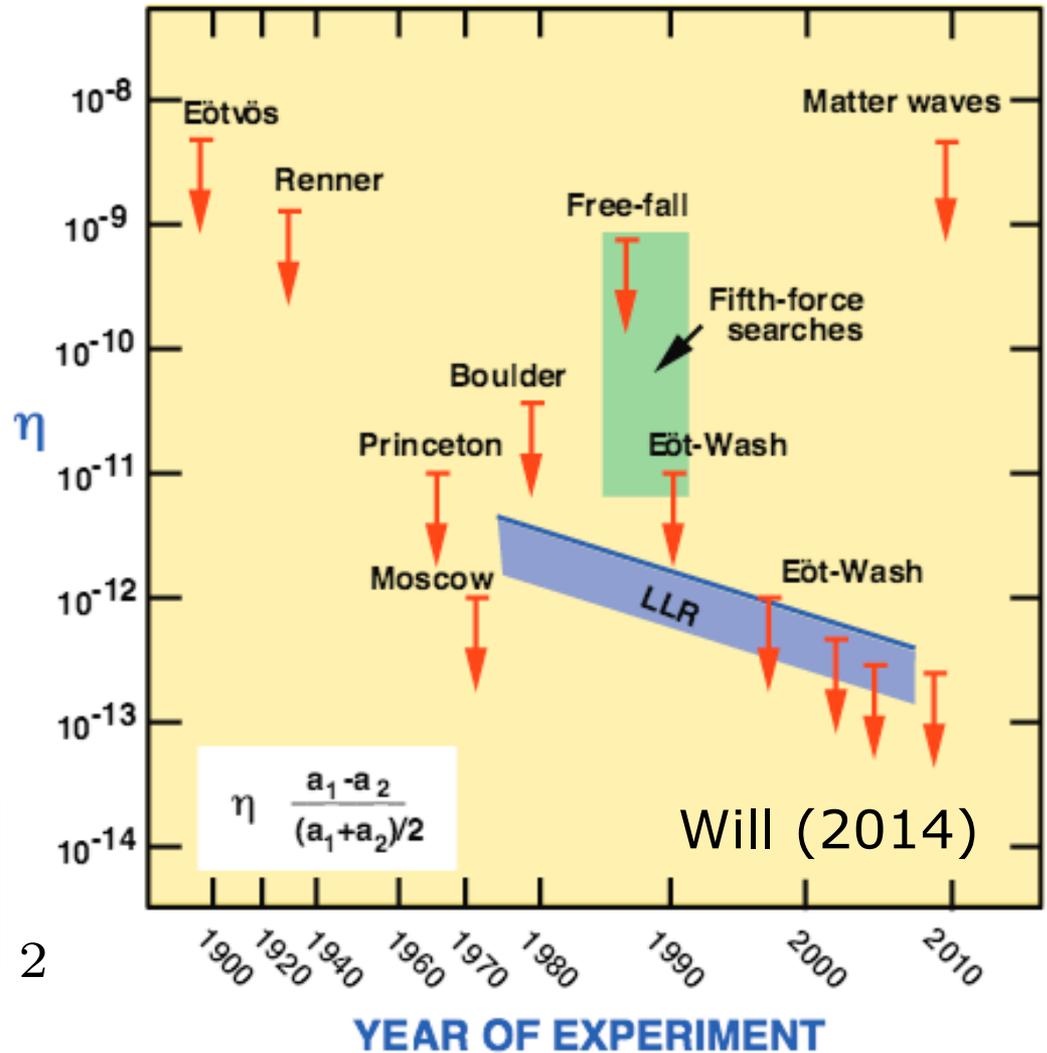
El experimento está diseñado de forma que si las masas inercial y gravitatoria son diferentes, la balanza girará debido a la existencia de un momento de fuerza neto (la razón F_1/F_2 es diferente de la razón G_1/G_2).



Razón de Eötvös:

$$\eta \equiv 2 \frac{|a_1 - a_2|}{|a_1 + a_2|}$$

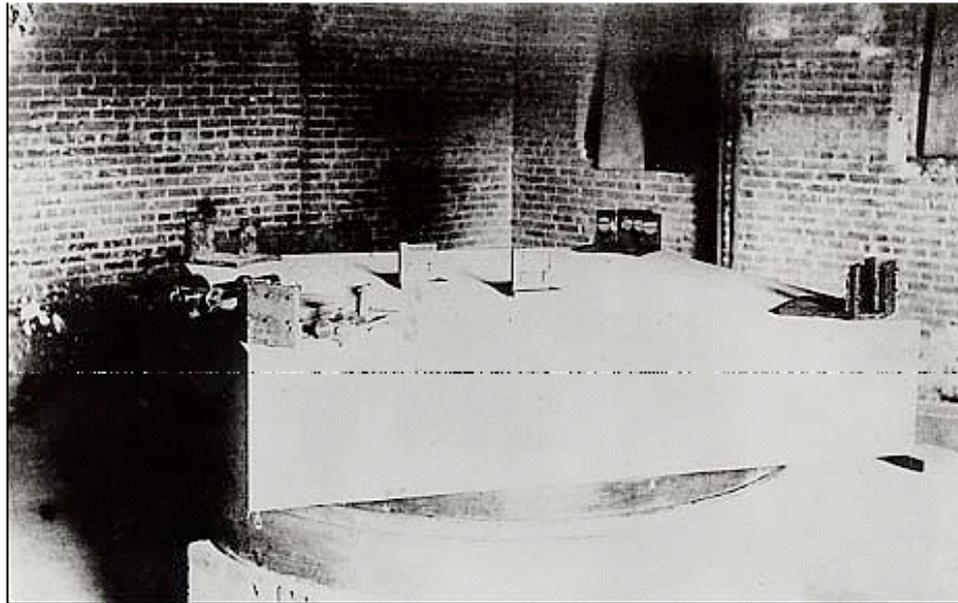
$$= \left[\frac{m_g}{m_i} \right]_1 - \left[\frac{m_g}{m_i} \right]_2$$



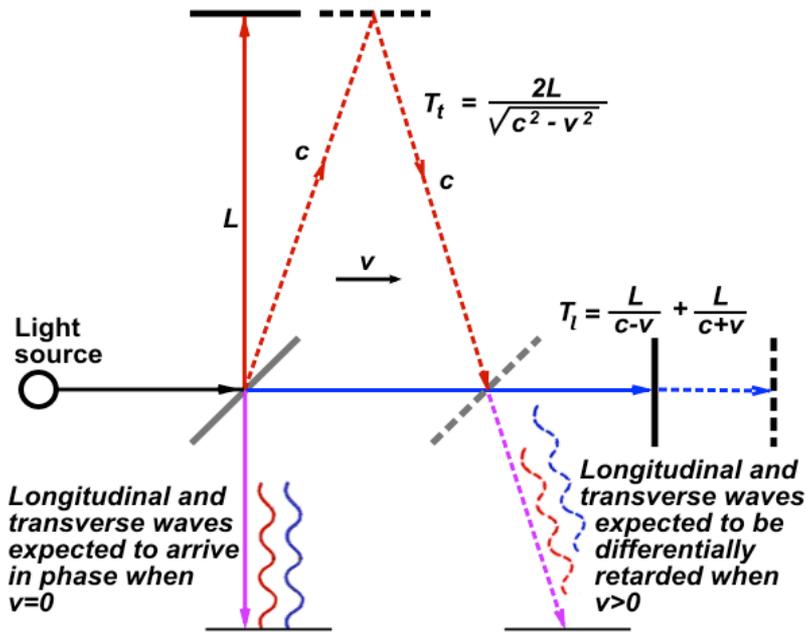
El experimento de Michelson-Morley

Se comparó la velocidad de la luz a lo largo de dos direcciones perpendiculares, con objeto de determinar efectos de arrastre del **éter** en la propagación de la luz (patrón de interferencias).

El resultado negativo es considerado como la **primera evidencia sólida contra la teoría del éter**, por entonces prevaleciente, e inició una línea de investigación que culminó con la formulación de la Relatividad Especial.



Michelson & Morley's 1887 interferometer
built in the basement of Western Reserve
Photo: Case Western Reserve Archive



Se analiza el patrón de interferencia cuando los dos haces se recombinan. Si existe el éter, el patrón estará desplazado transversalmente, pues la luz tardará más tiempo en transitar el brazo longitudinal que el transversal.

El experimento no observó desplazamiento del patrón de interferencia, por lo que se concluyó que no existe arrastre por el éter mensurable.

la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento.

Avance **anómalo** del perihelio de Mercurio

- Las leyes de Kepler establecen que el movimiento de un planeta alrededor del Sol describe una **elipse** con el Sol en uno de sus focos. El punto de máxima aproximación de los dos cuerpos es el **perihelio**.
- El perihelio de la órbita de un planeta no está fijo, sino que gira (**precesión**) alrededor del Sol, debido fundamentalmente a la presencia de otros planetas que perturban las órbitas.

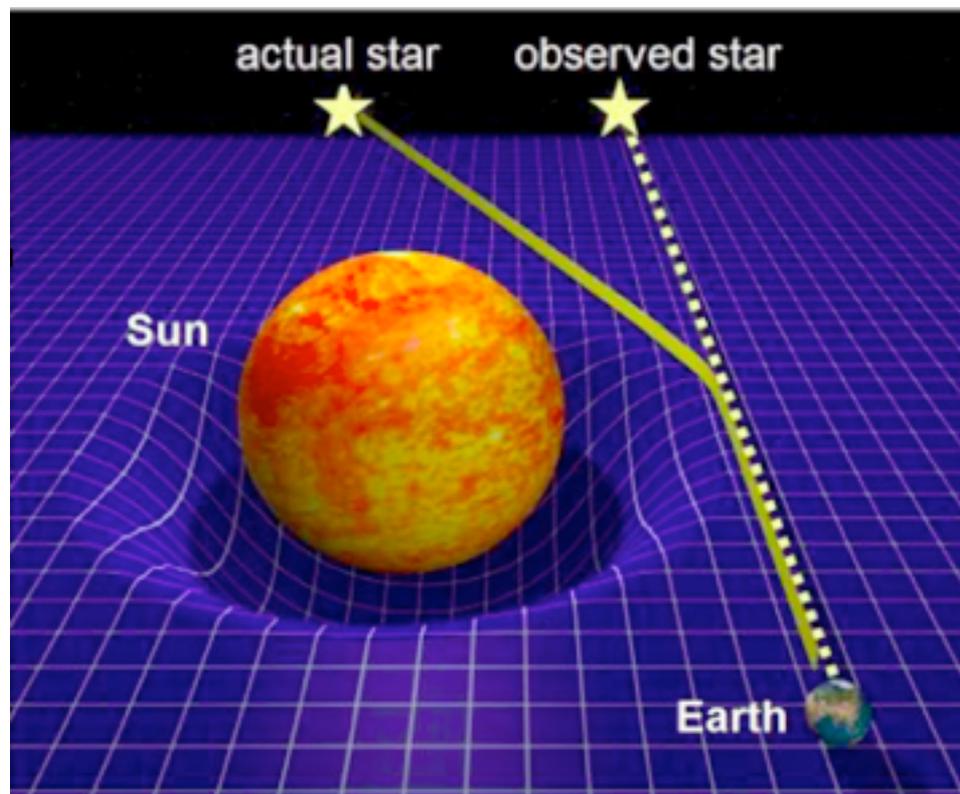


Le Verrier (1859)

Precesión (arcsec/siglo)	Causa
531'63±0.69	Otros planetas
0'0254	Achatamiento del Sol
42'98±0.04	Relatividad General
574'64±0'69	Total
574'10±0'65	Observado

Einstein demostró que la RG explicaba el avance anómalo de 42.98"/siglo no atribuible al efecto gravitatorio de otros planetas.

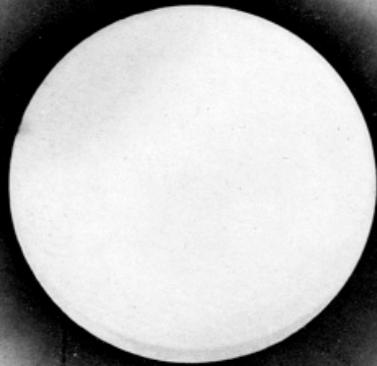
La desviación de la luz por cuerpos masivos



La predicción de la Relatividad General sobre el ángulo de deflexión de la luz es el **doble** que la obtenida mediante argumentos newtonianos o puramente basados en el principio de equivalencia.

La primera observación de la deflexión de la luz se obtuvo midiendo el **cambio en la posición de estrellas lejanas al pasar cerca del Sol.**

Las observaciones fueron realizadas en Mayo de 1919 por **Sir Arthur Eddington** y colaboradores durante un eclipse total de Sol. Se llevaron a cabo simultáneamente en Sobral (Brasil) y en Santo Tomé y Príncipe (costa oeste de Africa).

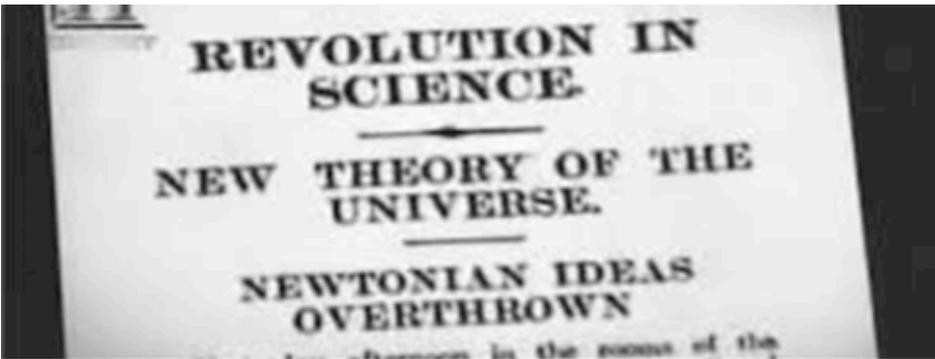


Los resultados se presentaron en Londres en Noviembre de 1919, **confirmando el factor 2 respecto al caso newtoniano.**

Hubo duda sobre estos resultados que fueron completamente disipadas con nuevas mediciones en los años 1960.



Esto catapultó a Einstein a la fama mundial ...



LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less Agog Over Results of Eclipse Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed or Were Calculated to be, but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could Comprehend It, Said Einstein When His Daring Publishers Accepted It.

ECLIPSE SHOWED GRAVITY VARIATION

Diversion of Light Rays Accepted as Affecting Newton's Principles.

The Total Eclipse of 1919 May 29 and the Influence of Gravitation on Light.

THE coming eclipse of the Sun occurs in a region of the sky which is exceptionally rich in bright stars, and for this reason it affords a very favourable opportunity of investigating the influence of the Sun's attraction on the course of a ray of light. Attention was called by the Astronomer Royal to the importance of this occasion in a paper read before the Royal Astronomical Society in March 1917; and the Joint Permanent Eclipse Committee has organized two expeditions. The stations selected on the line of totality are Sobral in northern Brazil and the island of Principe in the Gulf of Guinea; Dr. Crommelin and Mr. Davidson will occupy the former, and Mr. Cottingham and the writer the latter station. In both places totality lasts over 5 minutes. Both expeditions are being equipped together at the Royal Observatory, Greenwich, and will probably leave England about the middle of March. It is intended to concentrate entirely on the one problem of gravitation and light; other eclipse problems can be postponed to a future occasion, but no equally favourable opportunity of measuring the deflection of light will occur for many years.

The prediction which it is hoped to confirm or disprove is that a ray of light passing near the Sun will be bent, the path being concave to the Sun. It is easily seen that if this is so the star will appear displaced away from the Sun. More precisely a star whose true position is just on the Sun's limb will appear displaced $1\frac{7}{5}$ from the limb; and for other stars the displacement is inversely proportional to the distance from the Sun's centre. This is the value according to Einstein's theory, but another less revolutionary hypothesis suggests a deflection of half this amount. It is important that the deflection, if it exists, should be measured sufficiently accurately to discriminate between the different theories.



Espejismos gravitacionales: los **anillos de Einstein** son ejemplos espectaculares de la deflexión de la luz de galaxias distantes por objetos más cercanos.

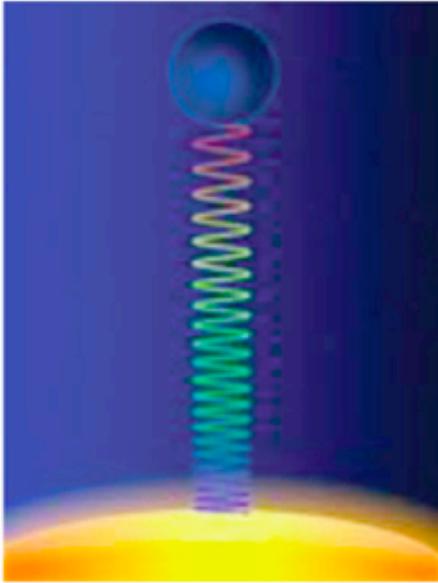


The Cosmic Horseshoe

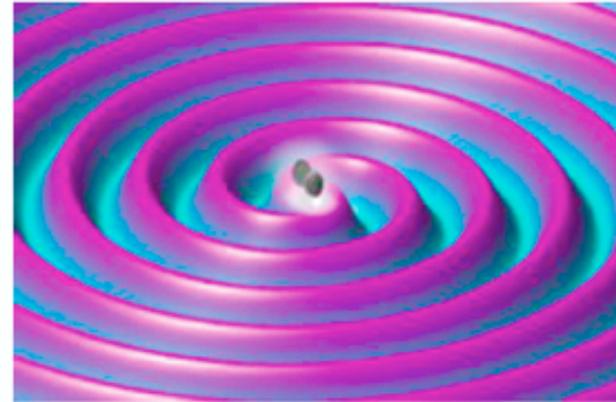
LRG 3-757 (SDDS + HST wide Field Camera 3)

Glaciación (1920-1960)

Dos predicciones de la Relatividad General se quedaron sin confirmación directa durante muchos años.



Corrimiento al rojo gravitatorio



Existencia de las Ondas Gravitatorias (aún sin confirmación *directa*)

La tecnología de la época no permitió el desarrollo experimental del campo, y éste se estancó.

Sólo hubo una serie de trabajos teóricos, "relegados a las cloacas de la Física y la Astronomía" (Will 2014).

Edad de Oro (1960-1980)

It is unfortunate to note that the situation with respect to the experimental checks of general relativity theory is not much better than it was a few years after the theory was discovered - say in 1920. This is in striking contrast to the situation with respect to quantum theory, where we have literally thousands of experimental checks. Relativity seems almost to be a purely mathematical formalism, bearing little relation to phenomena observed in the laboratory. It is a great challenge to the experimental physicist to try to improve this situation; to try to devise new experiments and refine old ones to give new checks on the theory.

Robert H. Dicke
Conferencia de Chapel Hill en 1957 = "GR0"

La astronomía y la tecnología acudieron al rescate ...

Hacia el inicio de la década de 1960, **extraordinarios descubrimientos astronómicos** - cuásares, púlsares, radiación de fondo de microondas - unido al desarrollo de nuevos experimentos posibilitados por **avances tecnológicos** - relojes atómicos, rastreado láser, criogenia - empujaron a la Relatividad General al frente de la investigación en Física.

La Edad de Oro comienza con el **experimento de Pound-Rebka (1960)** para medir el corrimiento al rojo gravitacional, y termina con el anuncio (1979) de que la evolución orbital del primer **púlsar binario** descubierto (**Hulse-Taylor**) concuerda con la propia de un sistema que emite radiación gravitatoria de acuerdo con la Relatividad General

Como consecuencia, la mayoría de teorías alternativas de la gravedad quedaron descartadas.

El experimento de Pound-Rebka (1960-1965)

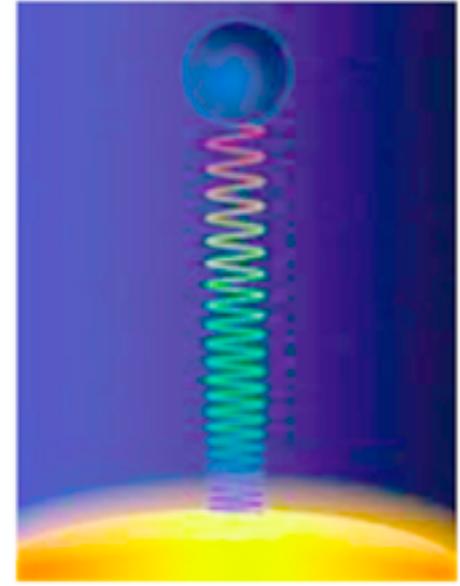
Es un experimento de **corrimiento al rojo gravitatorio**, en el que se midió el cambio de frecuencia de la luz al moverse en un campo gravitatorio. Confirmó la predicción de la Relatividad General que afirma que el tiempo debe transcurrir de forma distinta en diferentes zonas de un campo gravitatorio.

Idea básica: cuando un átomo sufre una transición de un estado excitado al fundamental, emite un fotón de **energía y frecuencia características**. El proceso inverso ocurre si el átomo absorbe un fotón de la **misma** energía y frecuencia. Cualquier pequeña discrepancia no permite la absorción.

En presencia de un campo gravitatorio la frecuencia y energía del fotón sufren corrimiento al rojo (no habrá absorción). Pero si el átomo se mueve hacia el fotón a la **velocidad relativa adecuada**, el corrimiento Doppler resultante cancelará el corrimiento gravitatorio y se producirá la absorción.

Objetivo: medir la velocidad relativa del átomo, pues es una medida del corrimiento al rojo gravitatorio.

Laboratorio Jefferson, Universidad de Harvard (EEUU)

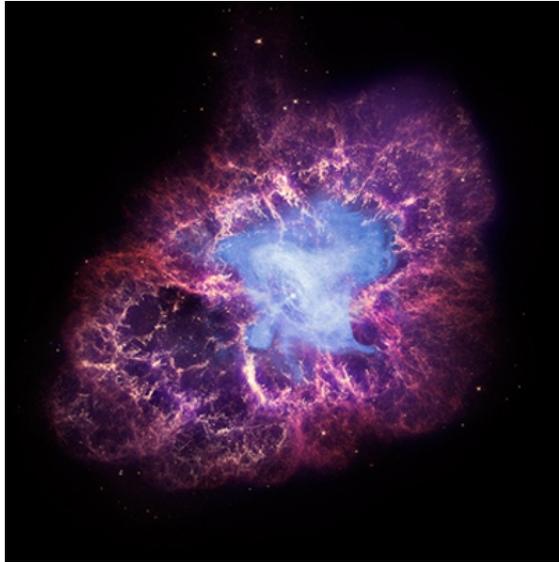


El experimento midió el cambio en la frecuencia de los fotones emitidos por ^{75}Fe al ascender/descender la torre izquierda del Laboratorio Jefferson. Utilizando el efecto Mössbauer para producir resonancias estrechas pudo medirse el desplazamiento con gran precisión.

El experimento demostró que la frecuencia de la luz en un campo gravitatorio **disminuye** (corrimiento al rojo) al ser observada en una región de **campo gravitatorio más débil**.

El pulsar binario de Hulse y Taylor

La única evidencia experimental de la existencia de ondas gravitatorias proviene del estudio de **púlsares binarios**.



¿Qué es un **púlsar**?

- **estrella muy compacta**
- **estrella con rotación muy rápida**
- **intenso campo magnético**

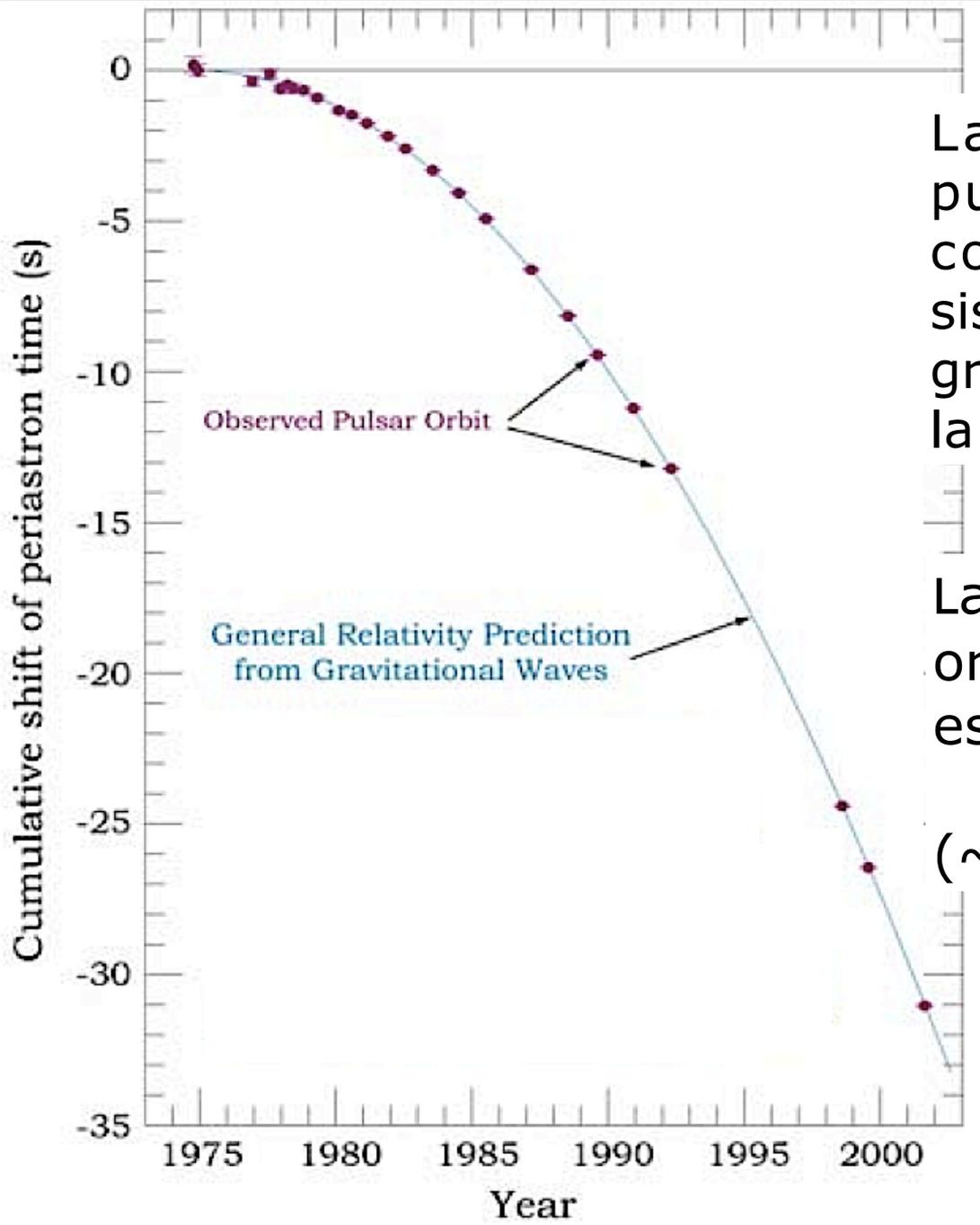
El primer púlsar binario, **PSR B1913+16**, fue descubierto por los radio-astrónomos Russell Hulse y Joseph Taylor en 1974.



Hulse



Taylor



La evolución orbital del pulsar de Hulse y Taylor concuerda con la de un sistema que emite radiación gravitatoria de acuerdo con la Relatividad General.

La disminución del periodo orbital en PSR B1913+16 es de $\sim 10 \mu\text{s}$ por año

($\sim 3.1 \text{ mm}$ por vuelta).

La colisión de las dos estrellas ocurrirá en unos 240 millones de años ...

Búsqueda de la Gravedad Intensa (1981-)

2 importantes figuras de mérito

$$\epsilon \sim \frac{GM}{Rc^2}$$

sistema solar $\epsilon < 0.00001$

estrella de neutrones $\epsilon \sim 0.1$

agujero negro,
universo en expansión $\epsilon \sim 1$



$$\frac{GM}{R^3 c^2} \sim l^{-2}$$

si la curvatura riemanniana del espacio-tiempo es comparable a la longitud de Planck ($\sim 1.6 \cdot 10^{-35}$ m), deben incorporarse los efectos de gravedad cuántica.



(conferencia del Prof. Navarro-Salas)

He impartido dos charlas similares en las ediciones previas del ciclo de *Arquitectura Cósmica*.

Conceptos básicos / generación / detección

¿Ha cambiado algo desde entonces en el campo?

Fundamentalmente, avances tecnológicos.

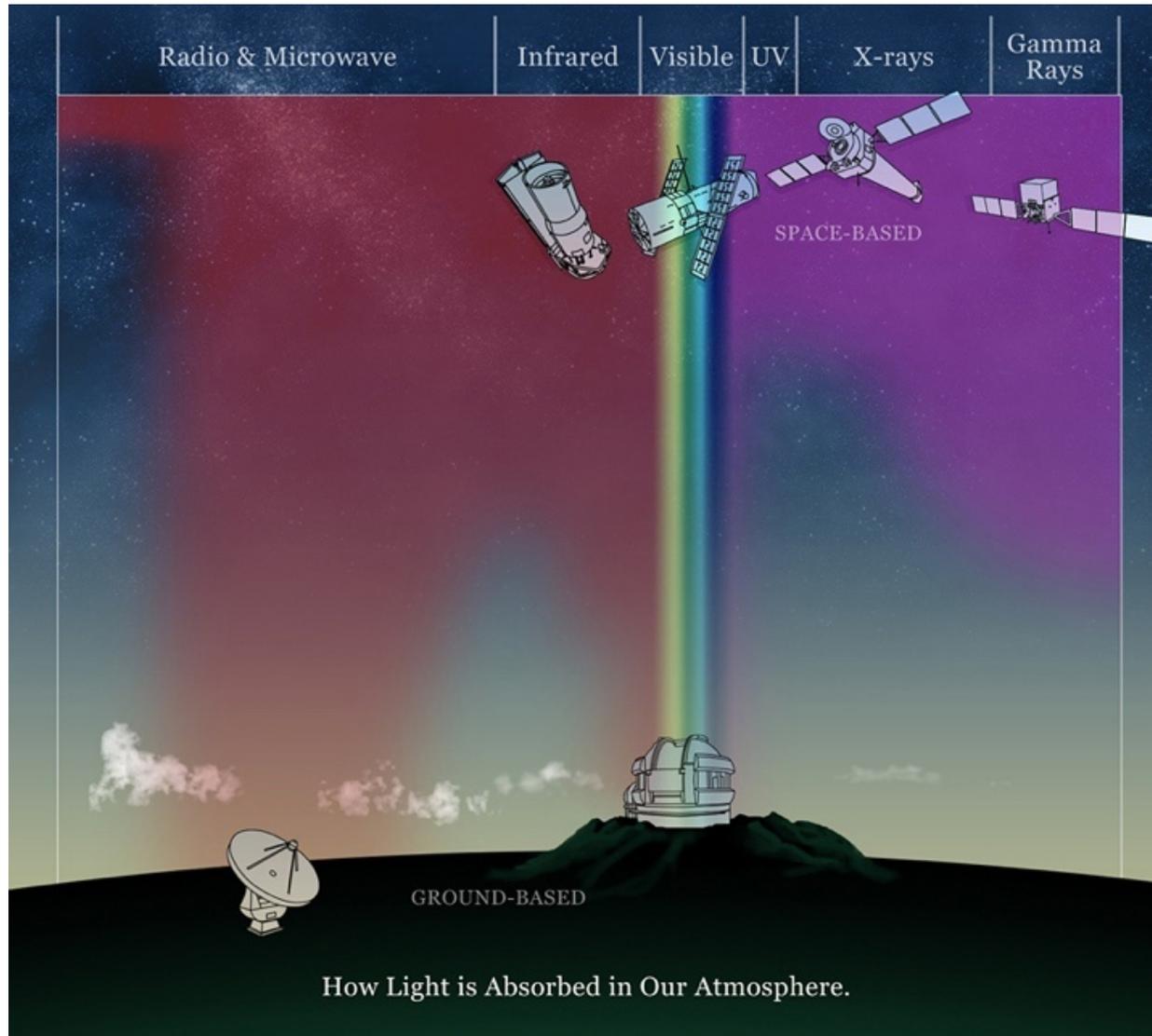
¿Se han detectado las ondas gravitatorias?

Todavía no, pero estamos más cerca de detectarlas **directamente** que hace 2 años.

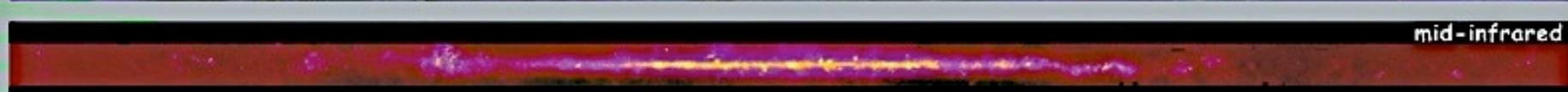
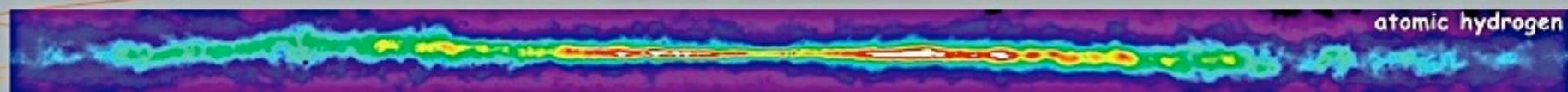
Los expertos en la detección afirman que ocurrirá antes del final de la presente década ... es decir, estamos ***a las puertas de saber si Einstein vuelve a estar en lo cierto ...***

Las **ondas electromagnéticas** nos permiten reconocer el Universo visible - interacción materia y radiación.

Espectro electromagnético



NASA/CXC/
M. Weiss



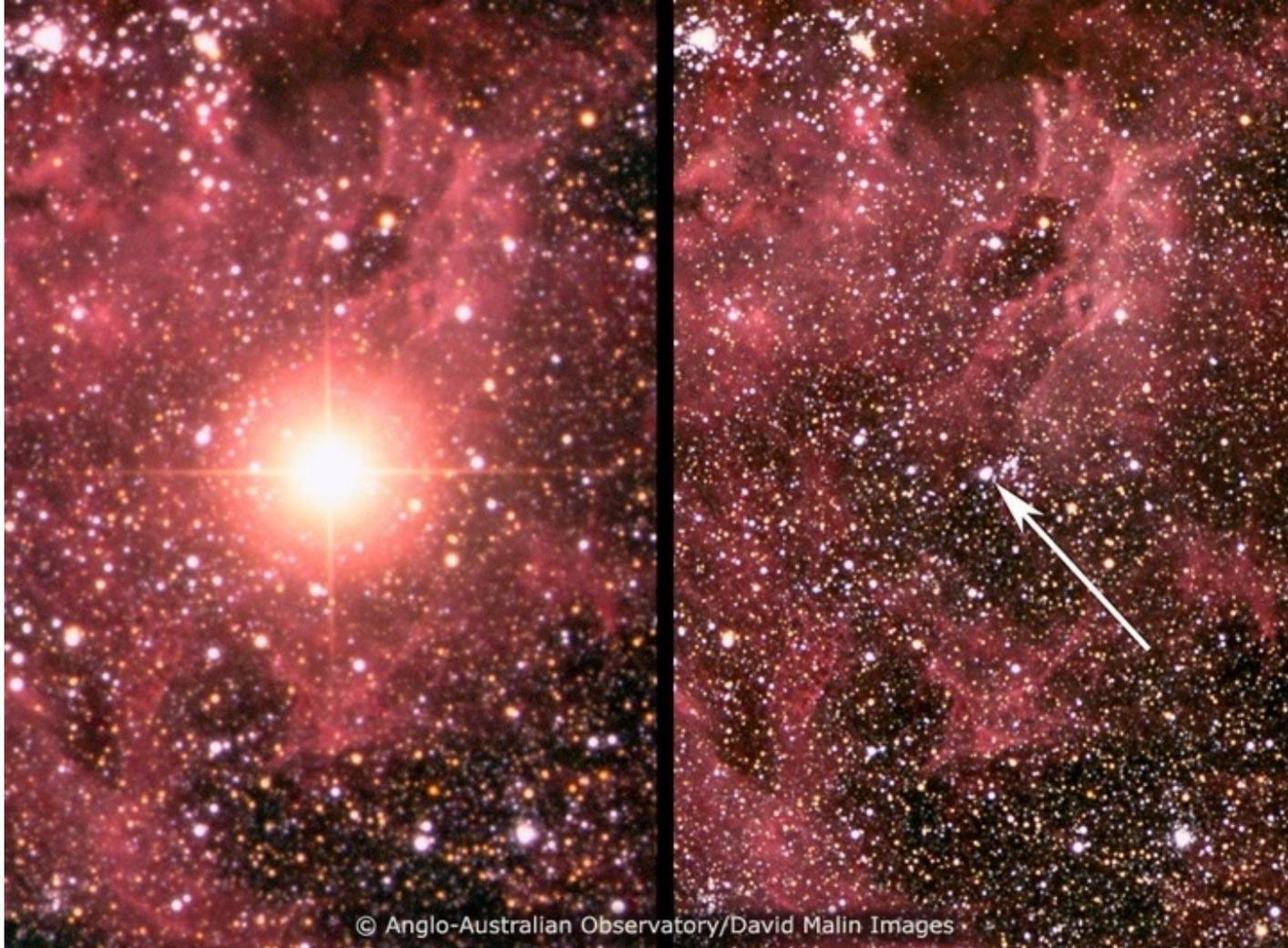
<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way

Hay otros **mensajeros cósmicos** que nos permiten conocer cómo es nuestro Universo:

- Neutrinos (Sol, SN1987A - IceCube 28 PeV neutrinos, Mayo 2013)
- Ondas gravitatorias (?)



Puede demostrarse que **lejos de la fuentes** del campo gravitatorio, donde el **campo es débil**, las ecuaciones de Einstein se convierten en una ecuación de ondas.

GEOMETRÍA

MATERIA

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi T_{\mu\nu}$$



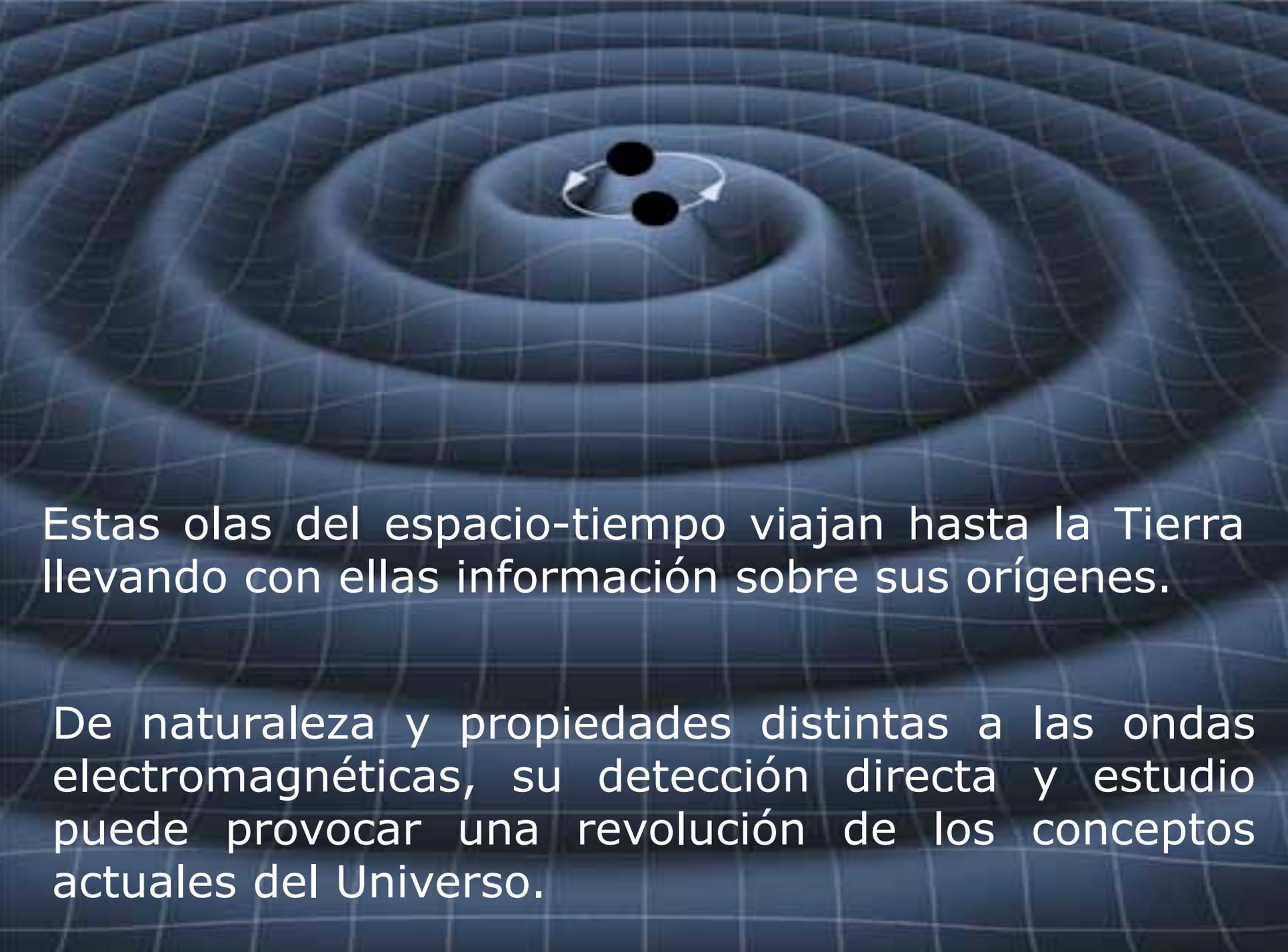
Operador diferencial
(de D'Alembert)

(potencial
gravitatorio)

= materia o vacío

La solución de dicha ecuación son las **ondas gravitatorias** originadas por el movimiento de distribuciones de masa.

Tales ondas pueden interpretarse como "**arrugas**" del espacio-tiempo que se propagan libremente a la velocidad de la luz.

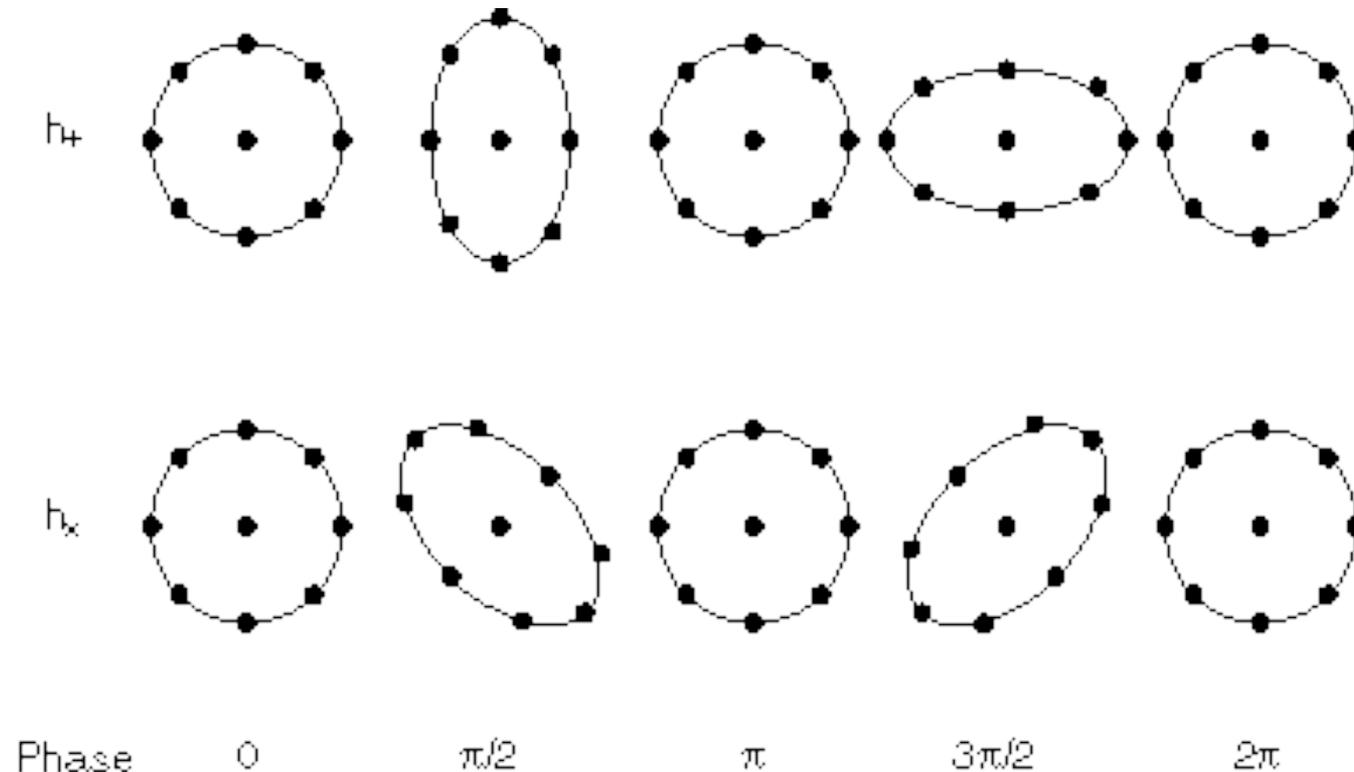


Estas olas del espacio-tiempo viajan hasta la Tierra llevando con ellas información sobre sus orígenes.

De naturaleza y propiedades distintas a las ondas electromagnéticas, su detección directa y estudio puede provocar una revolución de los conceptos actuales del Universo.

Efecto de una onda gravitatoria sobre la materia

Una onda gravitatoria produce **fuerzas de marea** sobre cualquier objeto sobre el que pasa. La distancia entre masas prueba se expande y se contrae de acuerdo a la frecuencia de la onda gravitatoria.



Estimaciones

La **amplitud de la radiación gravitatoria** producida por una fuente a una distancia r :

$$h \sim \frac{G}{c^4 r} \left(\begin{array}{c} \text{variación} \\ \text{momento} \\ \text{cuadrupolar} \end{array} \right) \sim 7 \times 10^{-50} \frac{E}{r}$$

La **amplitud** de una onda gravitatoria suele expresarse mediante una cantidad adimensional h que mide el desplazamiento relativo en la longitud L que separa dos masas prueba:

$$h = \frac{\Delta L}{L}$$

Ejemplo

Fuente de ondas gravitatorias en el cúmulo de Virgo radiando por unidad de tiempo una energía equivalente a una masa solar.

$$\begin{aligned} r &= 20 \text{ Mpc} \sim 6 \times 10^{25} \text{ cm} \\ E &= M_{\odot} c^2 \sim 2 \times 10^{54} \text{ erg} \end{aligned} \longrightarrow \boxed{h \sim 10^{-21}}$$

Por tanto, un detector con una longitud de base de 10^4 m podría medir cambios en la longitud relativa

$$\Delta L = h L \sim 10^{-15} \text{ cm} = 0.01 \text{ fm}$$

es decir, del orden de una centésima de Fermi! es decir, **del orden de una centésima del tamaño de un núcleo atómico.**

La estimación anterior es muy optimista. La emisión de radiación gravitatoria en fuentes astrofísicas es muy inferior.

Principales fuentes astrofísicas de radiación gravitatoria: objetos compactos con materia a velocidades relativistas.

$$\mathcal{L} \sim \varepsilon^2 \frac{c^5}{G} \left(\frac{R}{R_S} \right)^{-2} \left(\frac{v}{c} \right)^6$$

$$\mathcal{L} \sim 10^{59} \text{ erg s}^{-1} \sim 10^{23} \mathcal{L}_{\odot} \sim 10^{52} \text{ W}$$

icomo la luz que emitirían 10^{50} bombillas de 100 vatios!

Las frecuencias más altas se obtienen para **objetos compactos** tales como **estrellas de neutrones** o **agujeros negros** de masas próximas a la masa del Sol.

Radiación
gravitatoria

$$f \leq 10^4 \text{ Hz}$$

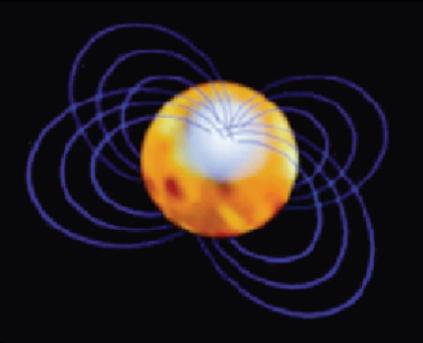
dentro del espectro audible

$$[20 \text{ Hz}, 20 \text{ kHz}]$$

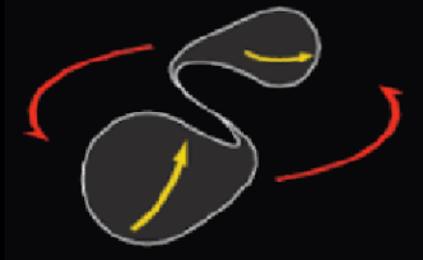
Radiación
electromagnética

$$f \geq 10^7 \text{ Hz}$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{luz visible} \\ f \sim 10^{11} \text{ Hz} \end{array} \right]$$



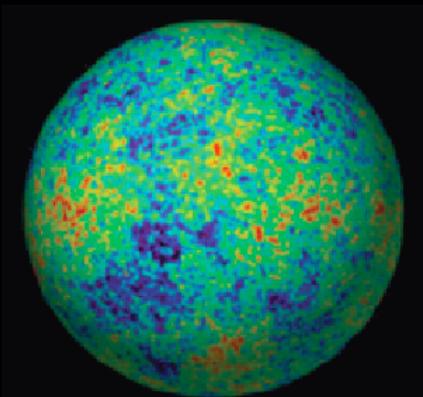
Fuentes continuas: estrellas de neutrones en rotación y púlsares. Señal periódica.



Colisión de binarias compactas: espiral, colisión y pulsación de agujeros negros y estrellas de neutrones. Señal tipo "chirp"

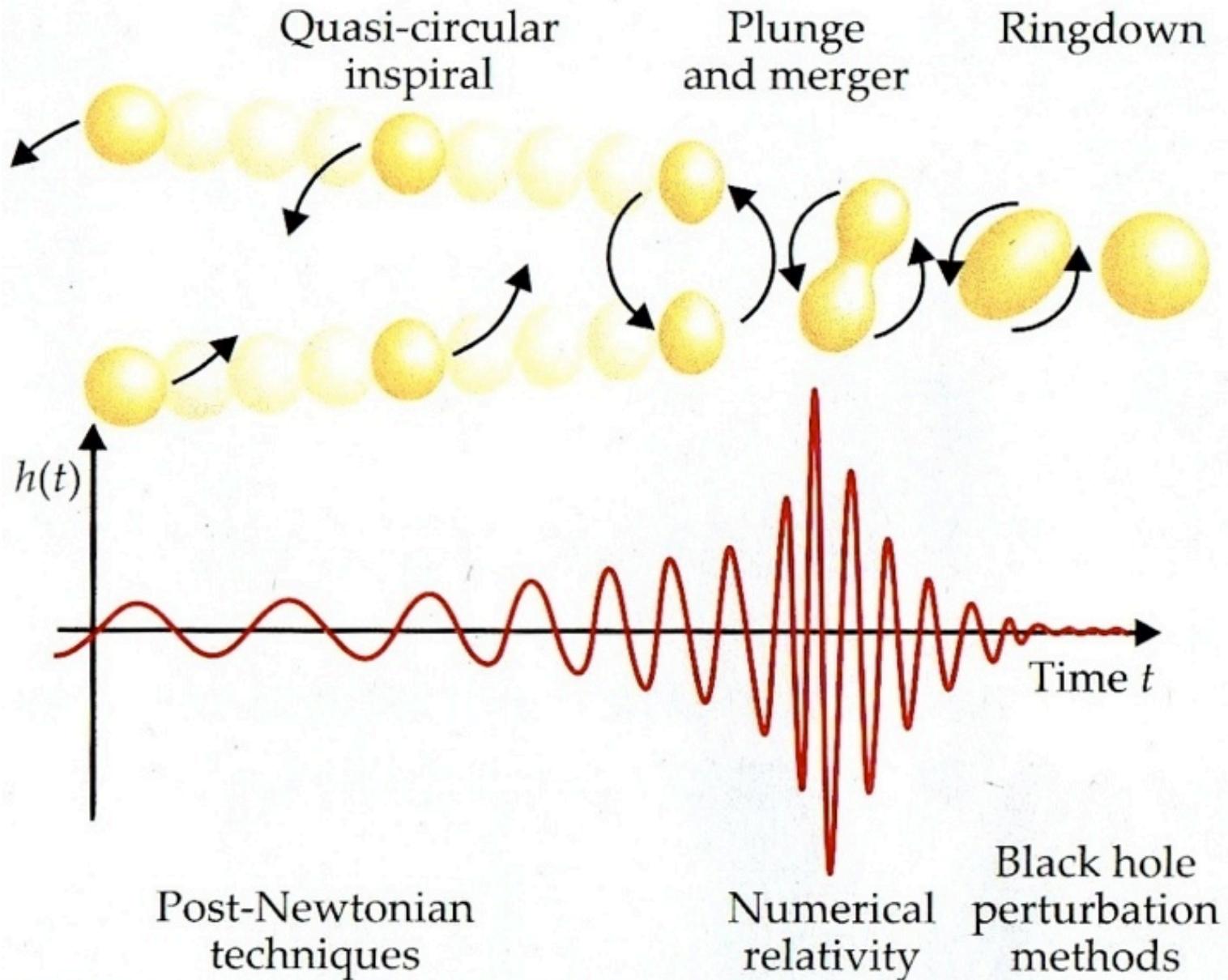


Erupciones breves: supernovas, fuentes transitorias no modelizadas. Señal tipo "burst".



Fuentes estocásticas: fondo de radiación gravitatoria procedente del Big Bang.

Colisión de binarias compactas

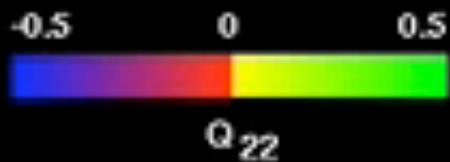
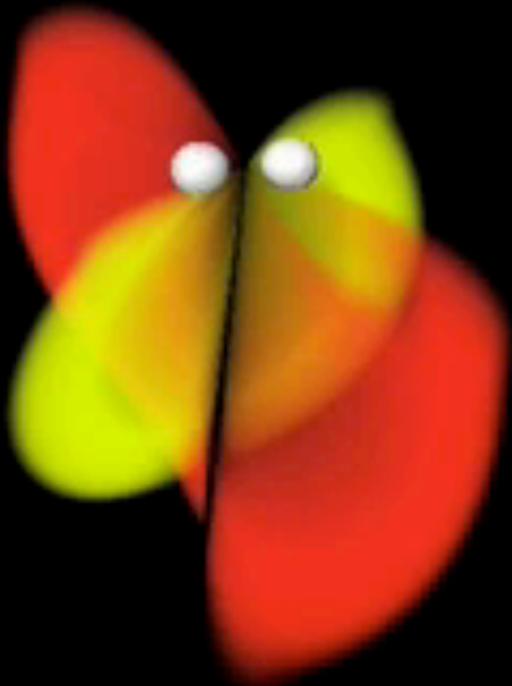


Superordenador “Mare Nostrum” BSC

www.bsc.es

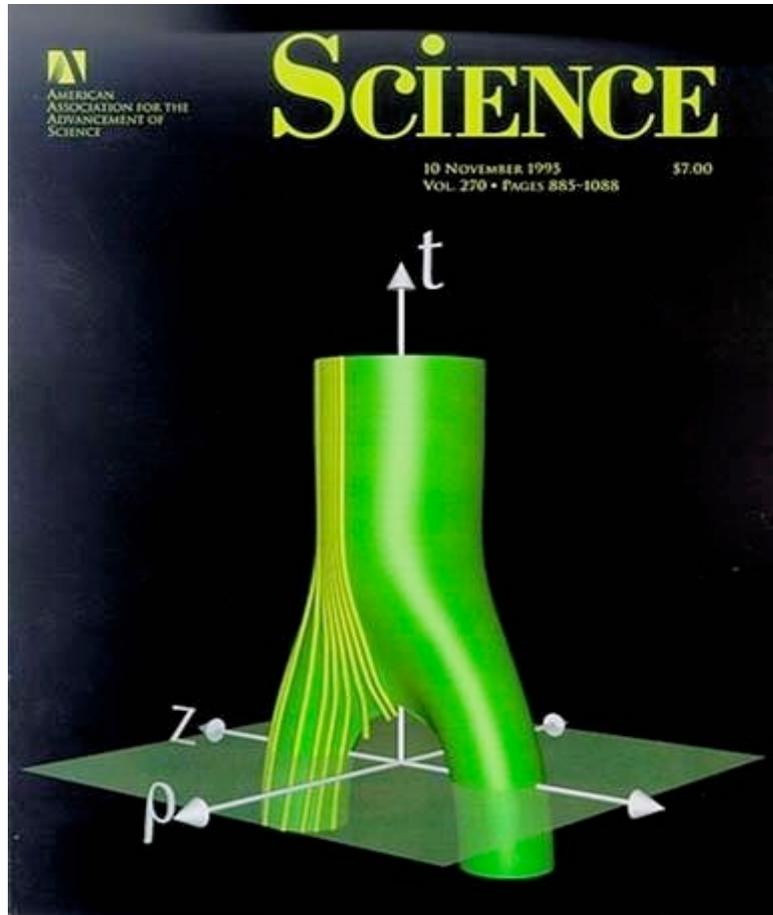
(#5 en Noviembre de 2006)



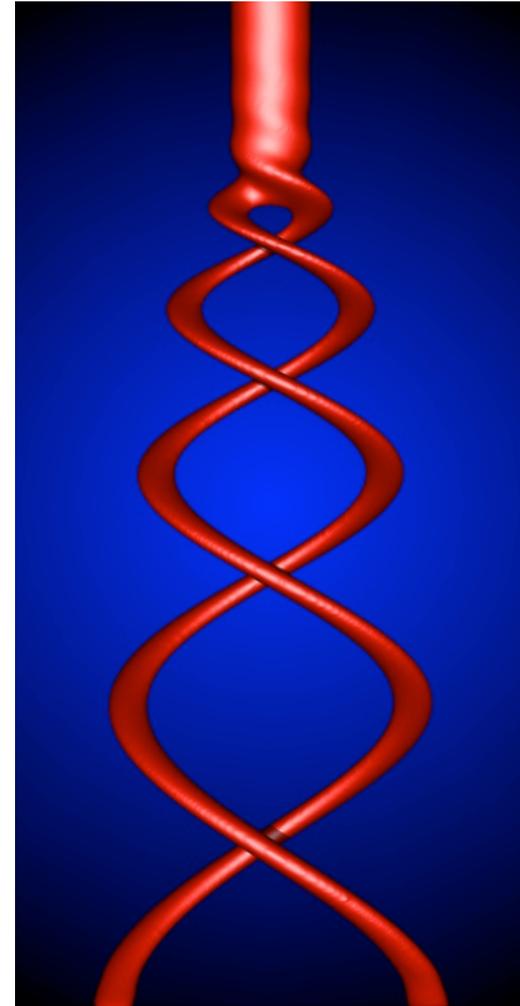


Colisión de dos agujeros negros

1995: Pair of pants
(Head-on collision)



BBH Grand Challenge Alliance

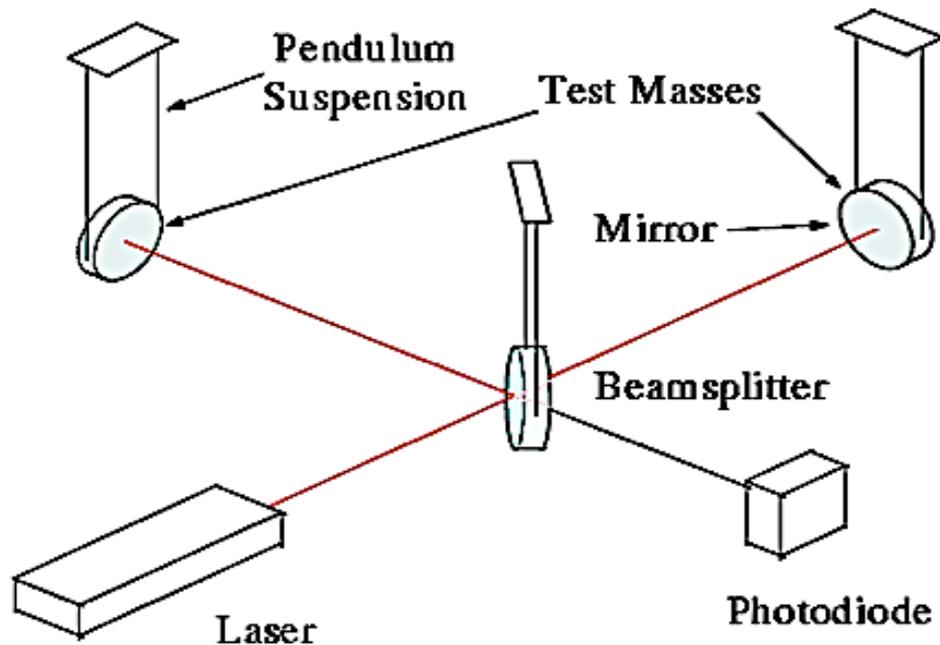


FSU-Jena Numerical Relativity Group

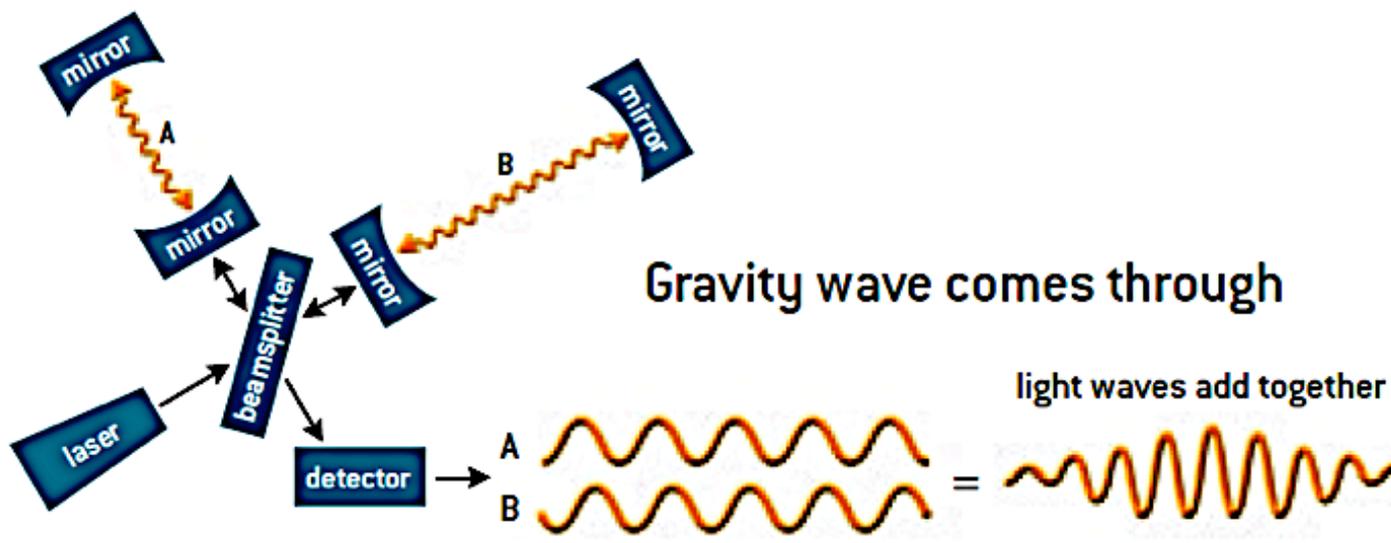
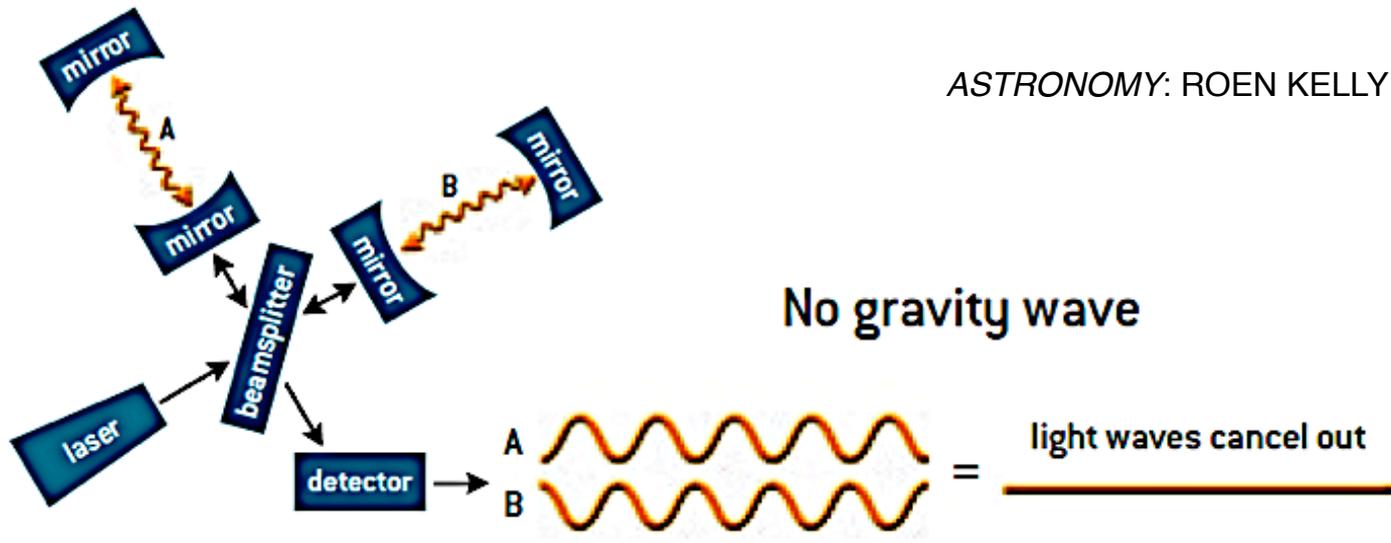
2007: Pair of twisted pants
(spiral & merge)

Detectores Interferométricos

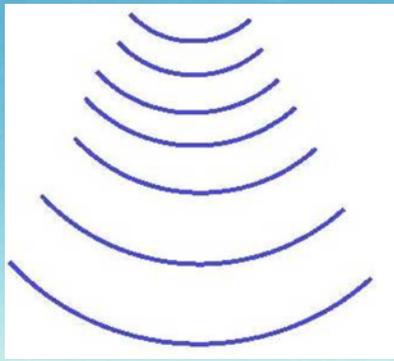
Interferómetros Michelson-Morley. Masas prueba separadas por grandes distancias y suspendidas como péndulos para aislarlas del ruido sísmico y reducir el ruido térmico.



Analizar las franjas de interferencia del láser permite controlar el movimiento de las masas durante su interacción con la radiación gravitatoria.



El cambio (infinitesimal) en la longitud de los brazos origina un cambio en la intensidad de la luz (franjas de interferencia) observada en la salida del interferómetro.



Detector Virgo



Red Expandida de Interferómetros 2020+



Todos los detectores usan la tecnología más avanzada:

★ ultra-vacío (presiones de 10^{-9} mbar). Movimientos (**vibración**) de las masas prueba y de las suspensiones inducidas por **efectos térmicos**.

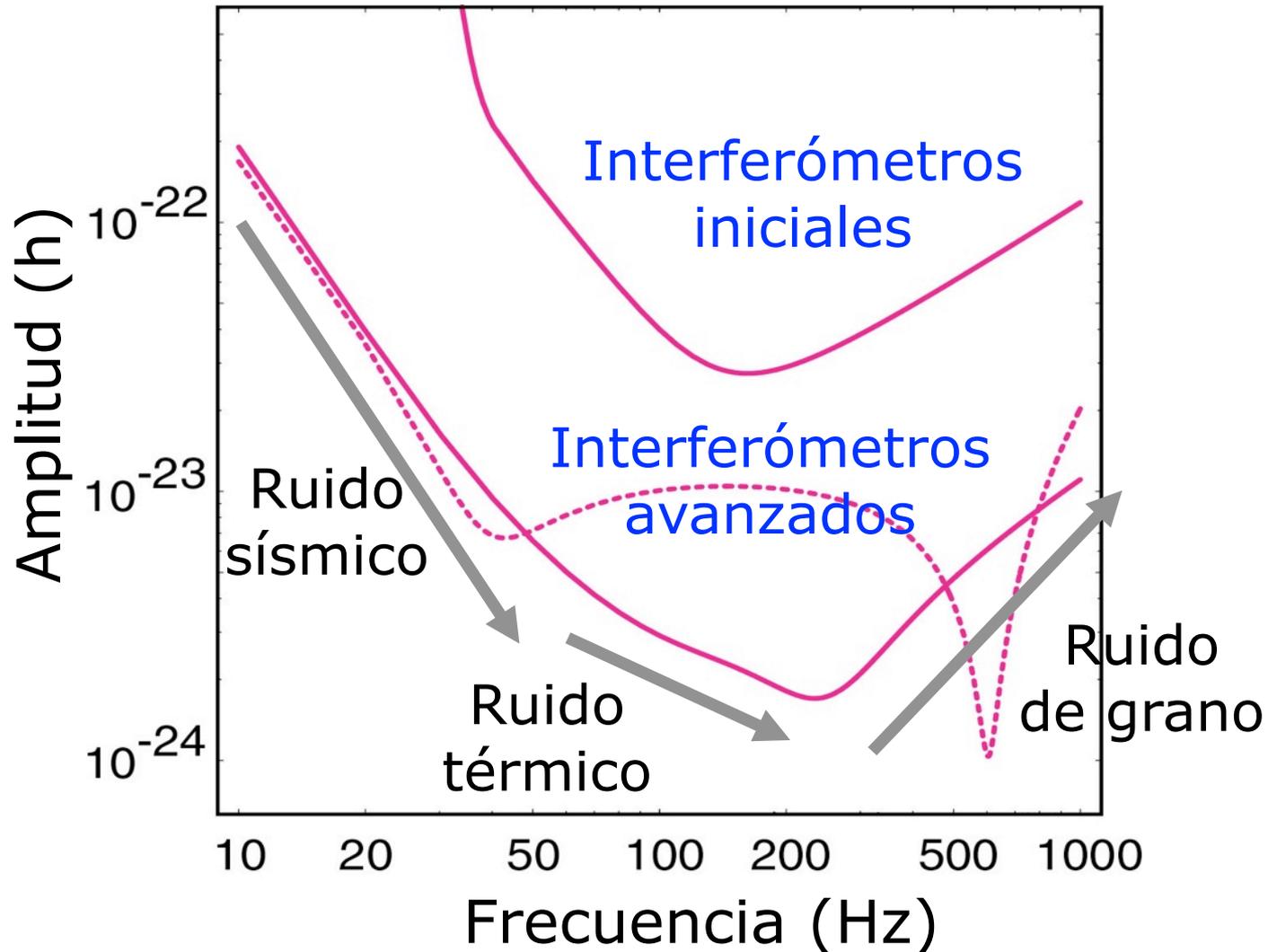
★ láser de alta potencia. **Ruido de grano**: fluctuaciones en el número de fotones en el láser originan fluctuaciones en la señal.

★ espejos altamente reflectantes.

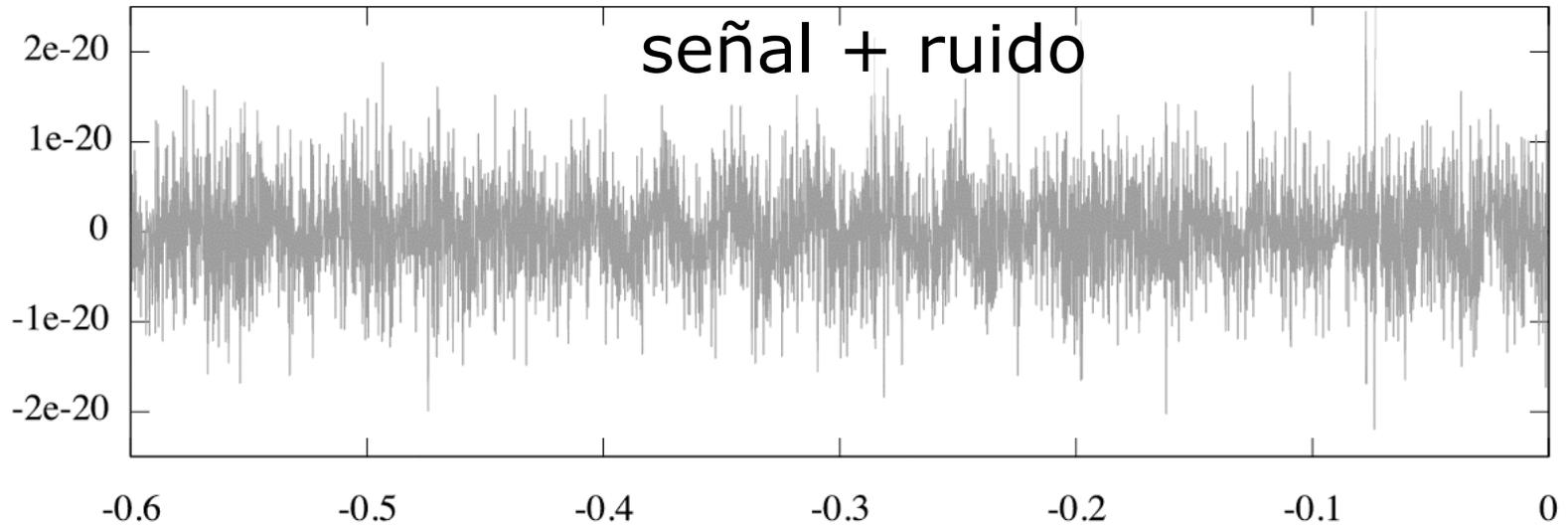
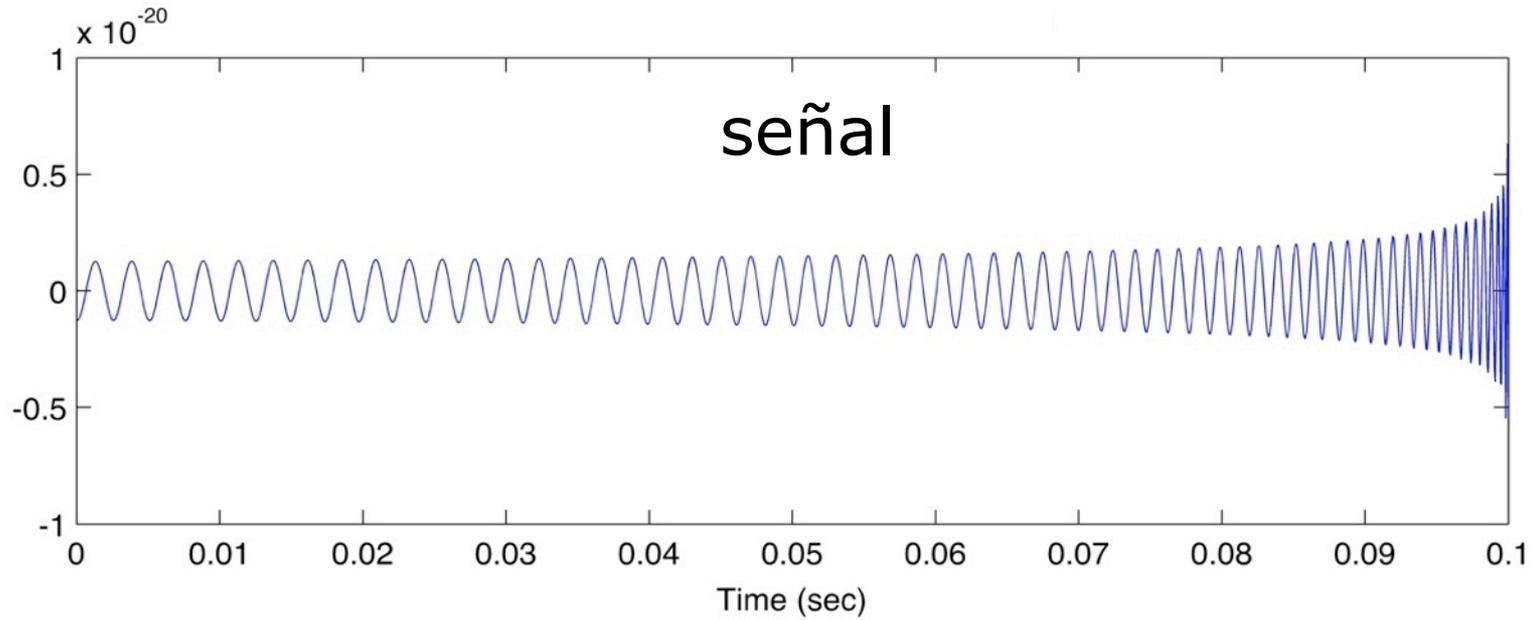
★ sistemas de suspensión monolíticos para aislar las vibraciones. Reducir el **ruido sísmico**.

Mucho ruido y poca señal

La pequeña amplitud de las ondas gravitatorias obliga a **reducir al máximo posibles fuentes de ruido.**

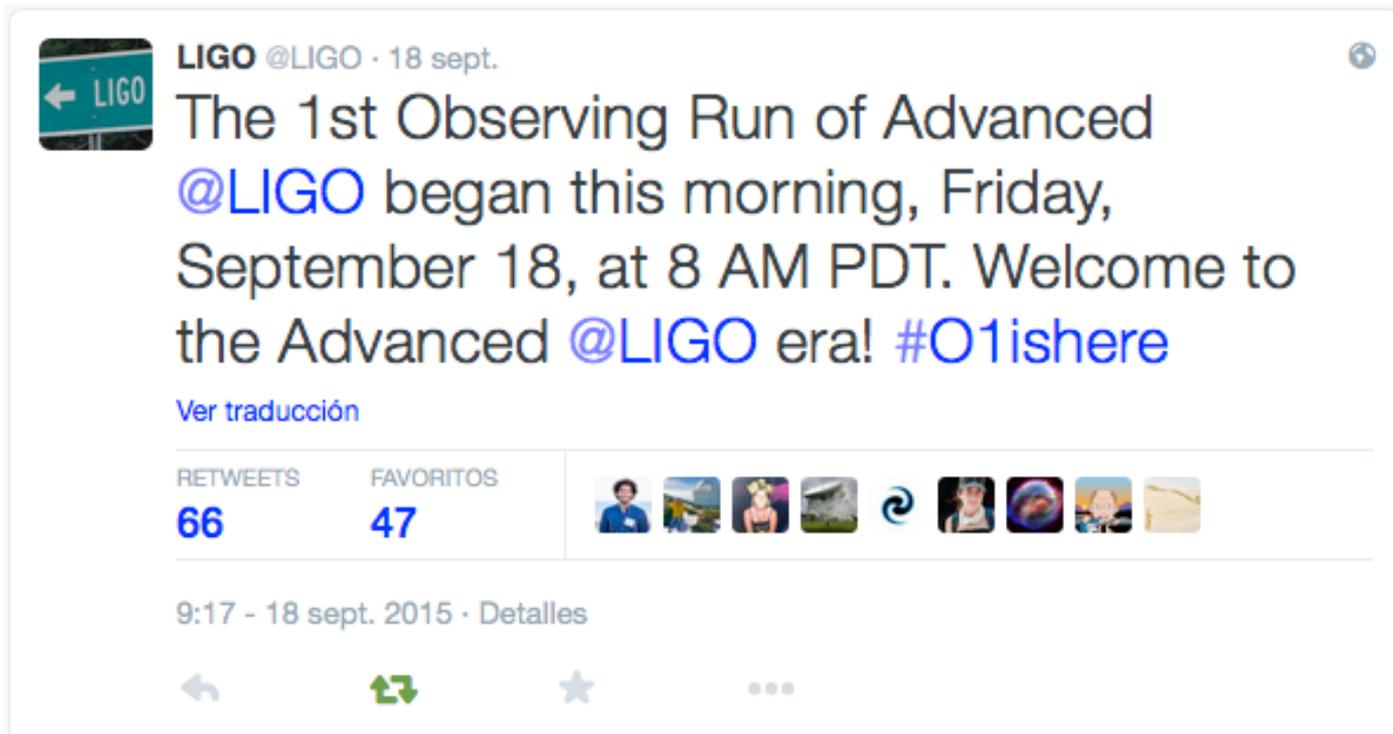


Ejemplo señal gravitatoria tipo "chirp"



Presente actualización

- LIGO y Virgo están siendo actualizados para instalar tecnologías avanzadas.
- Advanced LIGO (**aLIGO**) fue recientemente comisionado (**2014**). Advanced Virgo (AdV) 1-2 años más tarde. Es posible que exista una diferencia de sensibilidad significativa entre aLIGO y AdV durante algún tiempo.



 **LIGO** @LIGO · 18 sept.

The 1st Observing Run of Advanced @LIGO began this morning, Friday, September 18, at 8 AM PDT. Welcome to the Advanced @LIGO era! #O1ishere

[Ver traducción](#)

RETWEETS	FAVORITOS
66	47

9:17 - 18 sept. 2015 · Detalles

Presente actualización

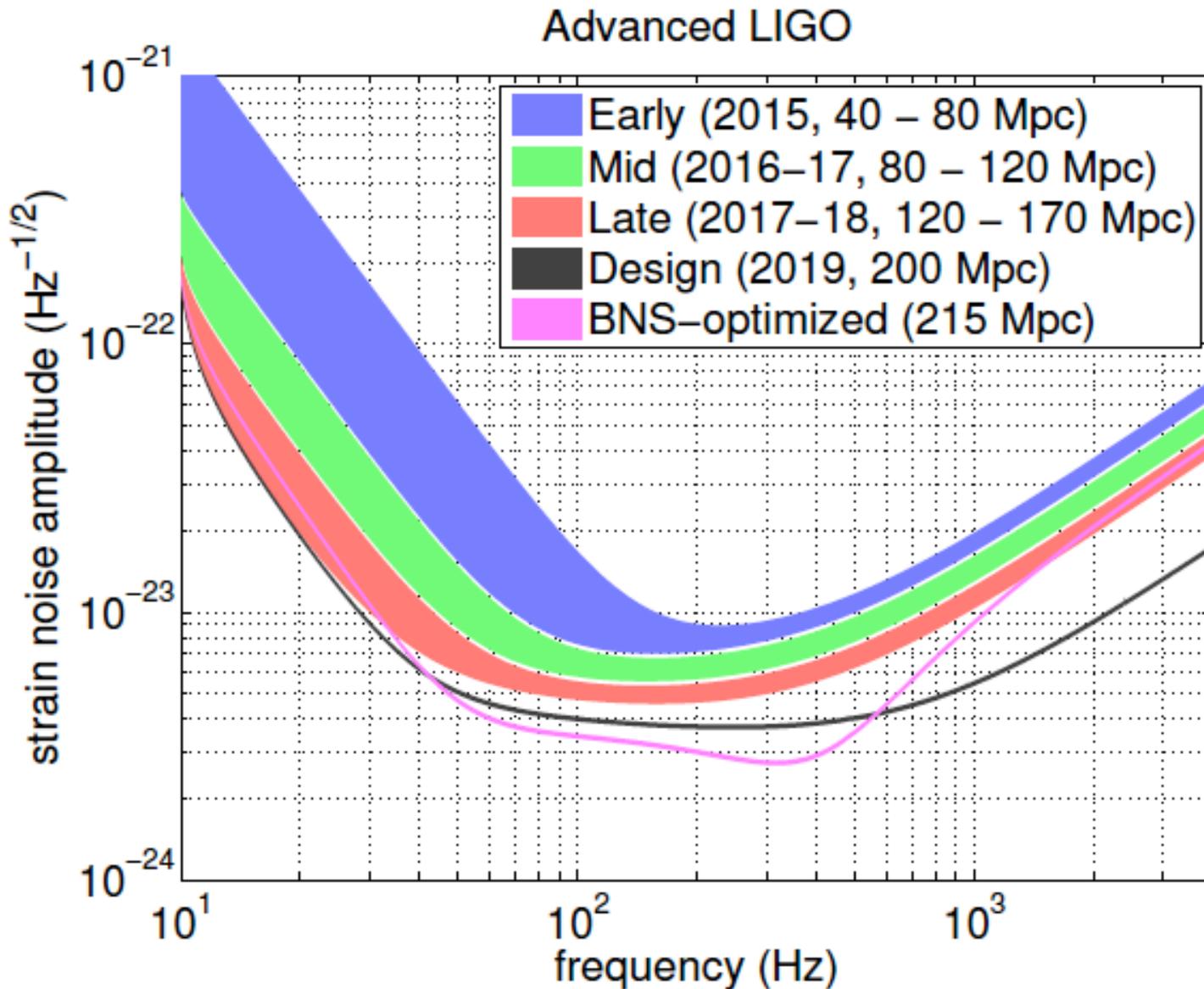
- El comisionado se alternará con observaciones científicas hasta alcanzar la **sensibilidad completa en 2020**.
- Si tanto las previsiones de la actualización como las estimaciones de tasas de sucesos son correctas, **se espera una primera detección hacia 2017** (más probable 2020).

"We are there, we are in the ballpark now. It's clear that this is going to be pulled off."

(Kip Thorne, The Documentary, BBC World Service, 18/9/2015)

- LSC-Virgo desarrollando activamente colaboraciones con observatorios EM y de neutrinos.

Progreso estimado (arXiv:1304.0670)



Detectores avanzados: factor 10 en distancia

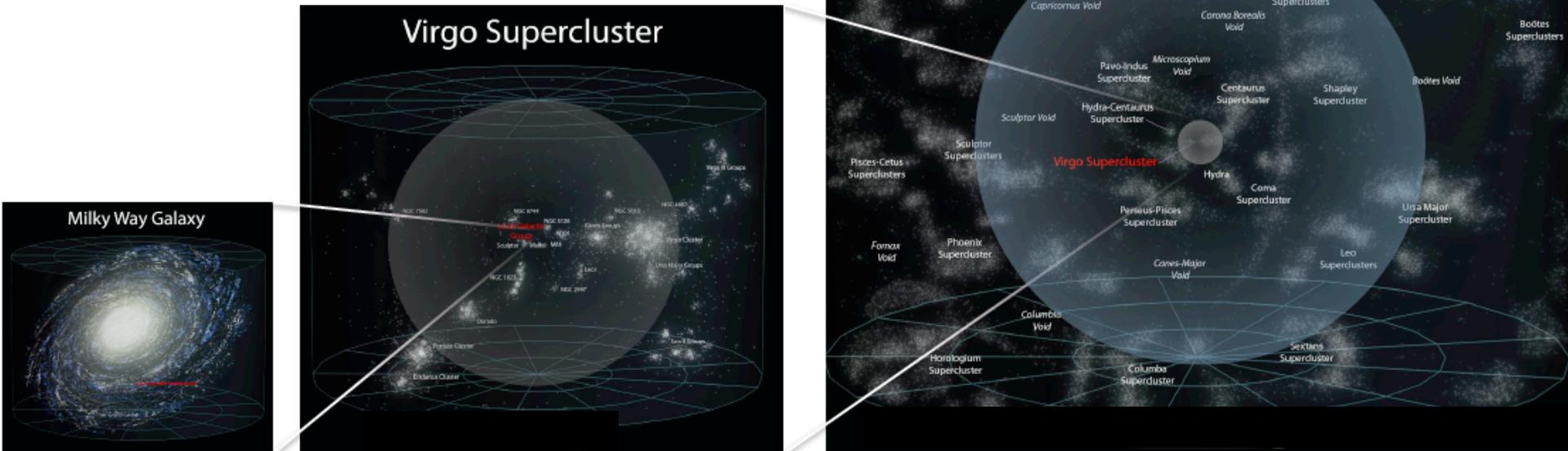
- Abarcarán unas 100.000 galaxias.
- Ritmo de sucesos por galaxia: 1 cada 10.000 años ...
- Aproximadamente **1 suceso al mes !**

NS/NS, LIGO inicial:

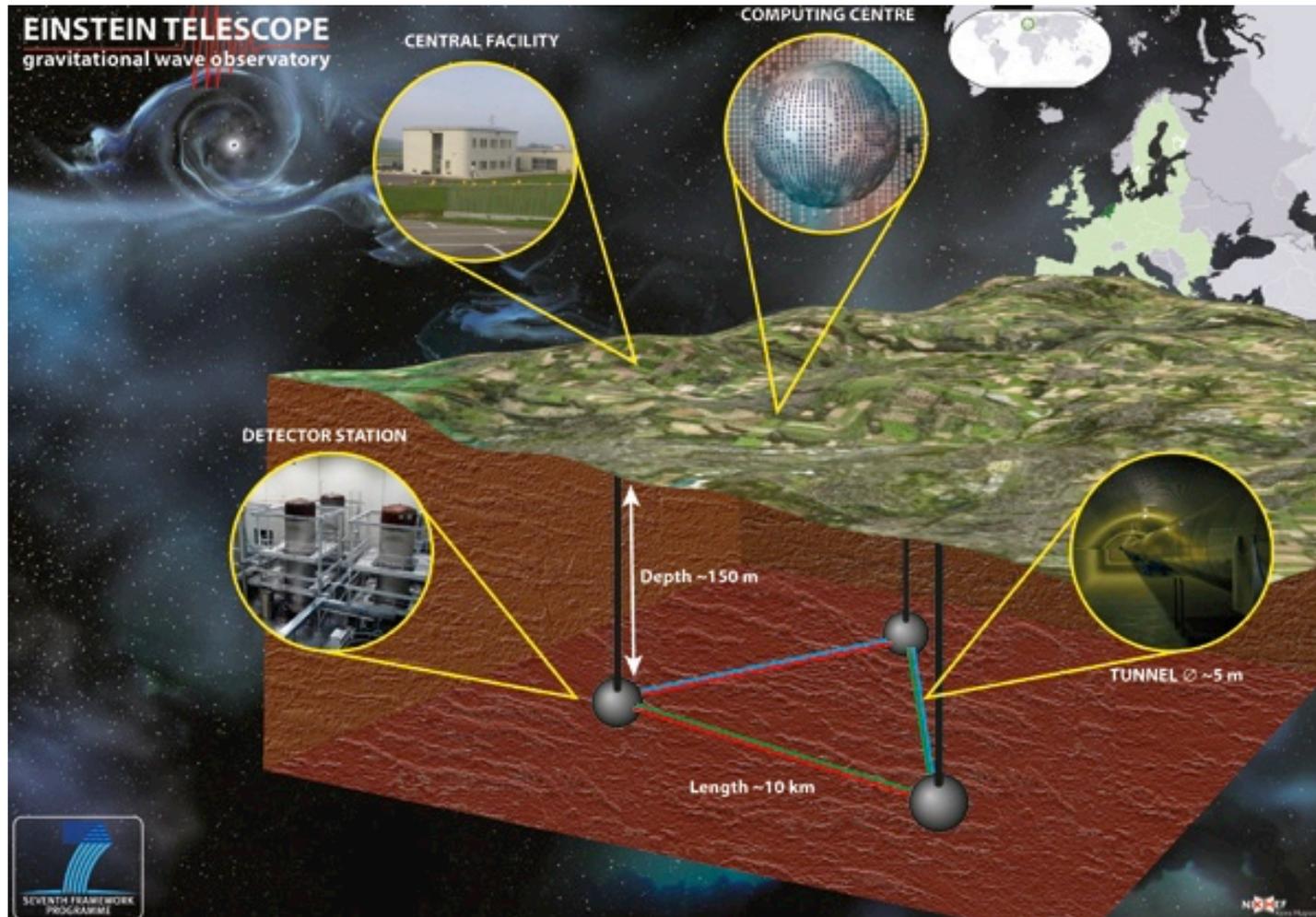
~15Mpc, 1 suceso / 50 años

NS/NS LIGO avanzado:

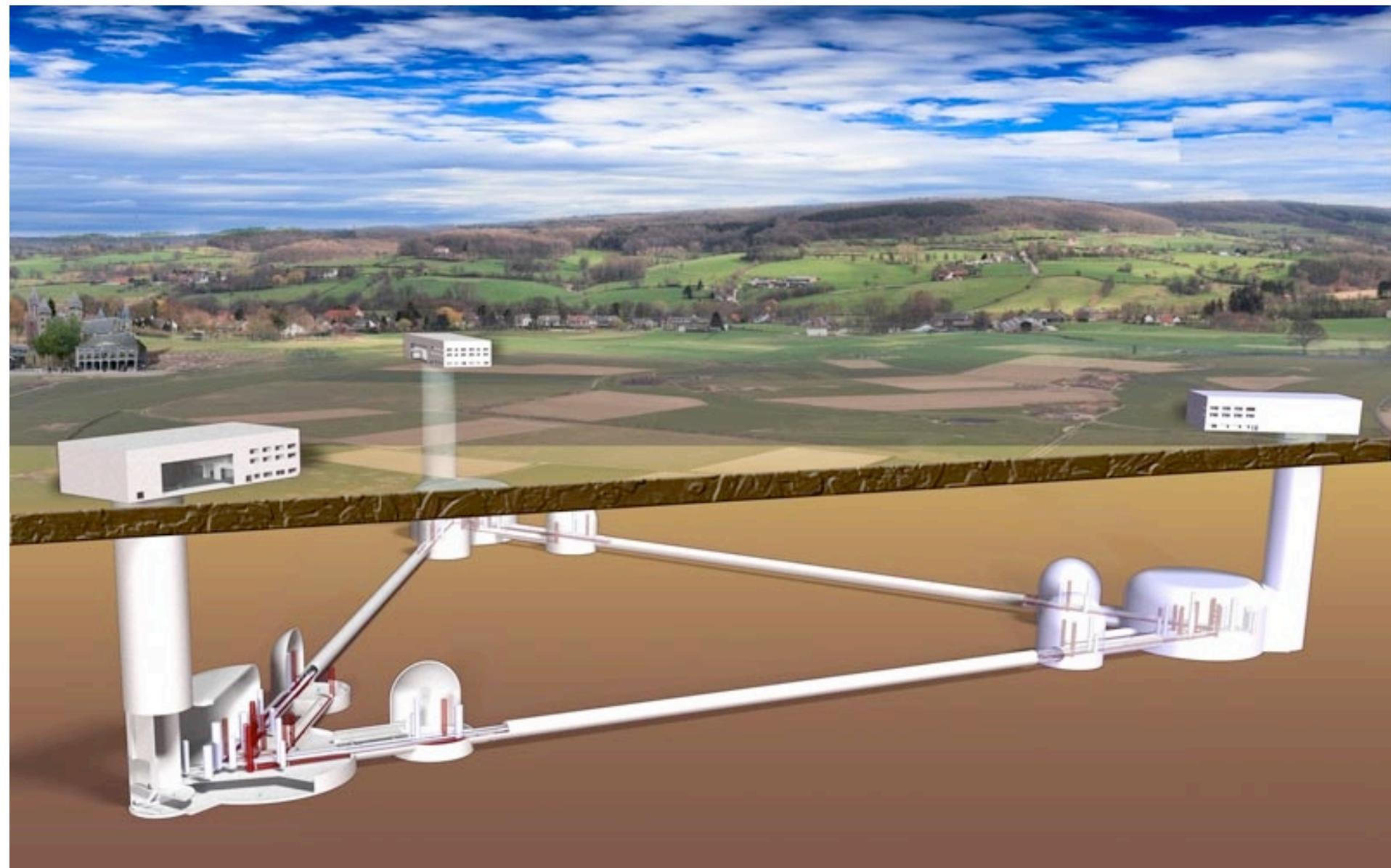
~200Mpc, 40 sucesos / año



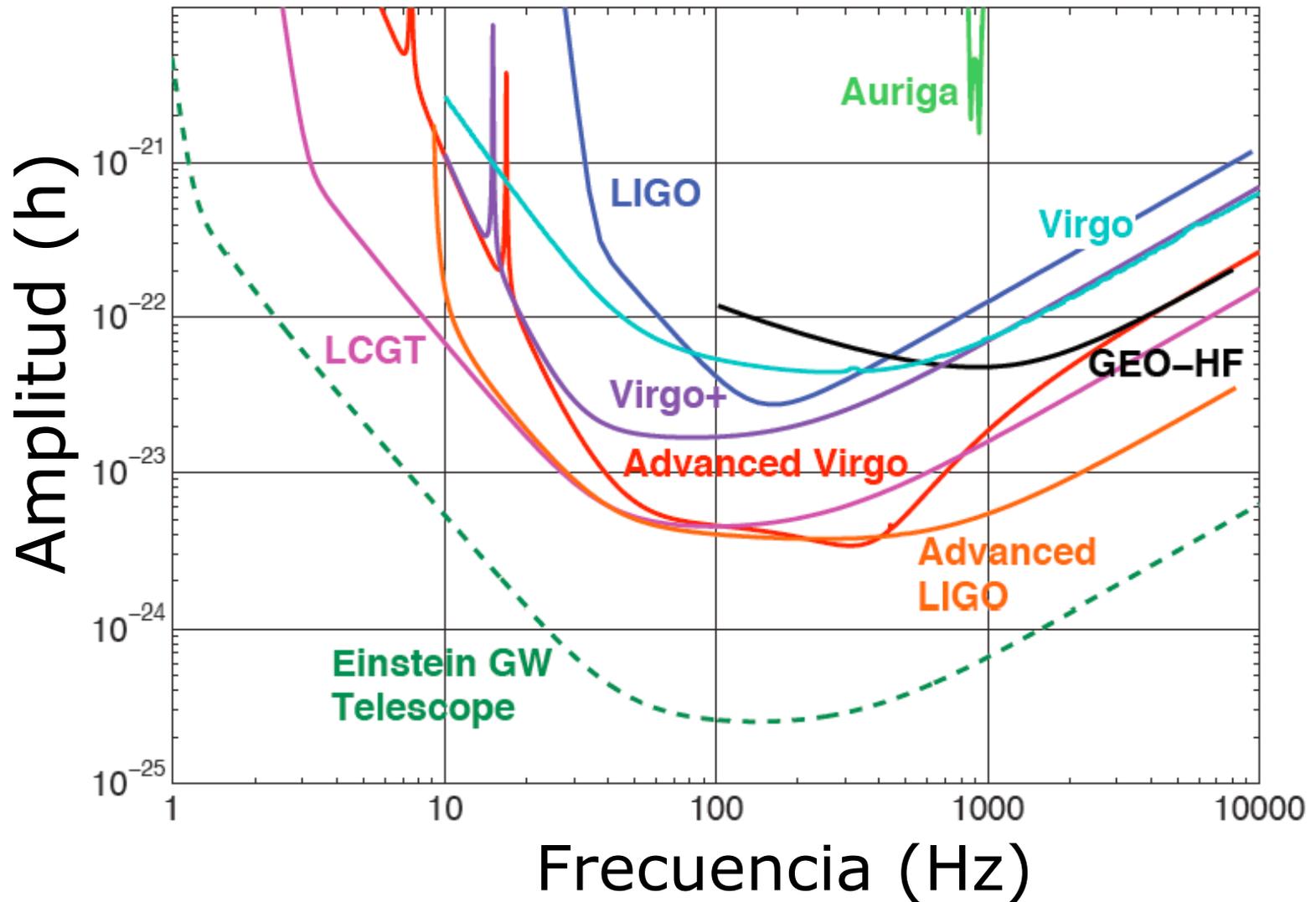
Einstein Telescope (2025+)



Detector de **tercera generación** (posterior a aLIGO, AdV y KAGRA). Estudio de diseño conceptual financiado por la UE.

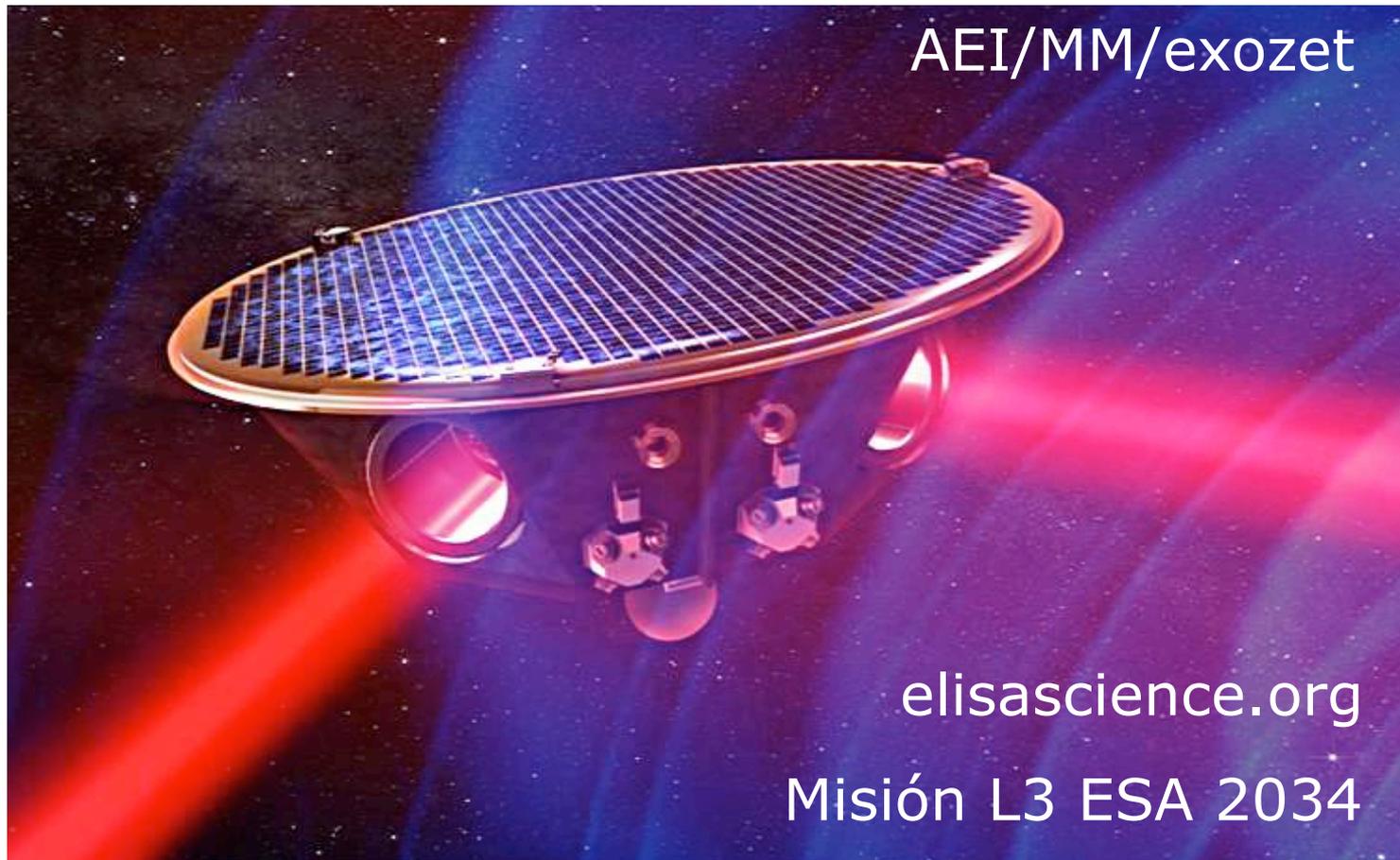


Localización no decidida. Esencial reducir ruido sísmico entre 1-10 Hz.



Eventos / año	BNS	BH/NS	BBH
aLIGO	0.4-400	0.2-300	2-4000
ET	10^3-10^7	10^3-10^7	10^4-10^8

eLISA: Interferómetro espacial (2034)



Una nave "Madre" y dos naves "Hijas" orbitando el Sol en configuración triangular.

Satélites separados 1 millón de kms y conectados por rayos láser formando los brazos de un interferómetro de alta precisión.

LISA Pathfinder (2015)



Objetivo: situar dos masas prueba en caída libre casi perfecta y controlar movimiento relativo con una precisión sin precedentes. El entorno de las masas prueba será el lugar mas quieto del Sistema Solar. Participación española (IEEC).

Lanzamiento **2/12/2015** cohete VEGA (Kourou, Guayana francesa).



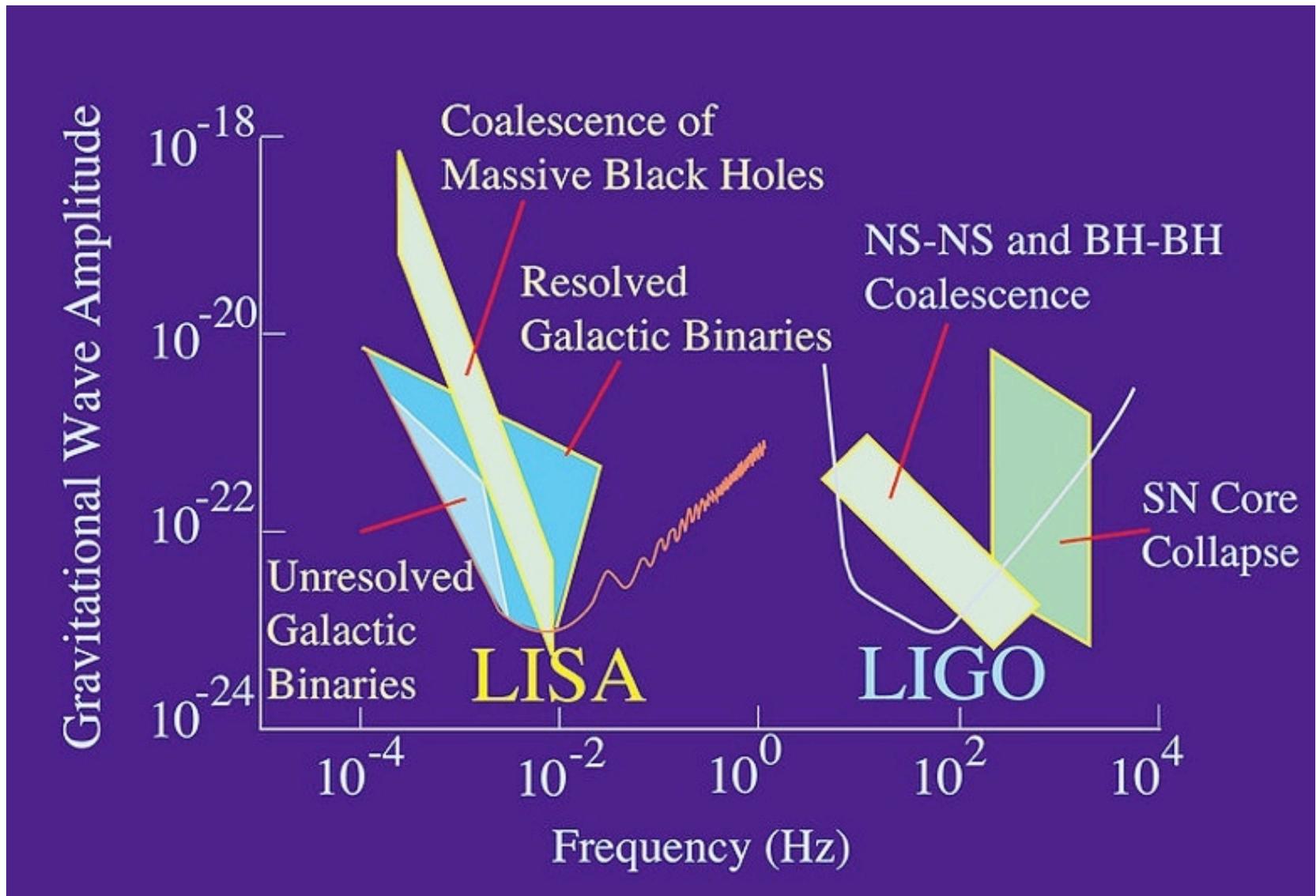
Date: 09 October 2015

Satellite: LISA Pathfinder

Location: S5C building, Centre Spatial Guyanais, Kourou, French Guiana

Copyright: ESA-CNES-Arianespace / Optique Vidéo du CSG - G. Barbaste

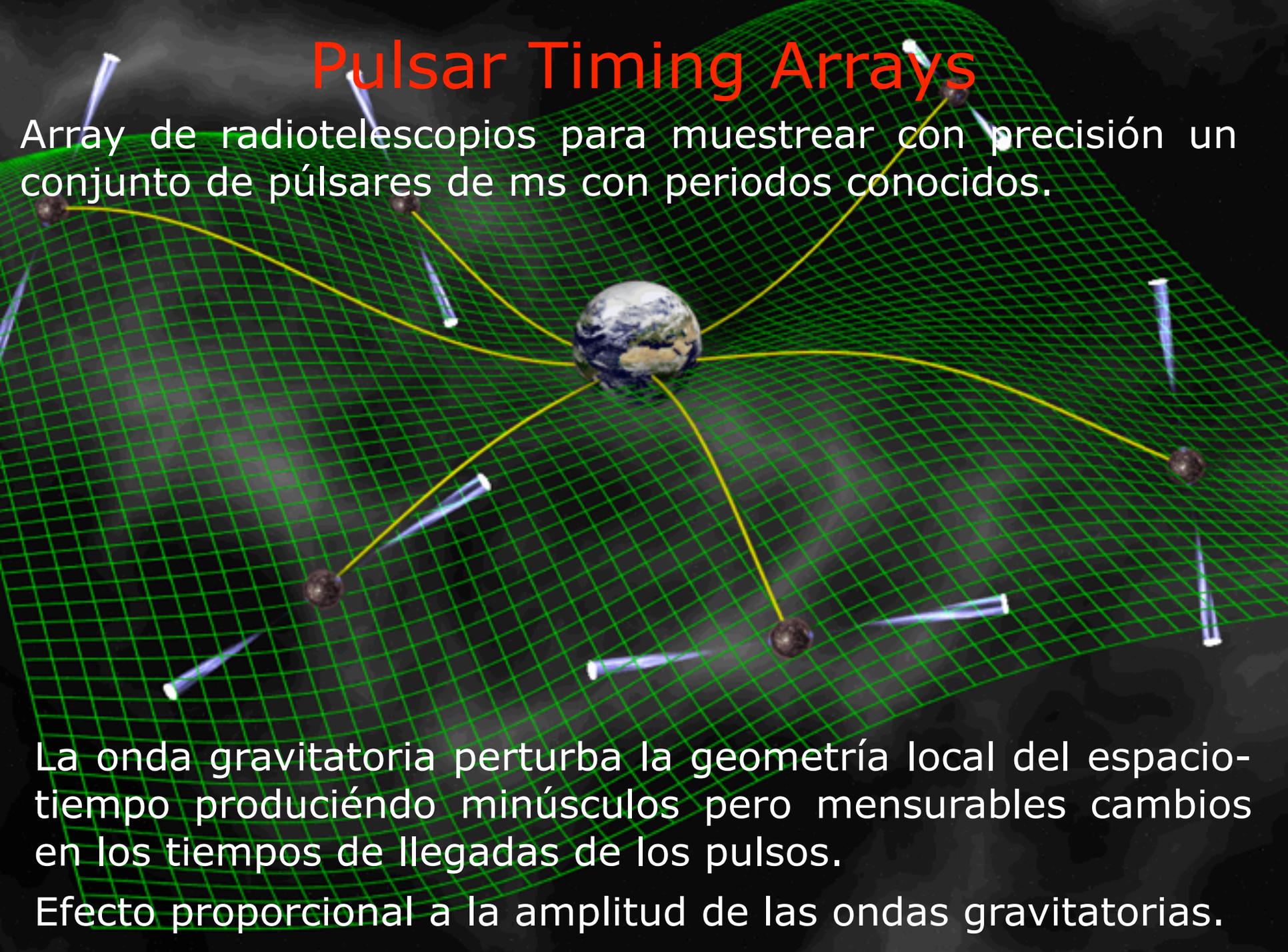
Lanzamiento 2/12/2015



eLISA sensible a bajas frecuencias (0.1 mHz – 0.1 Hz) debido al gran tamaño del interferómetro y a la ausencia de ruido sísmico. Frecuencias no accesibles a interferómetros terrestres.

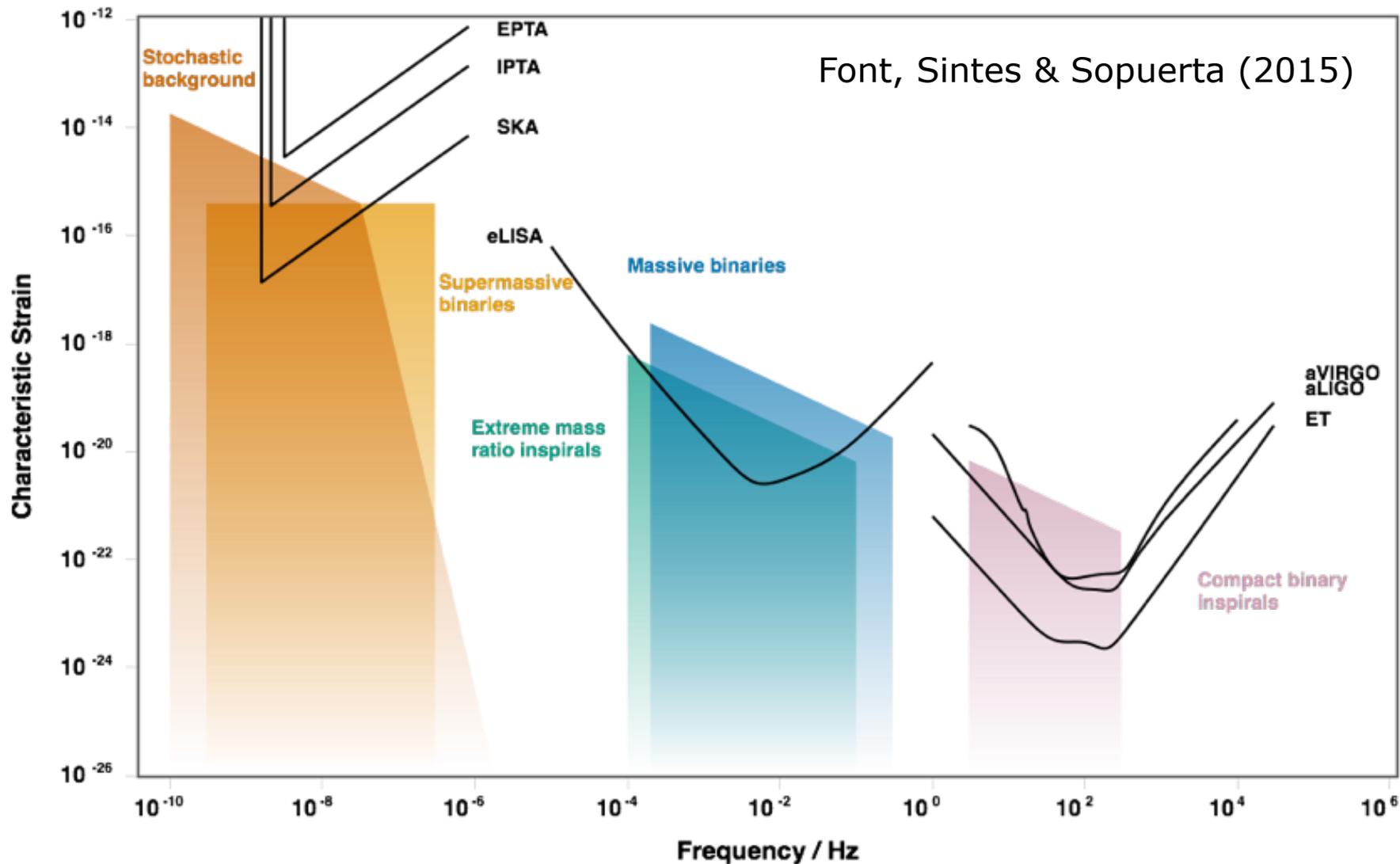
Pulsar Timing Arrays

Array de radiotelescopios para muestrear con precisión un conjunto de púlsares de ms con periodos conocidos.



La onda gravitatoria perturba la geometría local del espacio-tiempo produciendo minúsculos pero mensurables cambios en los tiempos de llegadas de los pulsos.

Efecto proporcional a la amplitud de las ondas gravitatorias.



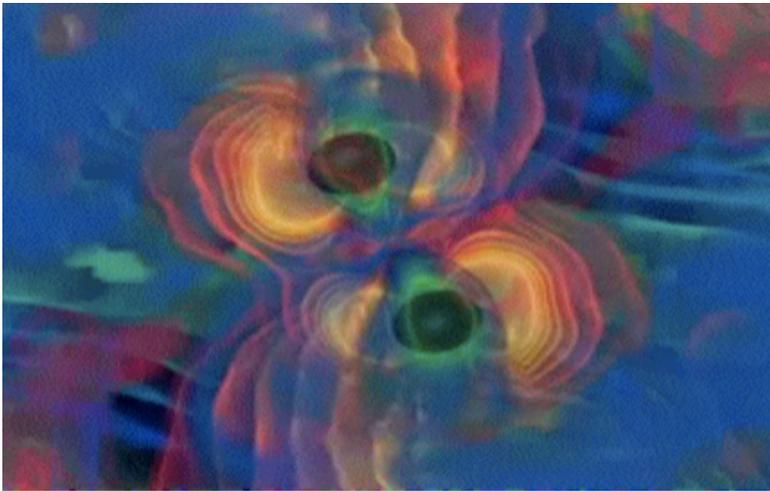
Curvas de sensibilidad de los proyectos PTA (EPTA, IPTA, y SKA), el interferómetro espacial eLISA y los interferómetros terrestres LIGO y VIRGO. Cubren bandas de frecuencias complementarias.

Conclusiones

Einstein predijo la existencia de la radiación gravitatoria. Casi 100 años después su "sinfonía gravitatoria" permanece inacabada ...

Grandes esfuerzos teóricos (relatividad numérica) y experimentales (interferómetros terrestres y espaciales) para su detección.

simulación



detección



Con la puesta en marcha de detectores de ondas gravitatorias (terrestres y en el espacio), el siglo XXI va a asistir al nacimiento de la **astronomía de ondas gravitatorias: nueva ventana al universo.**