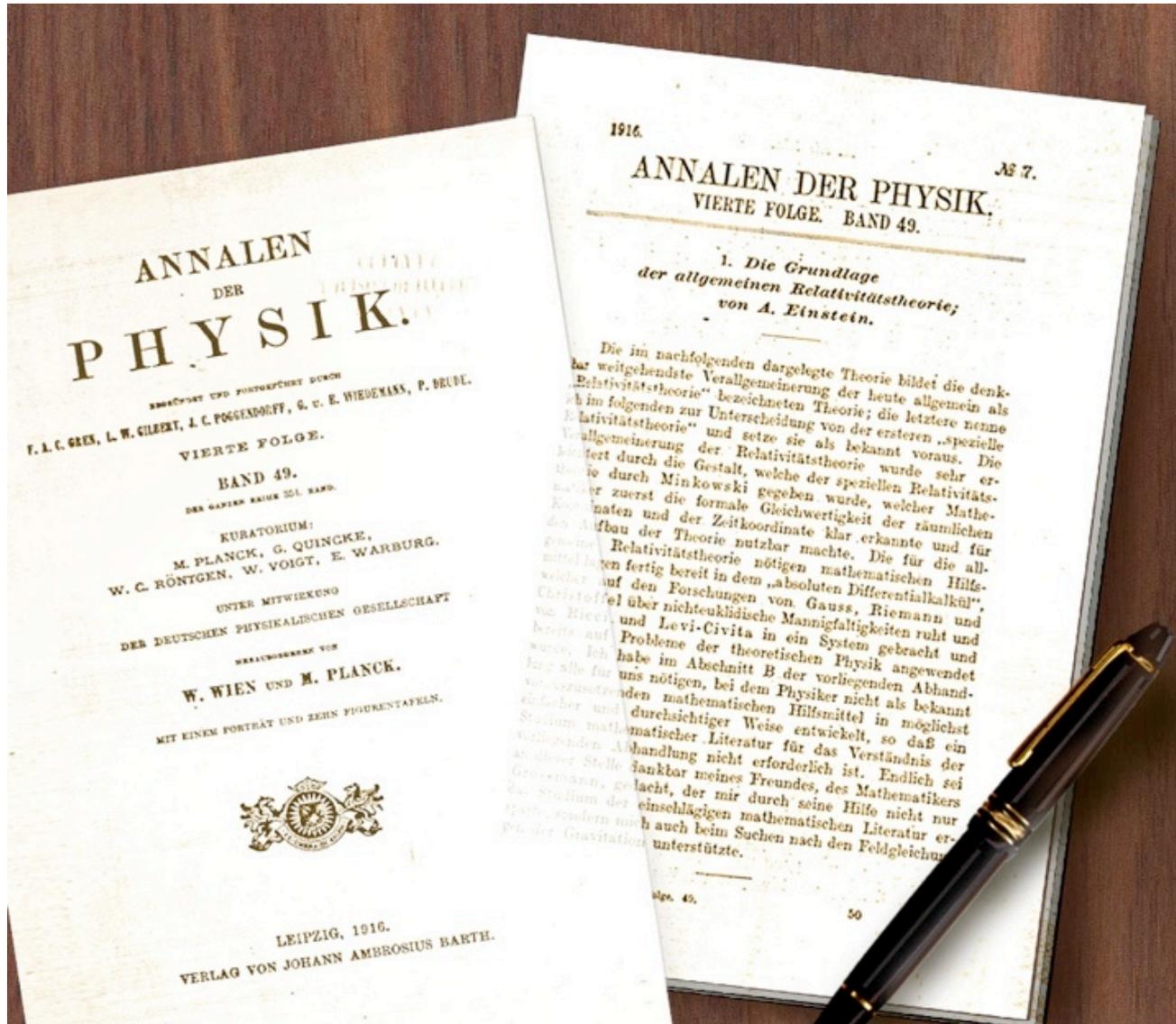


A lomos de las olas del espacio-tiempo



José Antonio Font
Universitat de València

La existencia de la radiación gravitatoria fue predicha por Einstein hace casi 100 años ...



Hace 2 años impartí una charla parecida en este ciclo.

Conceptos básicos / generación / detección

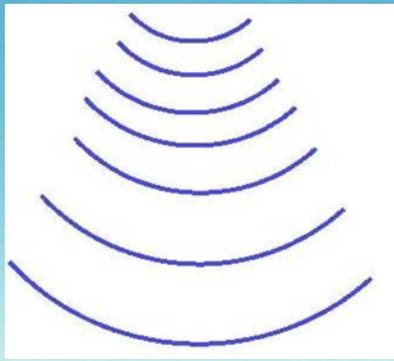
¿Ha cambiado algo desde entonces en el campo?

Fundamentalmente, avances tecnológicos.

¿Se han detectado las ondas gravitatorias?

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

Los expertos en la detección afirman que ocurrirá antes del final de la presente década ...



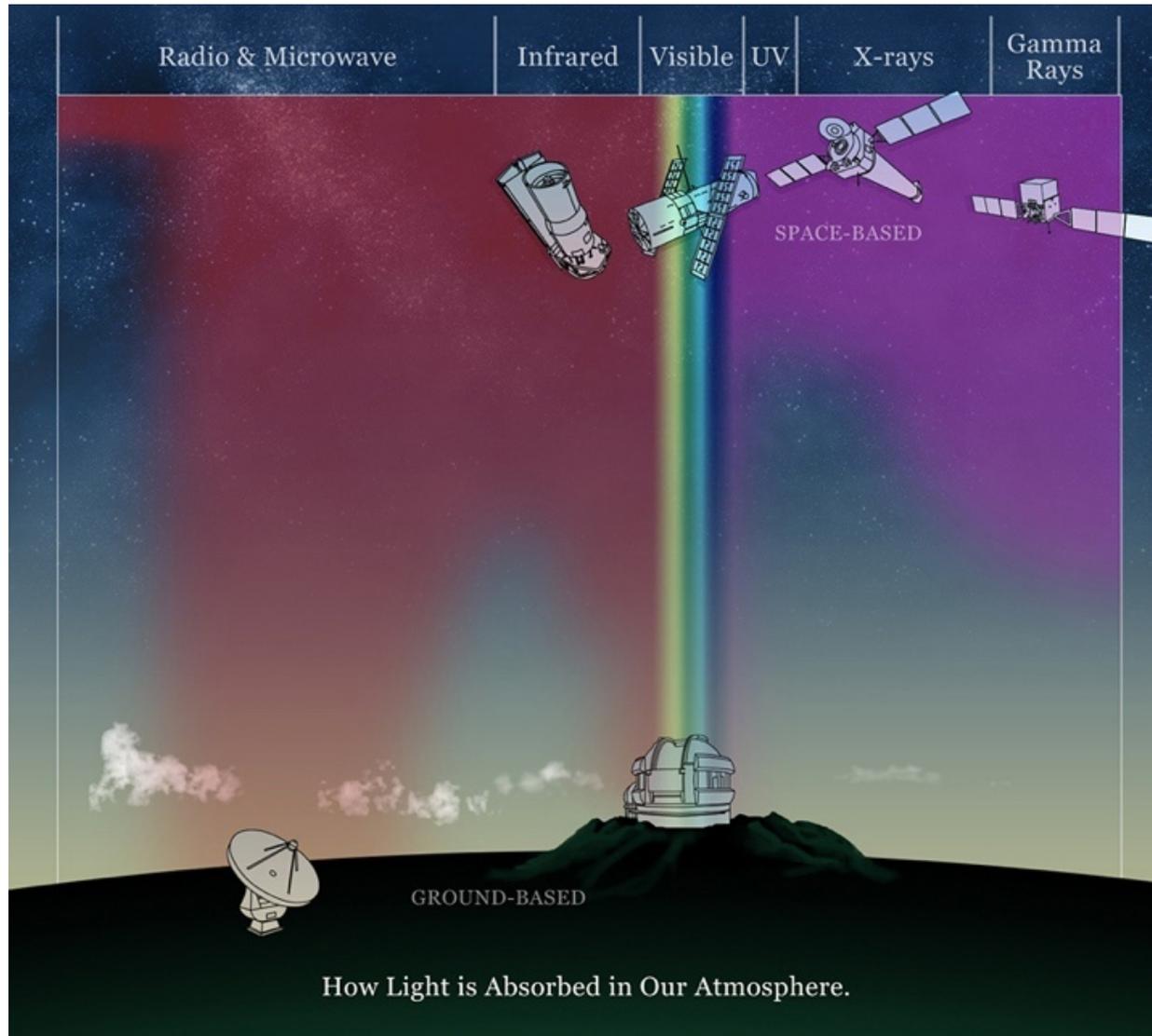
Detector Virgo

Una **onda** es una propagación de una perturbación de alguna propiedad de un medio, por ejemplo, la densidad, la presión o el campo eléctrico, que se propaga a través del espacio transportando energía.

Dicha propagación se puede describir matemáticamente mediante una ecuación diferencial: **ecuación de ondas.**

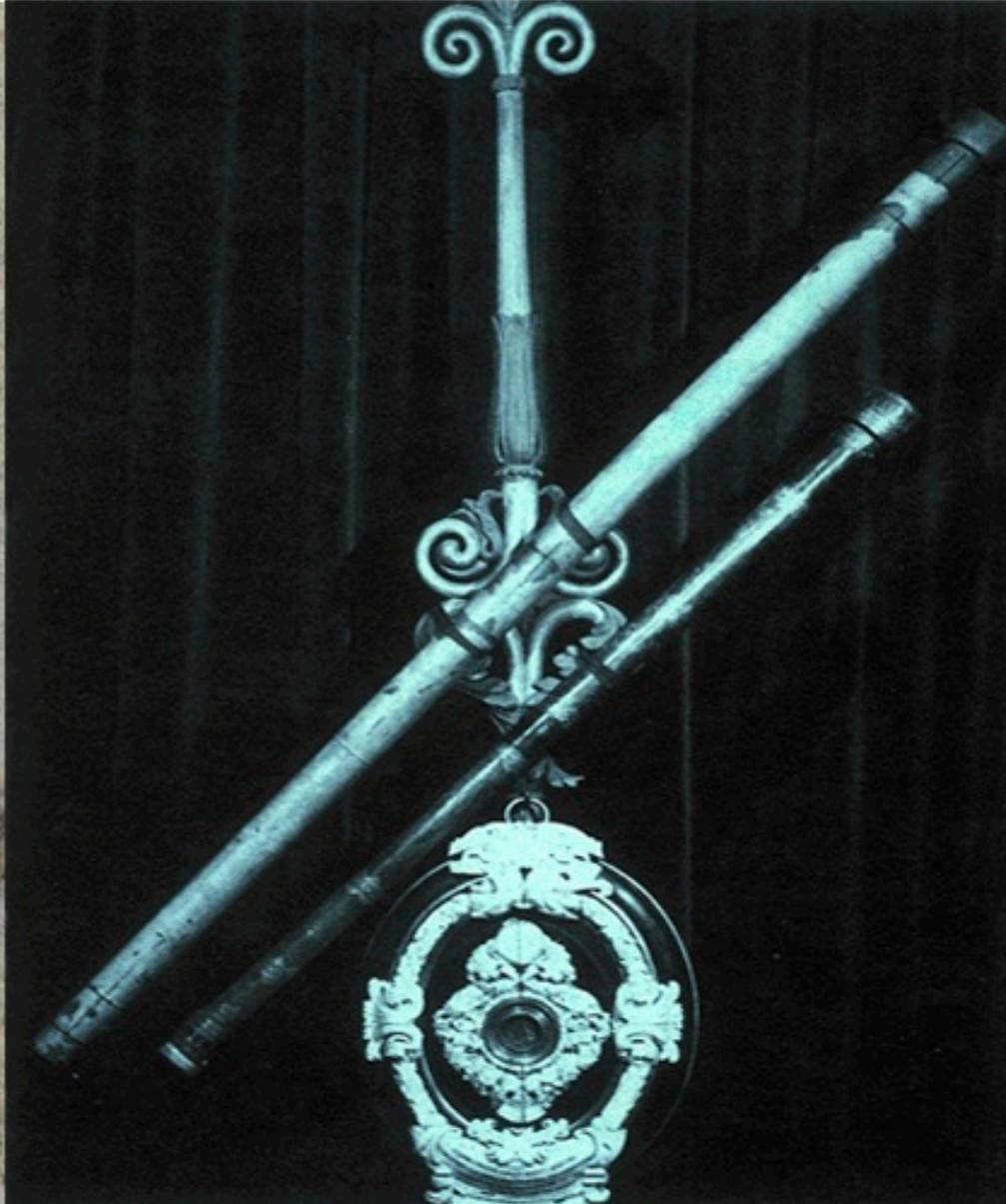
Las **ondas electromagnéticas** nos permiten reconocer el Universo visible - interacción materia y radiación.

Espectro electromagnético



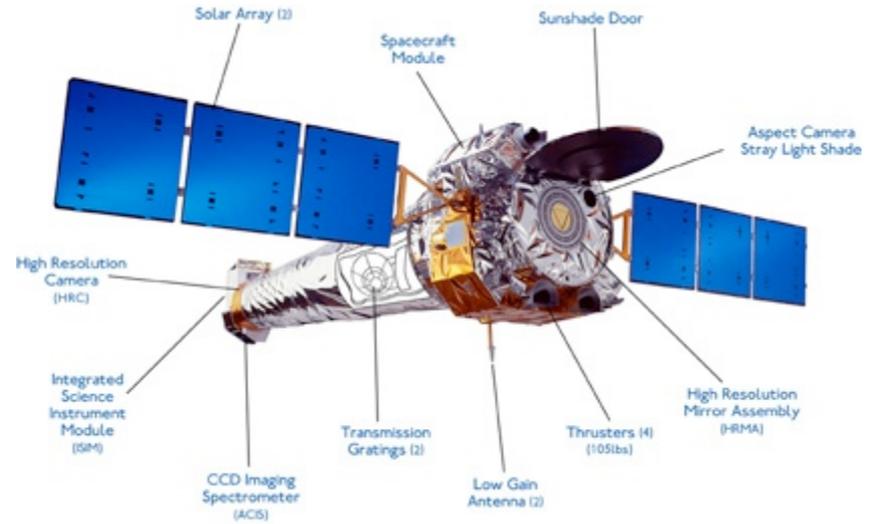
NASA/CXC/
M. Weiss

Telescopio de Galileo (1609)





Telescopios Keck (Hawaii, USA)



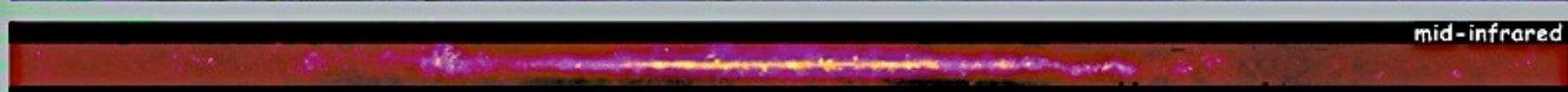
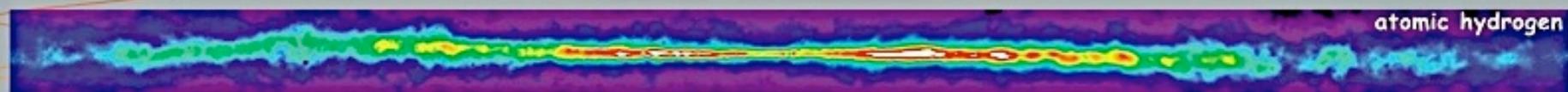
Chandra X-ray Observatory



Very Large Array (NM, USA)



Hubble Space Telescope



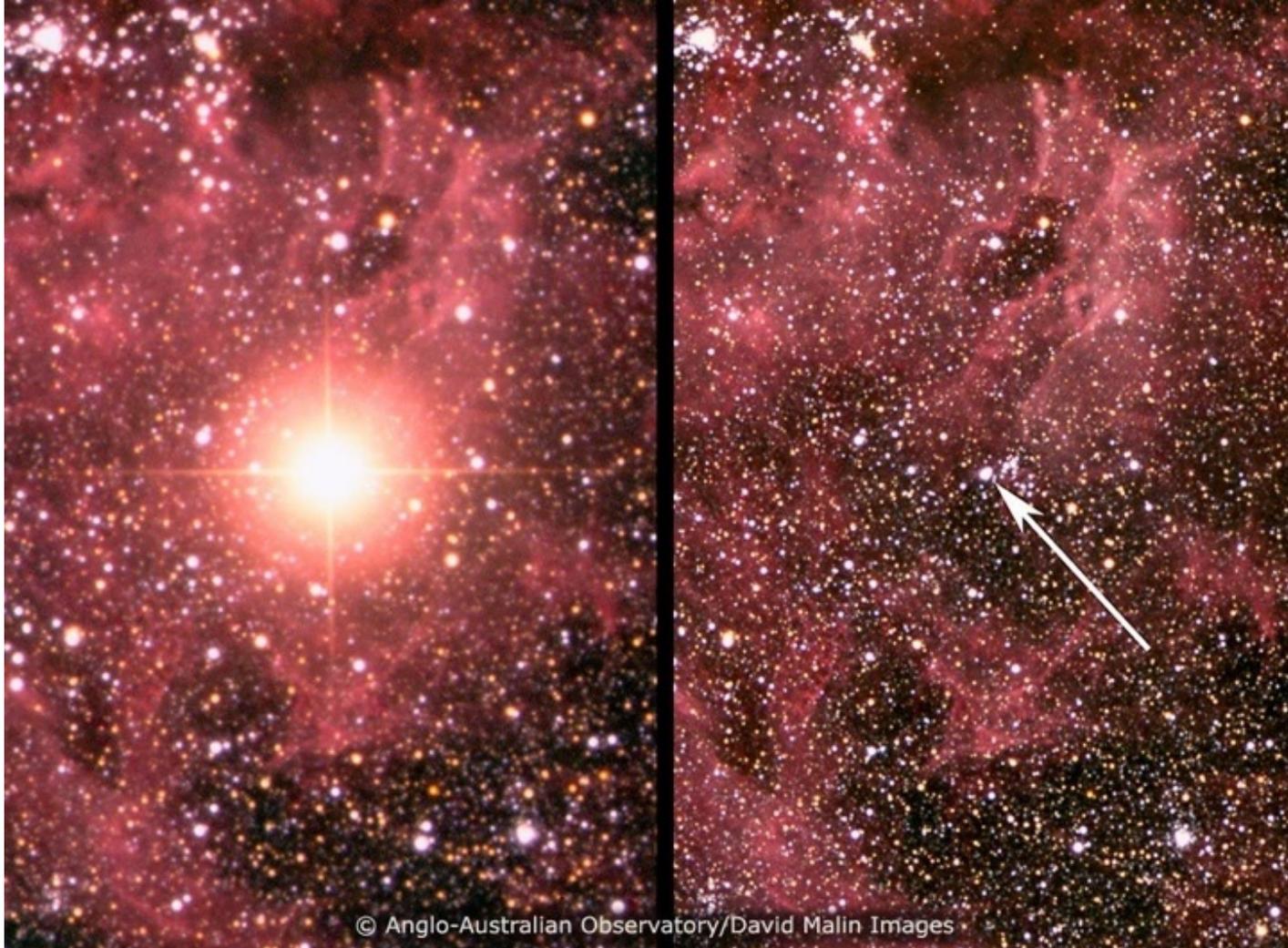
<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



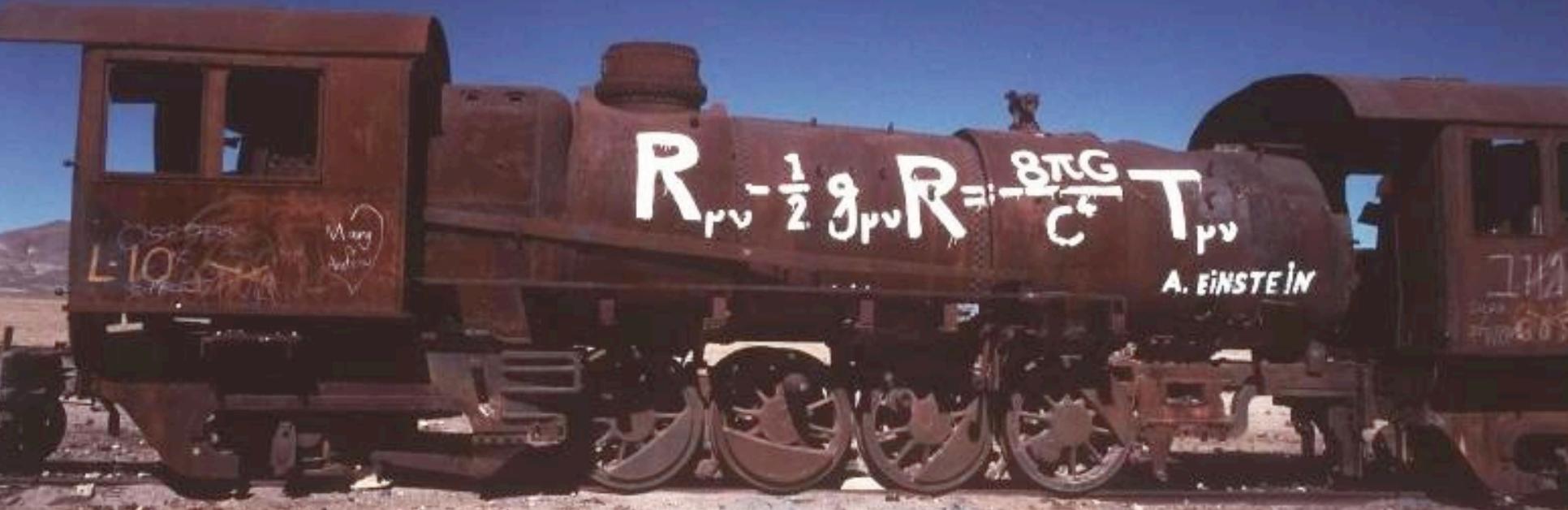
Multiwavelength Milky Way

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

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



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.

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

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



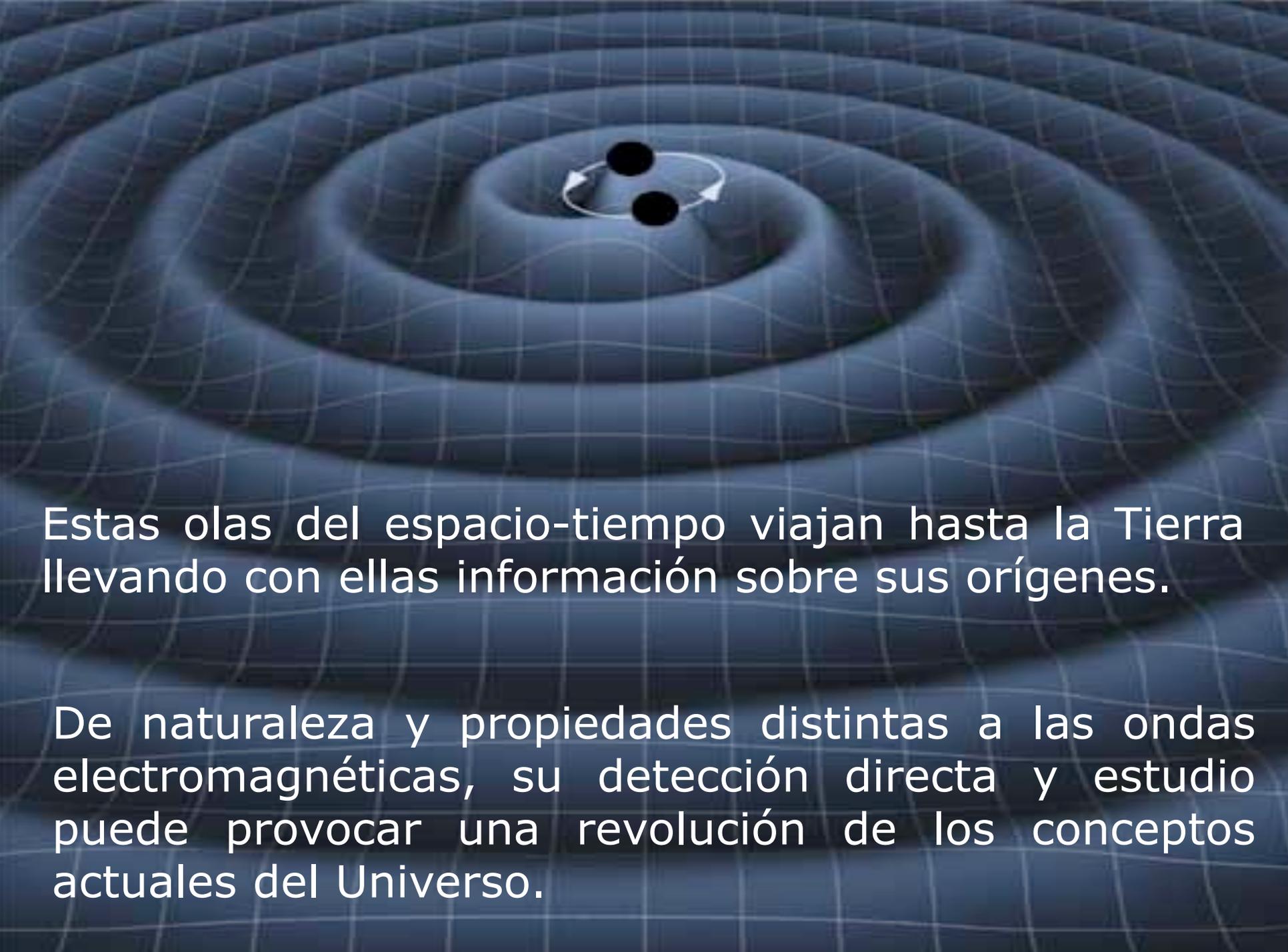
Operador diferencial
(de D'Alembert)

(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.

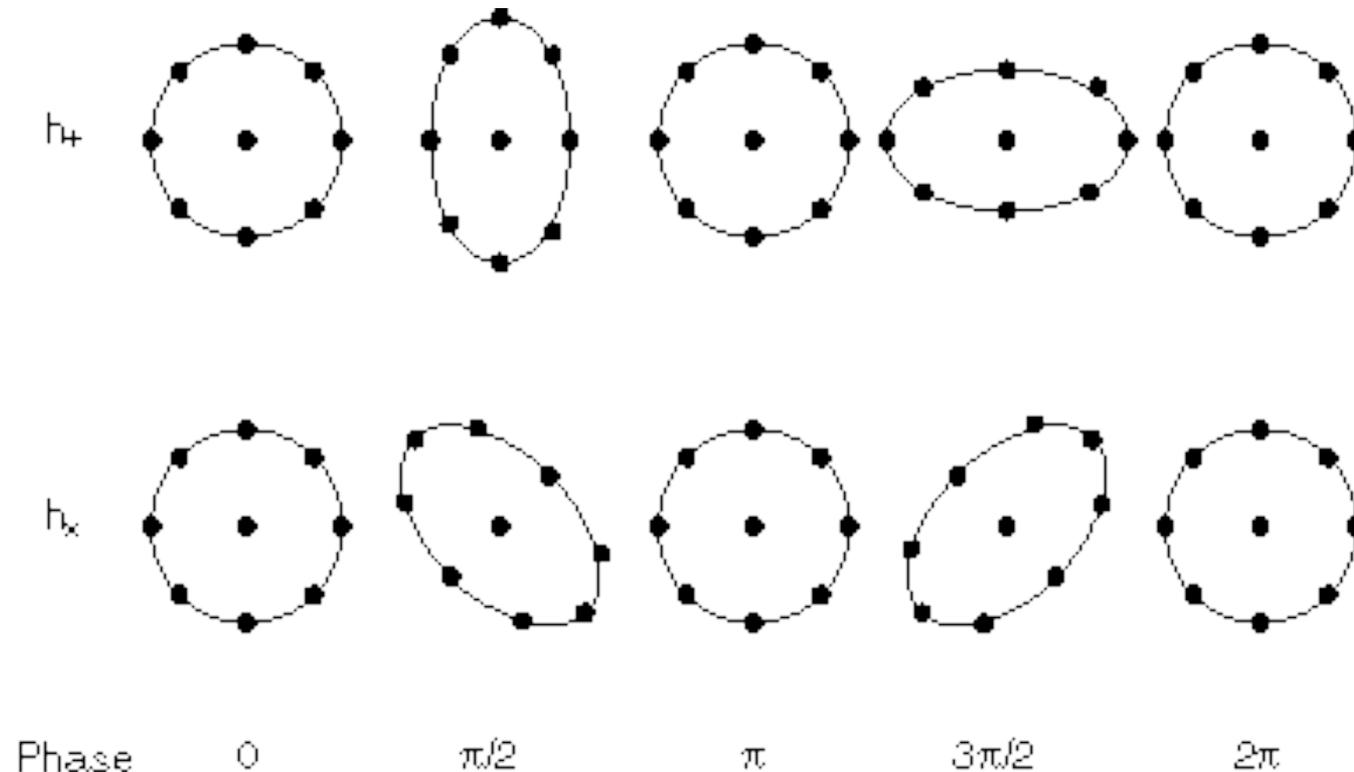


Estas olas del espacio-tiempo viajan hasta la Tierra llevando con ellas información sobre sus orígenes.

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.



	Ondas electromagnéticas	Ondas gravitatorias
Medio	Espacio	Espacio-tiempo
Fuente	Superposición incoherente de átomos y moléculas	Movimiento coherente de grandes masas
Resolución	λ pequeña comparada con la fuente	$\lambda \geq$ tamaño de la fuente
Interacción	Absorción, scattering y dispersión	Muy pequeña
Frecuencia	$\geq 10^7$ Hz (luz visible $\sim 10^{11}$ Hz)	$\leq 10^4$ Hz (*)
Detección	Detectores direccionales	Detectores de banda ancha

(*) rango de la percepción humana de las ondas sonoras !!

Estimaciones

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

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

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.

Órdenes de magnitud

Luminosidad gravitatoria: energía extraída de un sistema mediante ondas gravitatorias por unidad de tiempo.

$$\mathcal{L} \sim \frac{G}{c^5} \text{ (variación momento cuadrupolar)}$$

Ejemplo 1: sea una barra de masa M y longitud l girando en el plano xy alrededor de su punto medio en el eje z con velocidad angular w . Su luminosidad gravitatoria viene dada por:

$$\mathcal{L} = \frac{128}{45} \frac{G}{c^5} M^2 l^4 w^6$$

En la situación más ventajosa - una barra de Berilio girando a la mayor velocidad posible: $w \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$, $l \sim 1700 \text{ cm}$ y $M \sim 6 \times 10^{10} \text{ g}$, se obtiene **$\mathcal{L} \sim 10^{-7} \text{ erg/s} = 10^{-14} \text{ W}$** .

Generar radiación gravitatoria detectable en el laboratorio es imposible.

Ejemplo 2: sea una fuente astrofísica de masa M y tamaño característico R .

Expresando la masa de la fuente en términos de su *radio de Schwarzschild*, R_S (el menor radio posible que tendría la fuente para ser un agujero negro), e introduciendo una velocidad característica, v , la luminosidad gravitatoria es:

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

Así, **fuentes astrofísicas compactas** ($R \sim R_S$), con altas velocidades ($v \sim c$) y **alta excentricidad** ($\varepsilon \sim 1$) **son las que emiten mayor cantidad de radiación gravitatoria.**

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

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

Frecuencia de las ondas gravitatorias

Una **estimación** simple del límite superior de la frecuencia de las ondas gravitatorias puede obtenerse por cálculo dimensional considerando que:

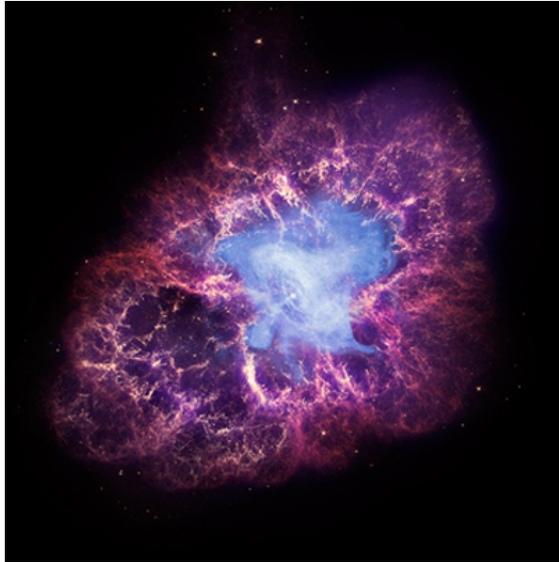
- la fuente astrofísica no puede ser más compacta que su *radio de Schwarzschild*.
- no puede emitir en periodos más cortos que el tiempo que tarda la luz en recorrer su circunferencia.

$$f \leq \frac{c^3}{4\pi GM} \sim 10^4 \text{ Hz} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1}$$

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.

Evidencia experimental

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**

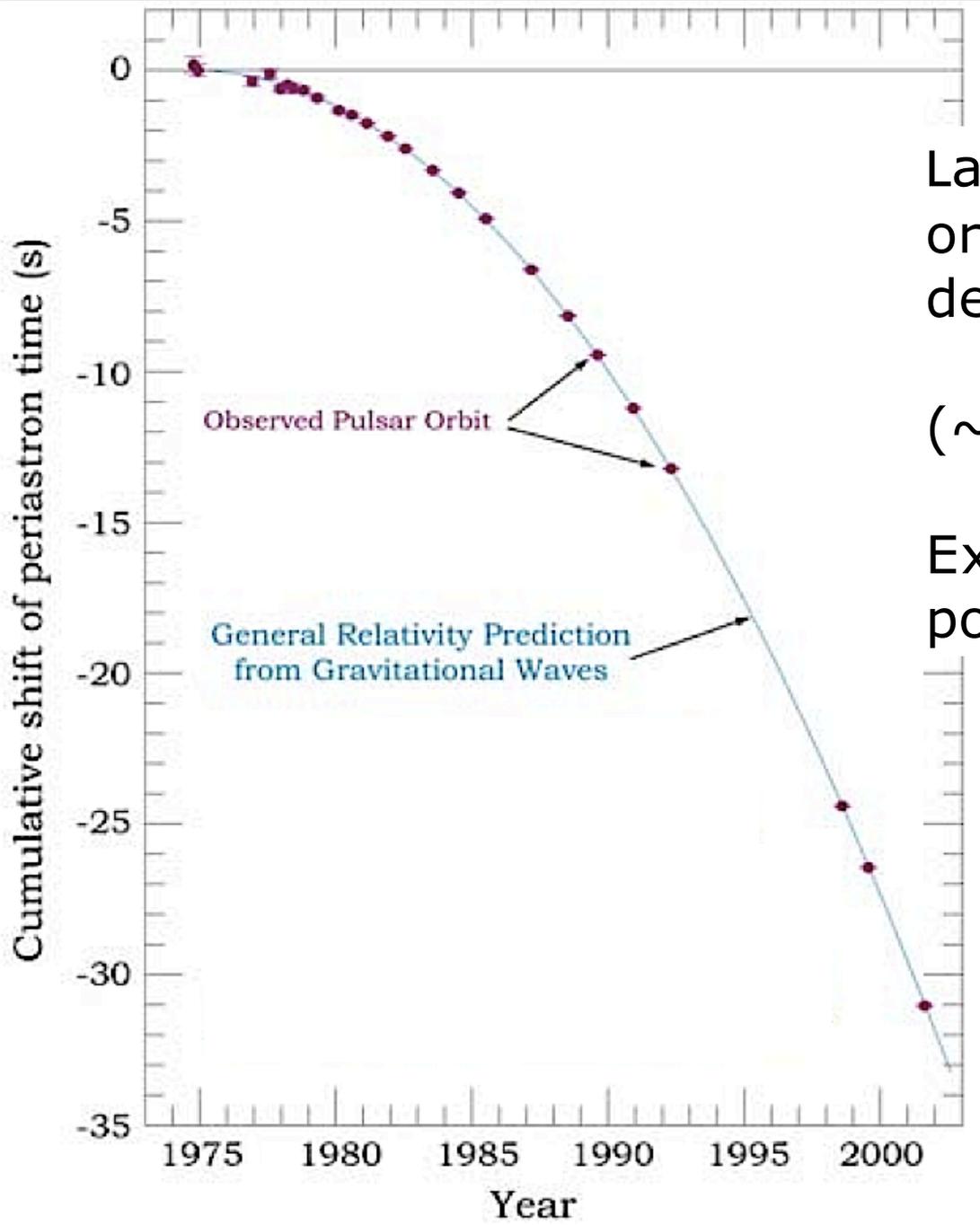
El primer púlsar binario, **PSR1913+16**, fue descubierto por los radio-astrónomos Russell Hulse y Joseph Taylor en 1974.



Hulse



Taylor

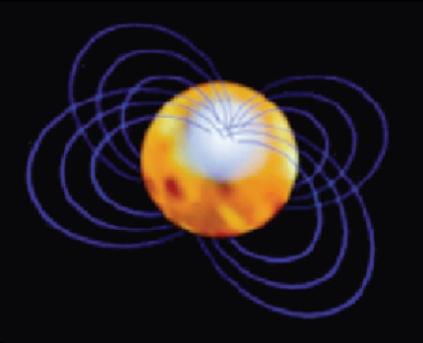


La disminución del periodo orbital en PSR1913+16 es de $\sim 10 \mu\text{s}$ por año

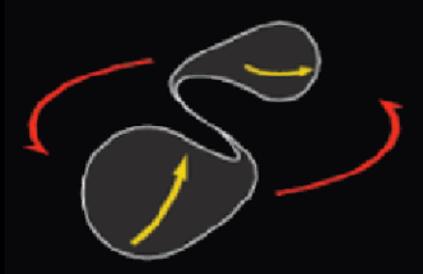
($\sim 3.1 \text{ mm}$ por vuelta).

Exactamente el predicho por la Relatividad General.

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



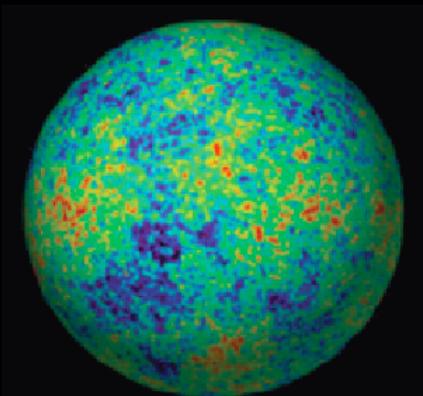
Fuentes continuas: estrellas de neutrones en rotación y púlsares. Señal periódica.



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

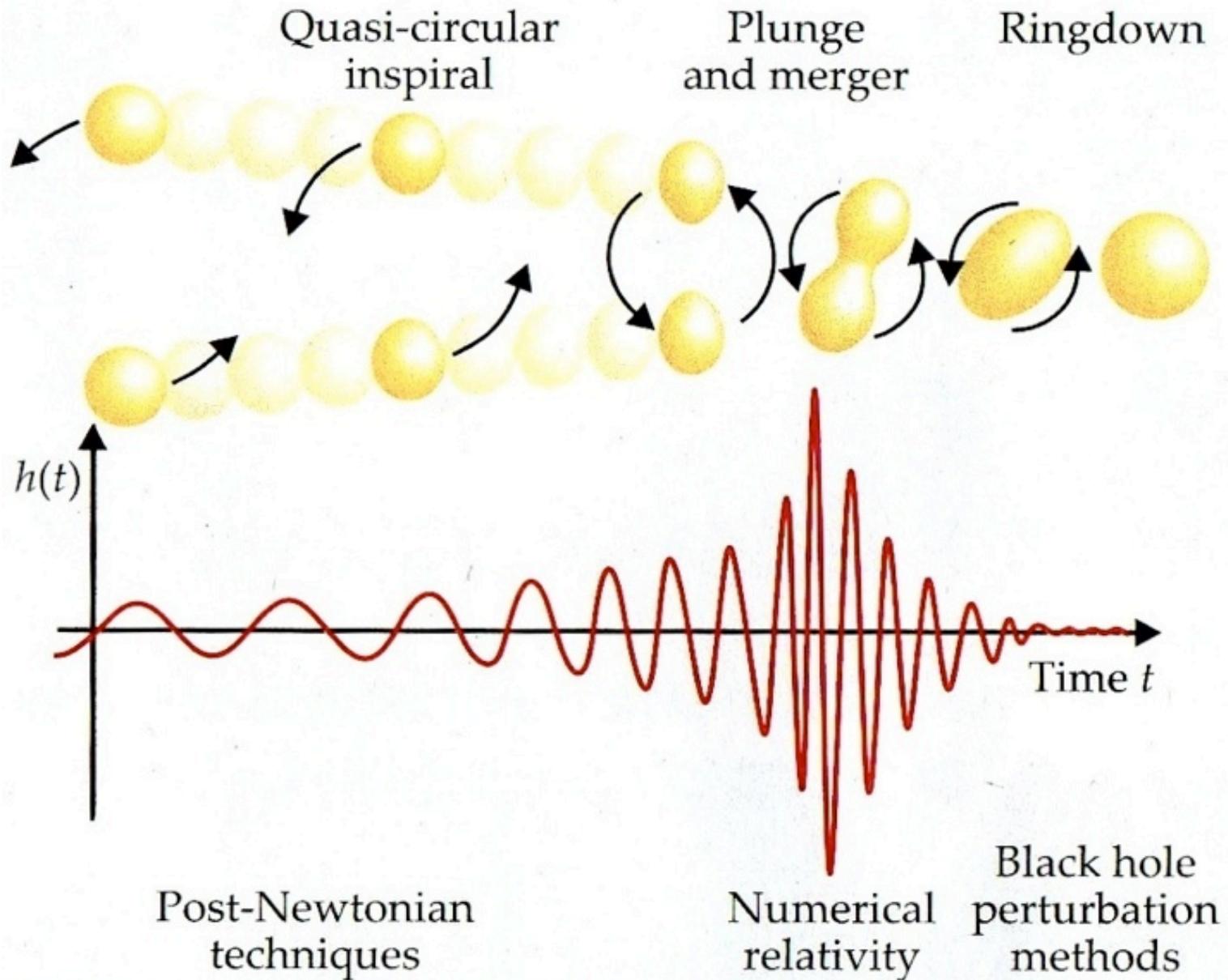


Erupciones breves: supernovas, fuentes transitorias no modelizadas. Señal tipo "burst".



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

Colisión de binarias compactas

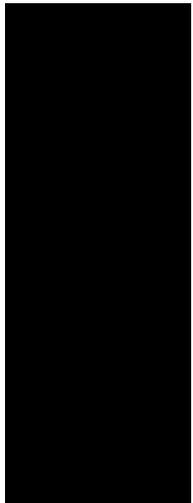


Superordenador “Mare Nostrum” BSC

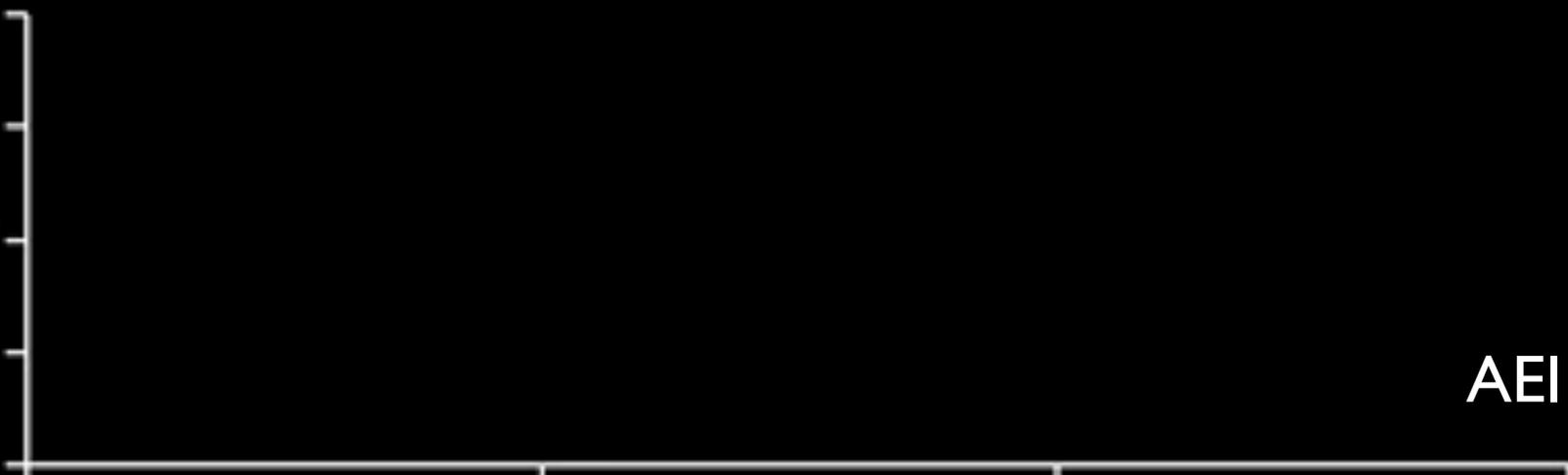
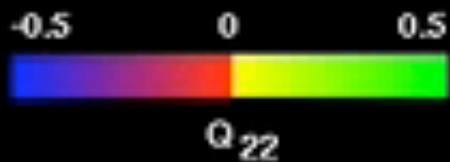
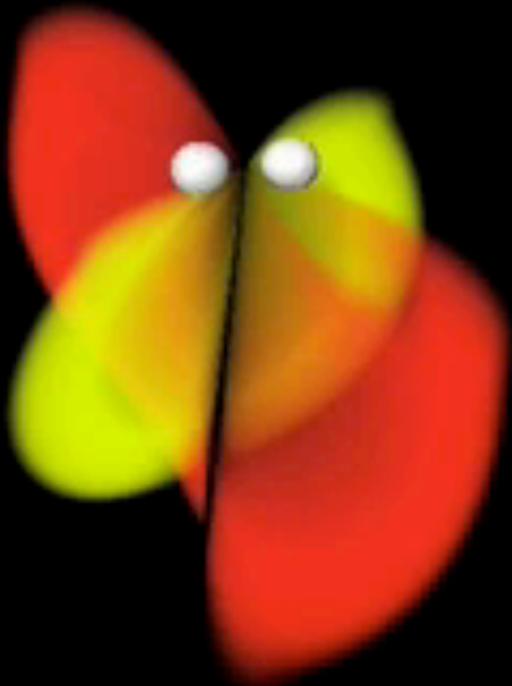
www.bsc.es

(#5 en Noviembre de 2006)





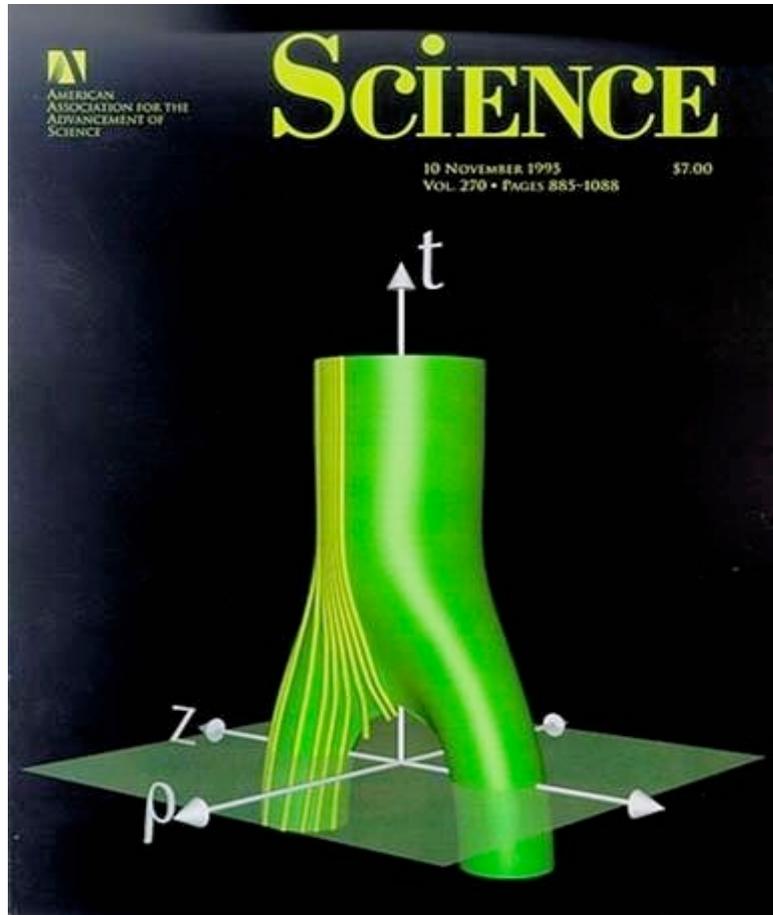
(A, E)



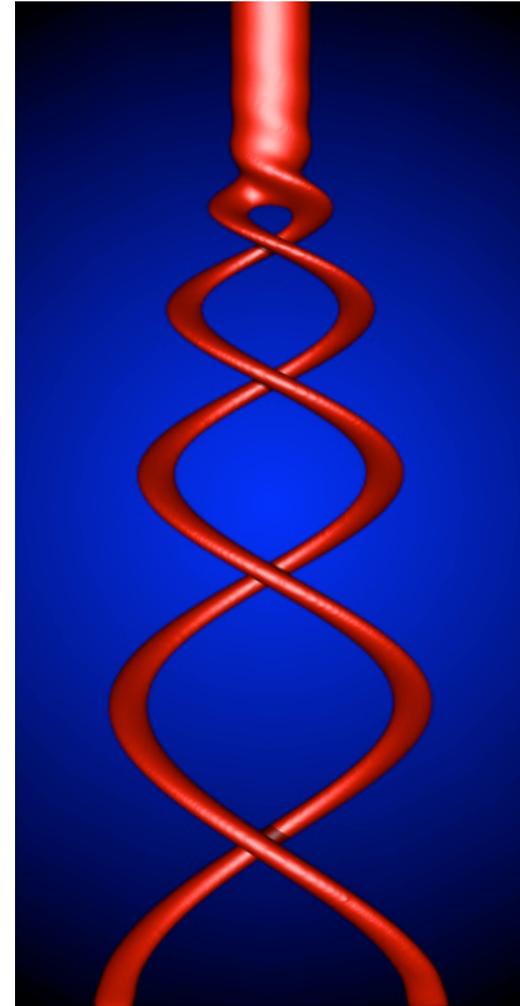
AEI

Colisión de dos agujeros negros

1995: Pair of pants
(Head-on collision)



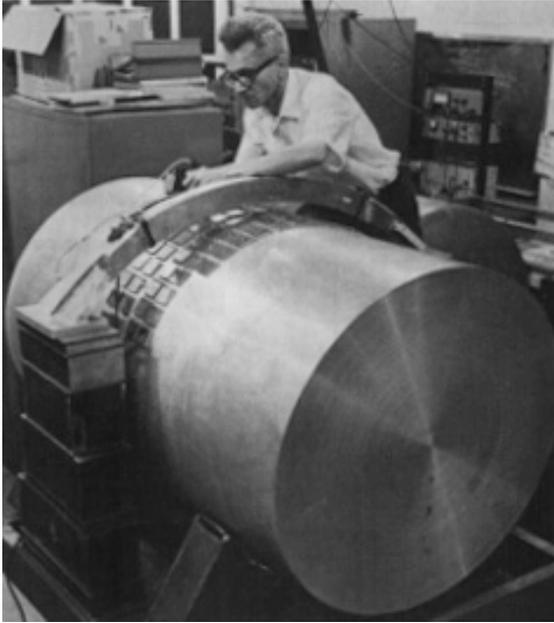
BBH Grand Challenge Alliance



FSU-Jena Numerical Relativity Group

2007: Pair of twisted pants
(spiral & merge)

Primeros detectores de ondas gravitatorias: barras resonantes



Joseph Weber (University of Maryland)

En los **años 60** Weber diseñó un detector basado en la acción de fuerzas de marea sobre **barras resonantes de aluminio** (1-2 ton), a temperatura ambiente y aisladas de vibraciones del suelo y ruido acústico en el laboratorio.

Observó excitaciones coincidentes en detectores separados ~ 1000 km. Resultados no confirmados por similares experimentos en EE.UU., Alemania, Reino Unido y Rusia.

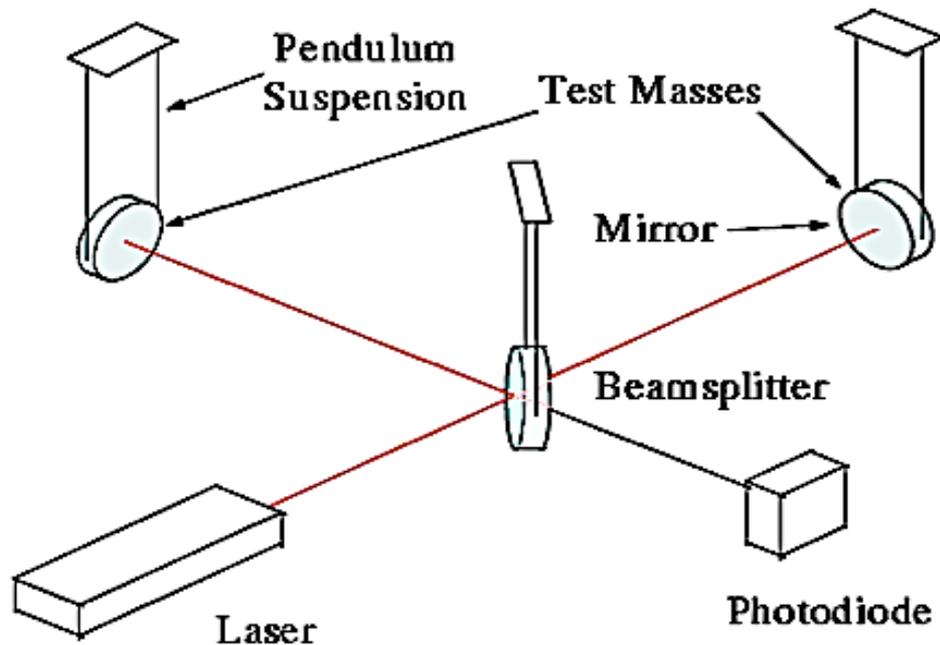
Probablemente **no detectó ondas gravitatorias** pues su detector permitía alcanzar amplitudes de tan sólo $h \sim 10^{-15}$.

Primeros pasos hacia la detección

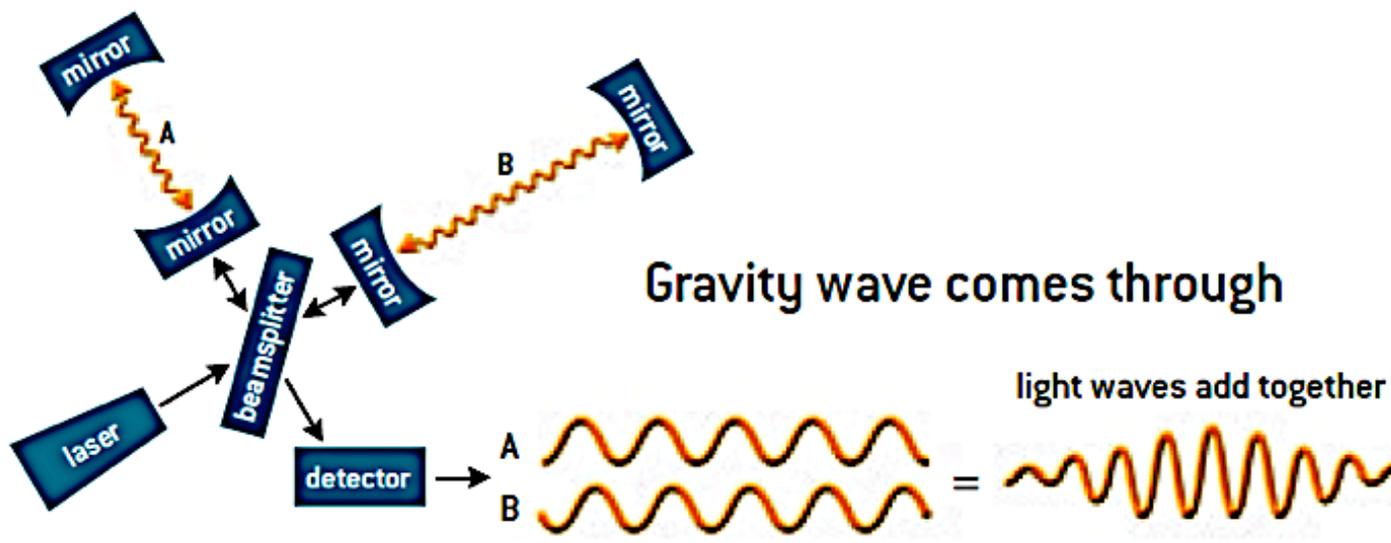
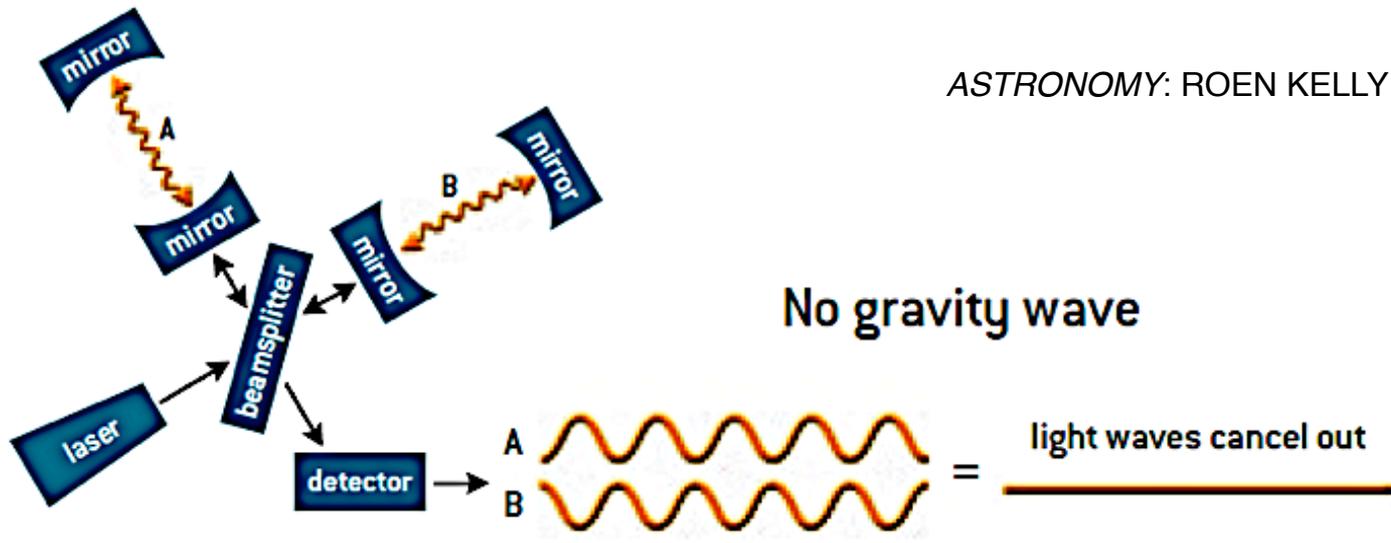
- Las barras resonantes iniciaron el campo, pero su dependencia en una resonancia a $\sim 1\text{kHz}$ limitan su tamaño físico y sensibilidad. Esferas resonantes tienen la misma limitación. Barras operativas en Roma y Legnaro, terminarán cuando aLIGO se ponga en marcha.
- El desarrollo de la tecnología adecuada para permitir a los **detectores interferométricos** detectar ondas gravitatorias ha llevado ~ 40 años. Prototipos clave en Glasgow, Garching, MIT y, más tarde, Caltech.
- Durante este tiempo los astrónomos motivaron la detección de ondas gravitatorias descubriendo **púlsares, estrellas de neutrones binarias, agujeros negros y el Big Bang.**

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.

Red Actual de Interferómetros



4 km
+2 km



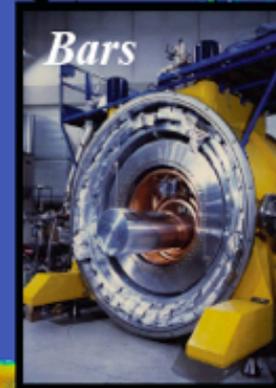
600 m



300 m
100 m

3 km

4 km



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**.

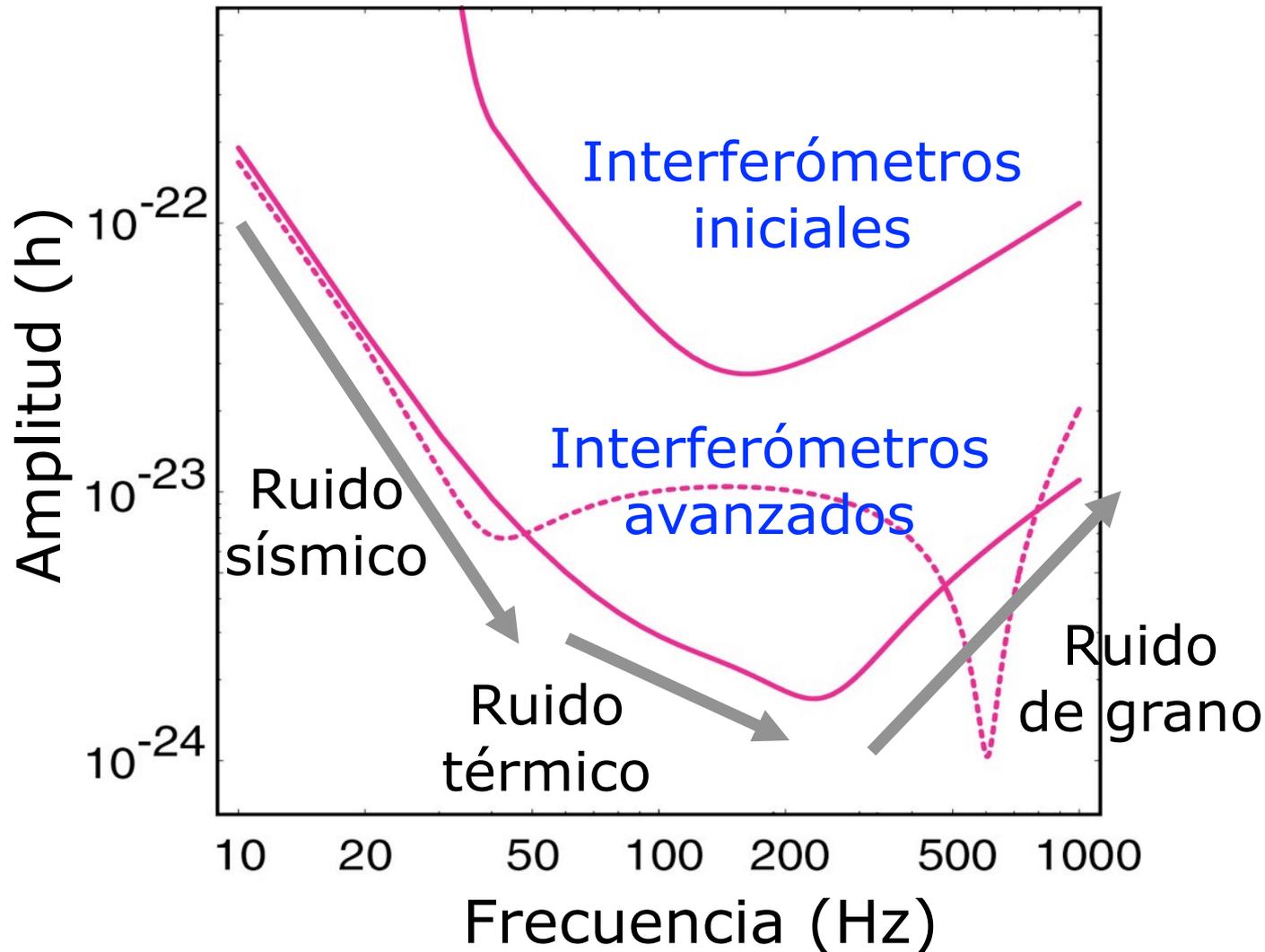
★ láser de alta potencia. **Ruido de grano**: fluctuaciones en el número de fotones en el láser originan fluctuaciones en la señal.

★ espejos altamente reflectantes.

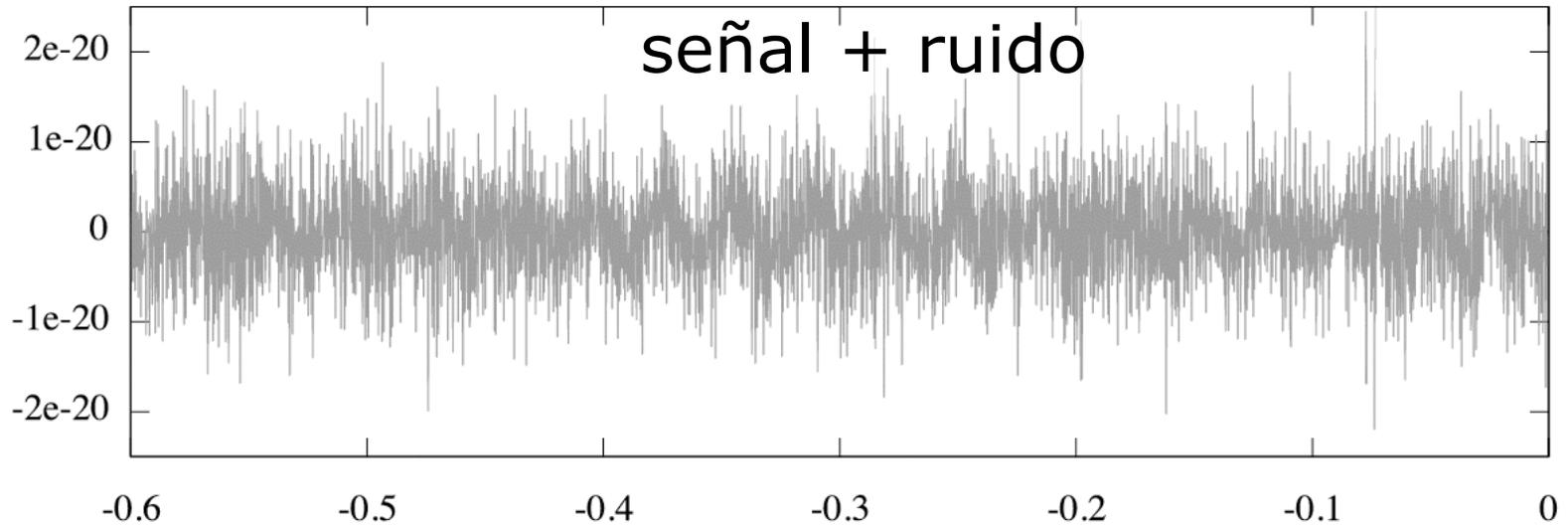
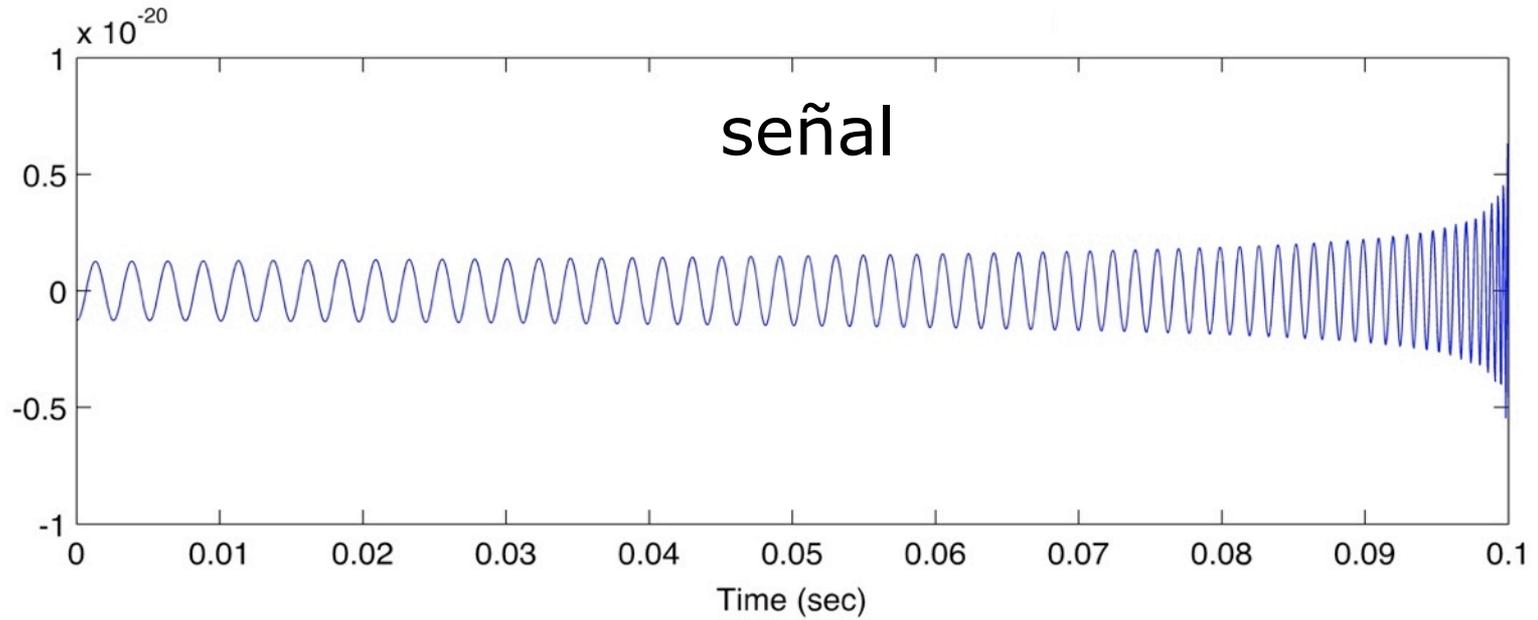
★ sistemas de suspensión monolíticos para aislar las vibraciones. Reducir el **ruido sísmico**.

Mucho ruido y poca señal

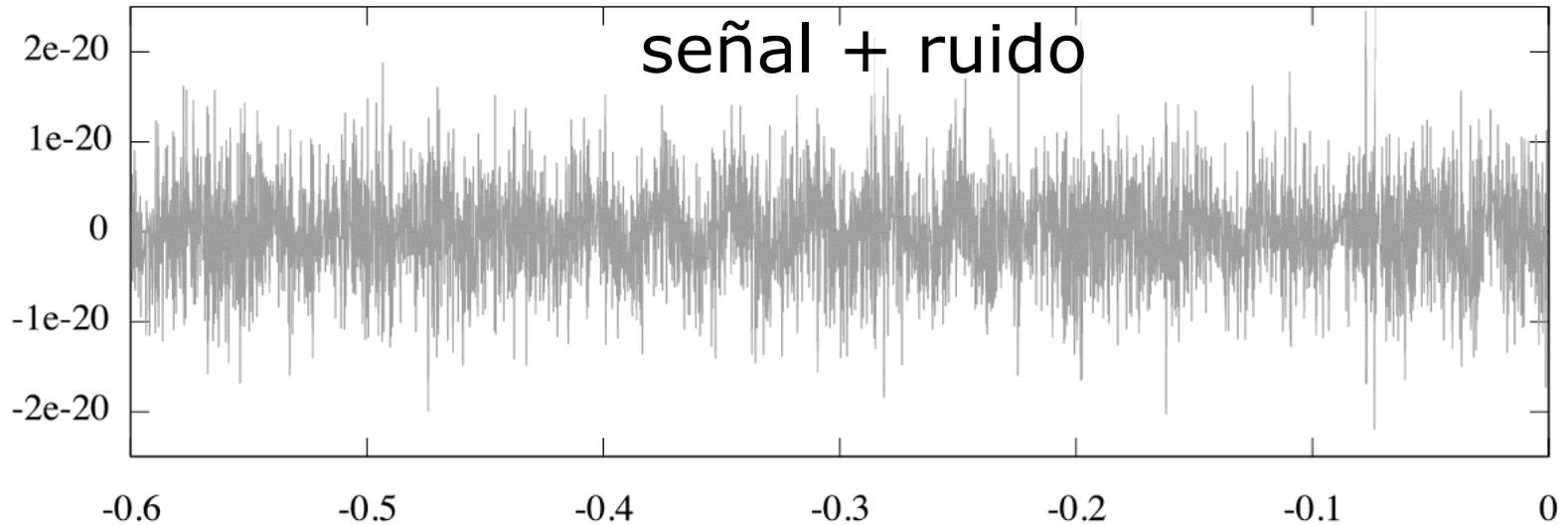
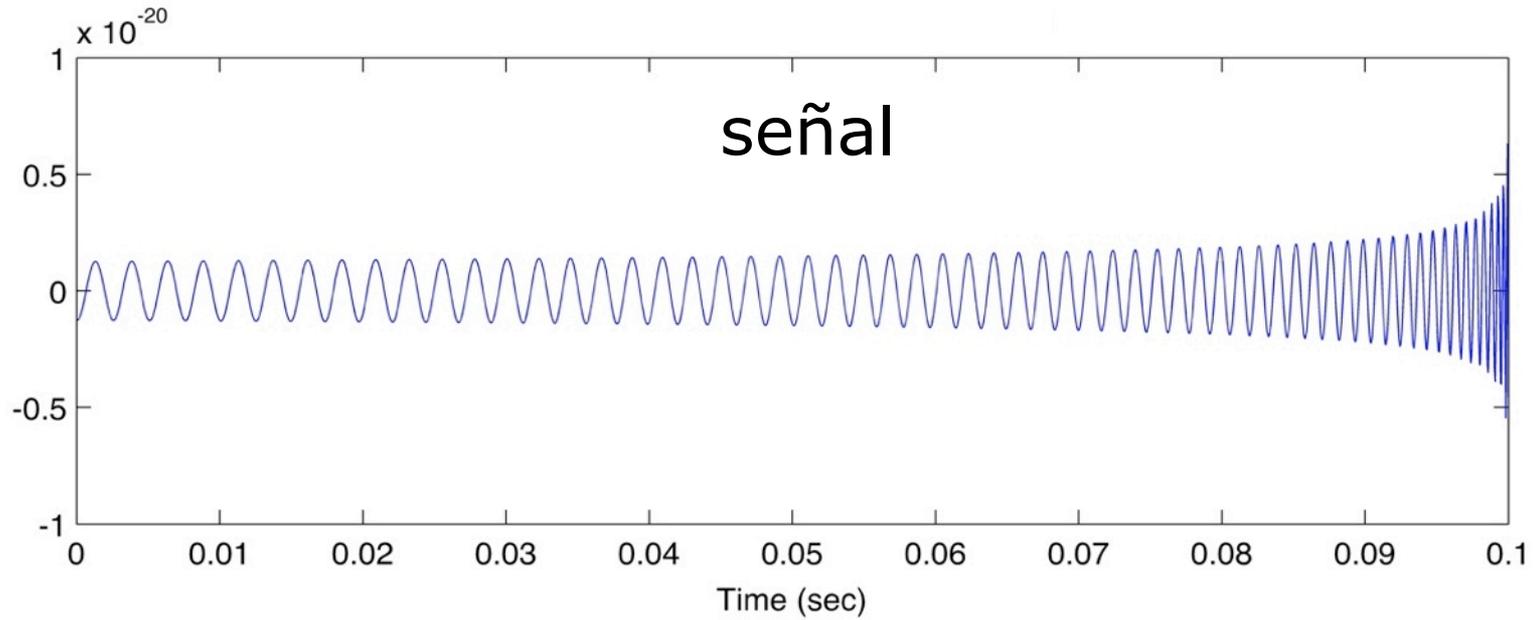
La pequeña amplitud de las ondas gravitatorias obliga a **reducir al máximo posibles fuentes de ruido.**



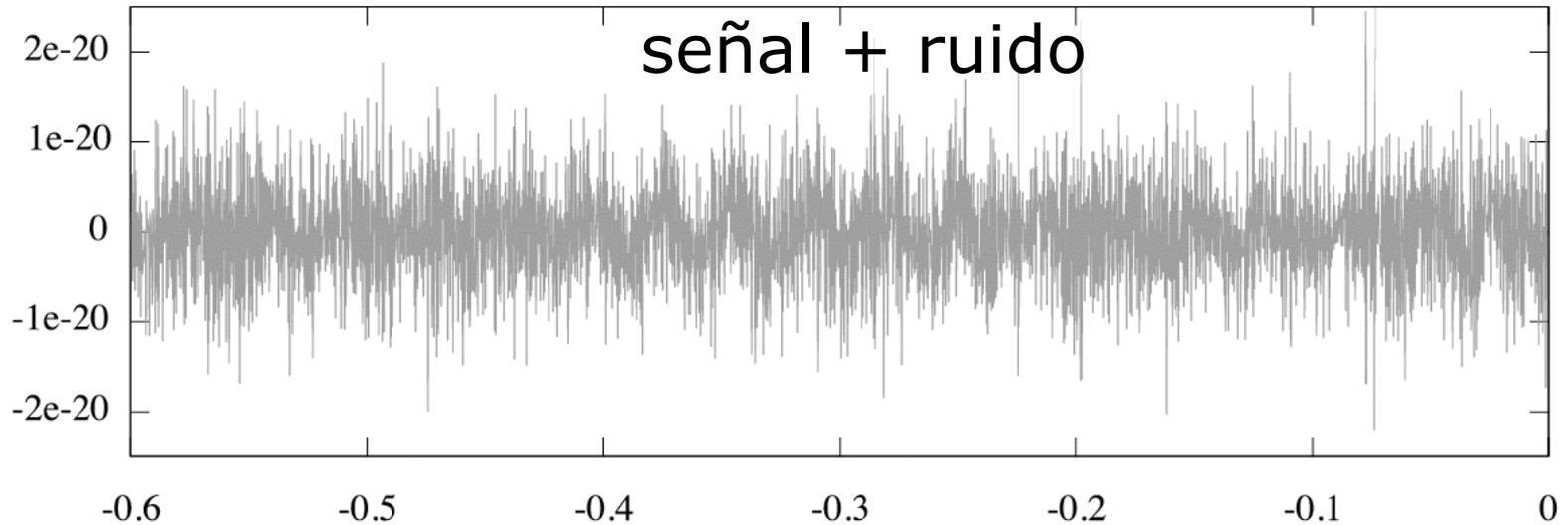
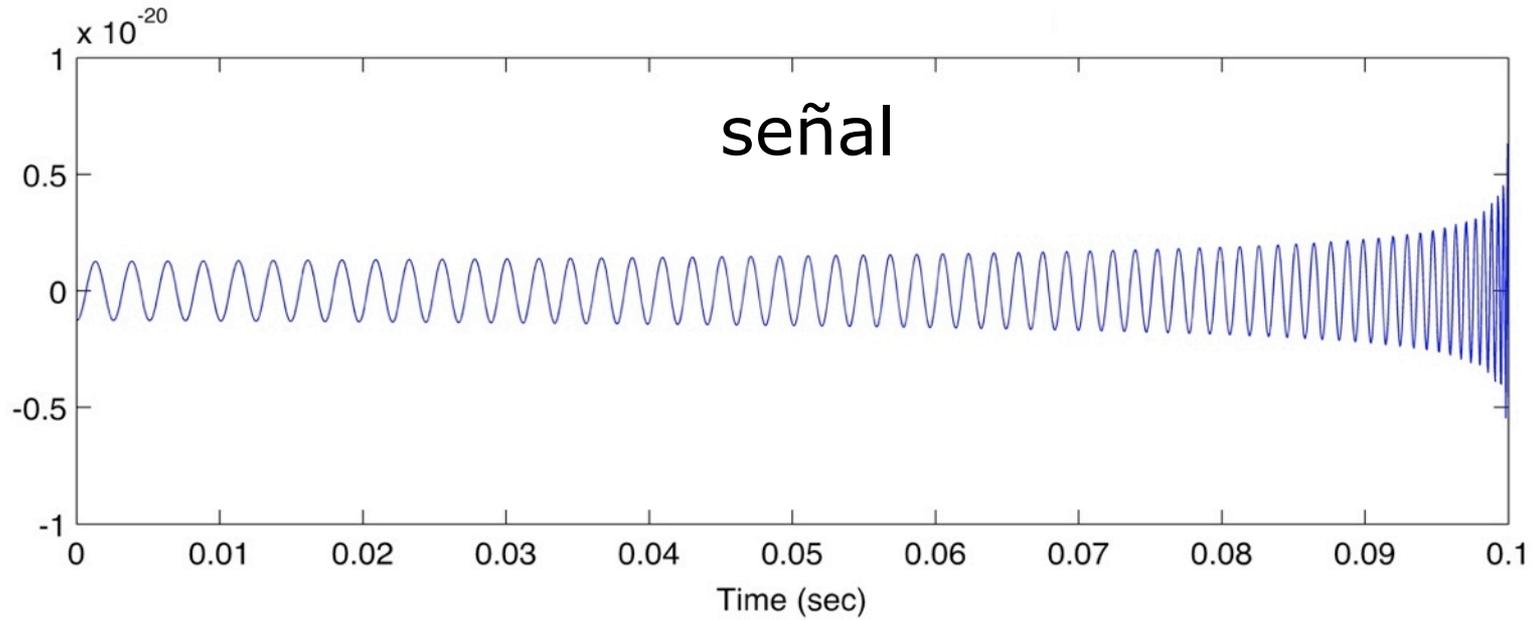
Ejemplo señal gravitatoria tipo "chirp"



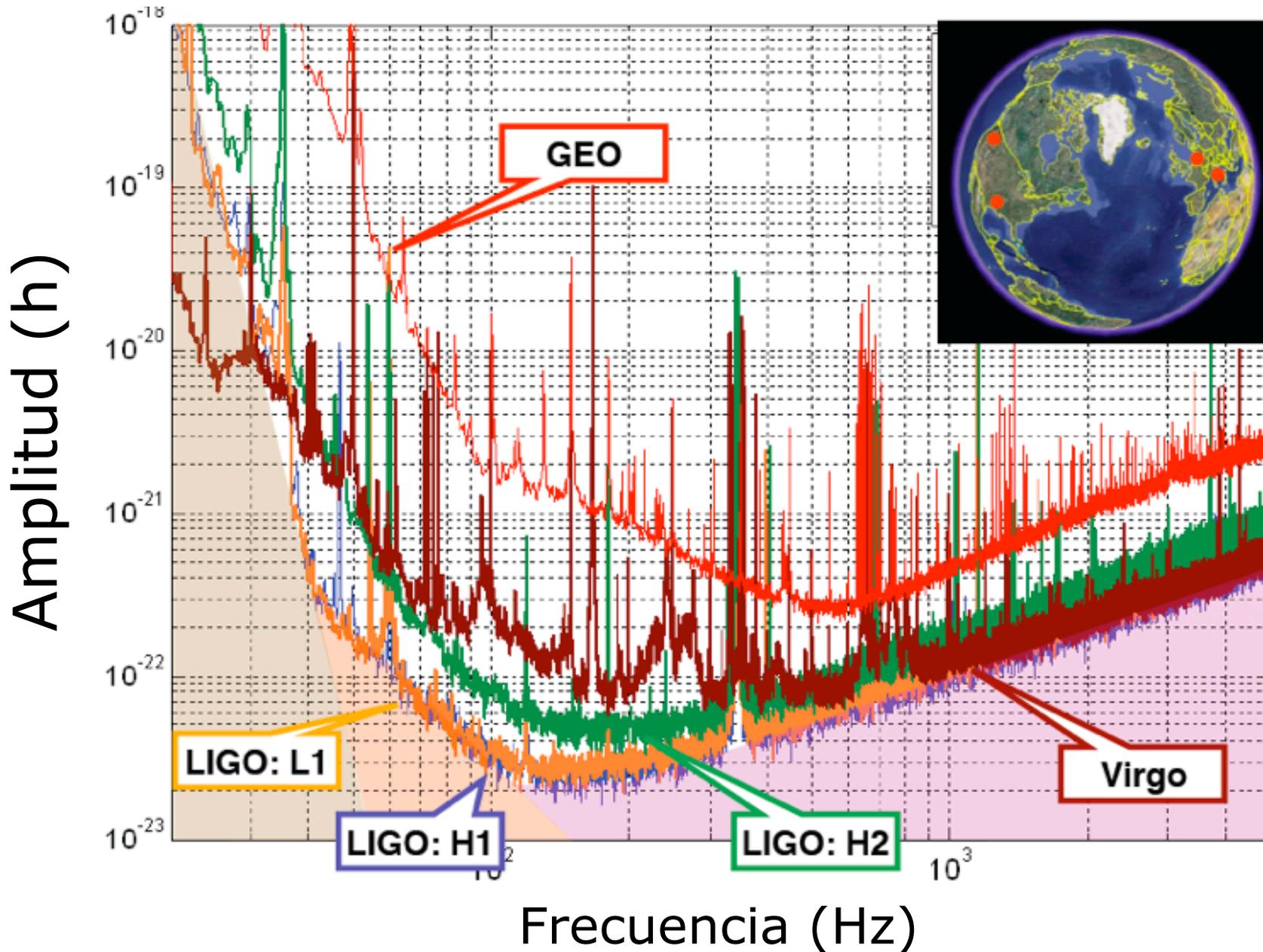
Ejemplo señal gravitatoria tipo "chirp"



Ejemplo señal gravitatoria tipo "chirp"



Curvas de sensibilidad iniciales



Interferómetros de primera generación

Las observaciones que LIGO, Virgo y GEO600 han llevado a cabo en 2005-2010 han sentado las bases del éxito de los detectores avanzados:

- Demostración de que las instalaciones pueden ser controladas de forma estable con **ciclos de trabajo de ~70%**
- Organización de equipos de análisis de datos (AD), generación de algoritmos para AD, establecimiento de protocolos de revisión de resultados, consensuar criterios de detección o escribir artículos científicos (~800 autores).
- GEO600 ha servido para desarrollar **tecnología avanzada**: suspensiones monolíticas, láseres de alta potencia, reciclado de la señal (sintonización fina), etc.
- **Límites superiores** significativos en púlsares (Crab, Vela), colisión de binarias compactas, y fondo estocástico.

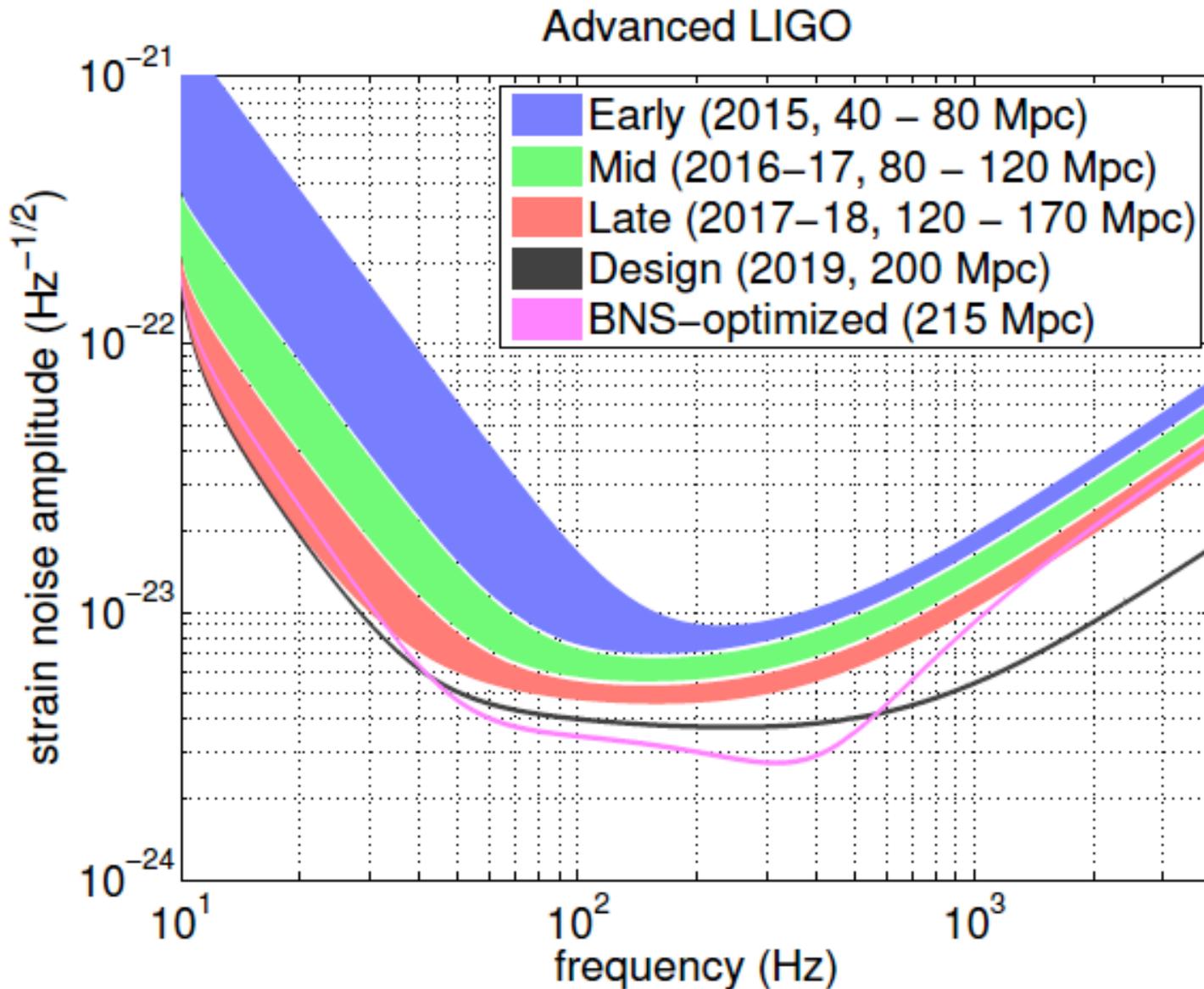
Presente actualización

- LIGO y Virgo están siendo actualizados para instalar tecnologías avanzadas.
- Advanced LIGO (**aLIGO**) será comisionado en **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.
- 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).
- LSC-Virgo desarrollando activamente colaboraciones con observatorios EM y de neutrinos.

Red Expandida de Interferómetros 2020+



Progreso estimado (arXiv:1304.0670)



Detectores avanzados: factor 10 en distancia

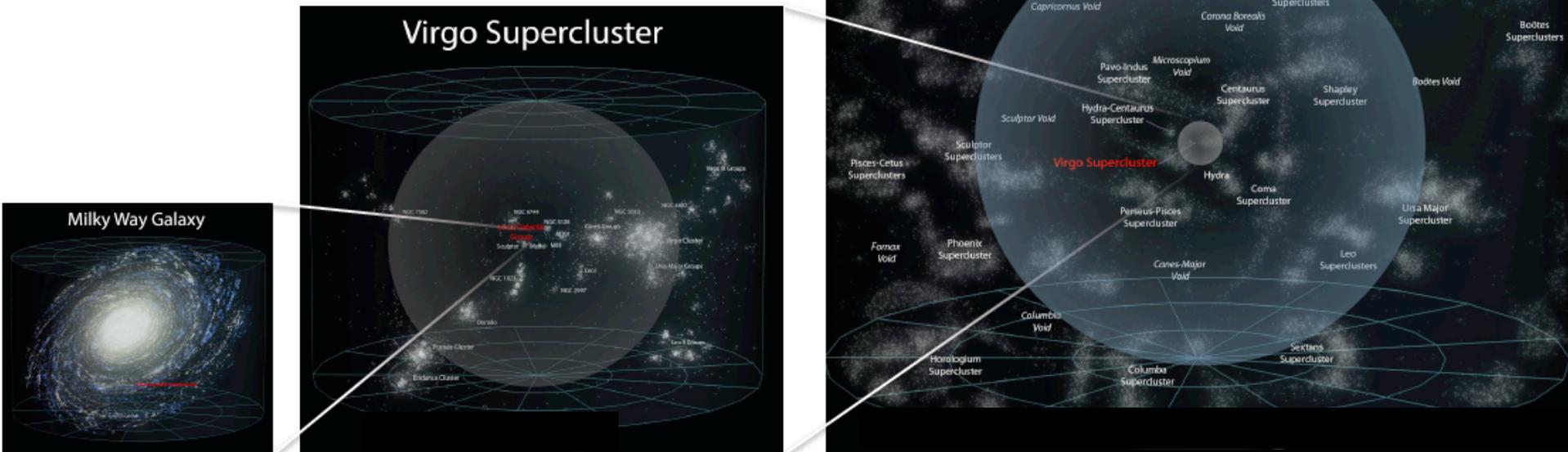
- Abarcarán unas 100.000 galaxias.
- Ritmo de sucesos por galaxia: 1 cada 10.000 años ...
- Aproximadamente **1 suceso al mes !**

NS/NS, LIGO inicial:

~15Mpc, 1 suceso / 50 años

NS/NS LIGO avanzado:

~200Mpc, 40 sucesos / año



Entendiendo los datos

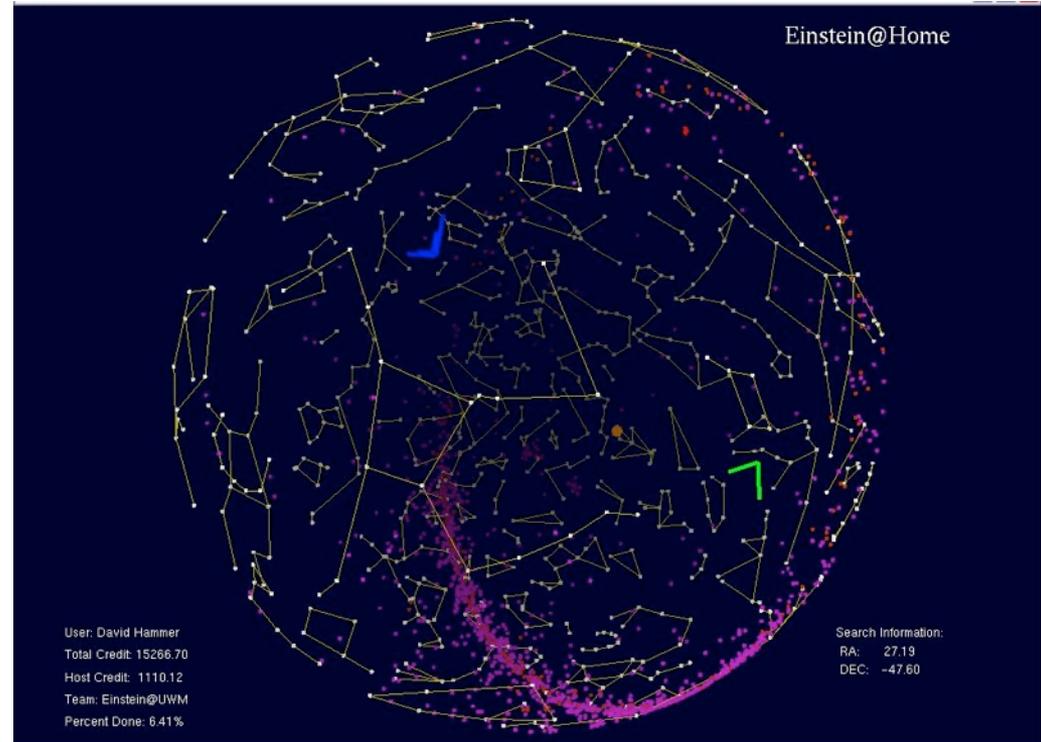
- Todas las señales predichas de radiación gravitatoria están muy por debajo del ruido. Debe excavarse en el ruido para encontrar la señal.
- **Matched filtering** - correlacionar con una señal predicha o patrón - es esencial para la fuente más predecible, colisión de binarias compactas.
- Familias de patrones computacionalmente muy caras. Ajuste al mejor patrón determina valores de parámetros.
- **Einstein@home** dedicado a búsquedas de radiación gravitatoria continua. Proporciona 1 PFlop de manera continuada.
- Einstein@home ha encontrado 50 nuevos púlsares incluyendo una nueva binaria de estrellas de neutrones. Demuestra la efectividad de los algoritmos de AD desarrollados por la comunidad de ondas gravitatorias.

Einstein@home (einstein.phys.uwm.edu)

Programa para realizar búsquedas de púlsares en los datos de los detectores LIGO y GEO.

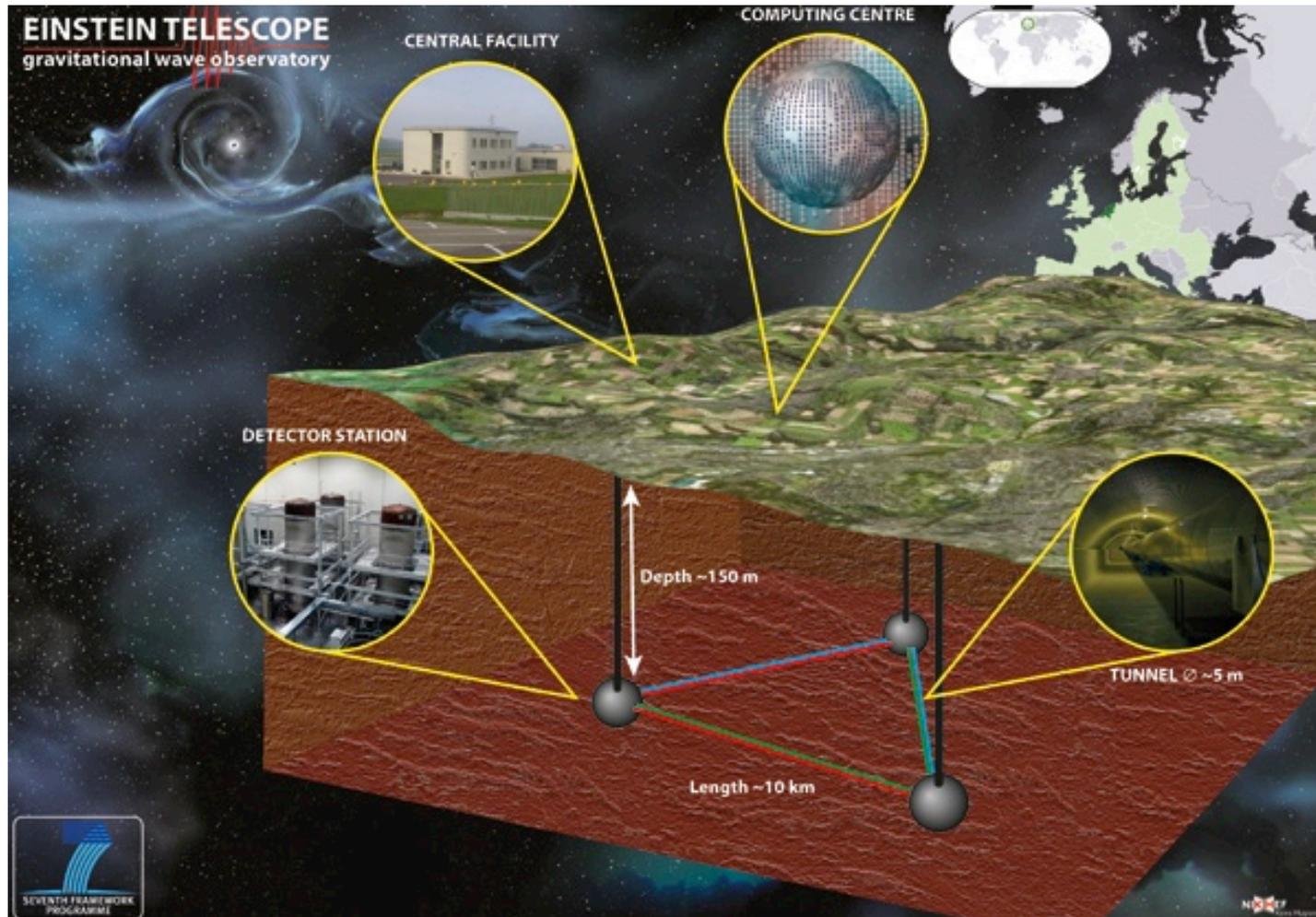
Desde 2005 (precursor: SETI@home).

El programa funciona como un **salvapantallas** gratuito que utiliza la capacidad libre del procesador (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing).

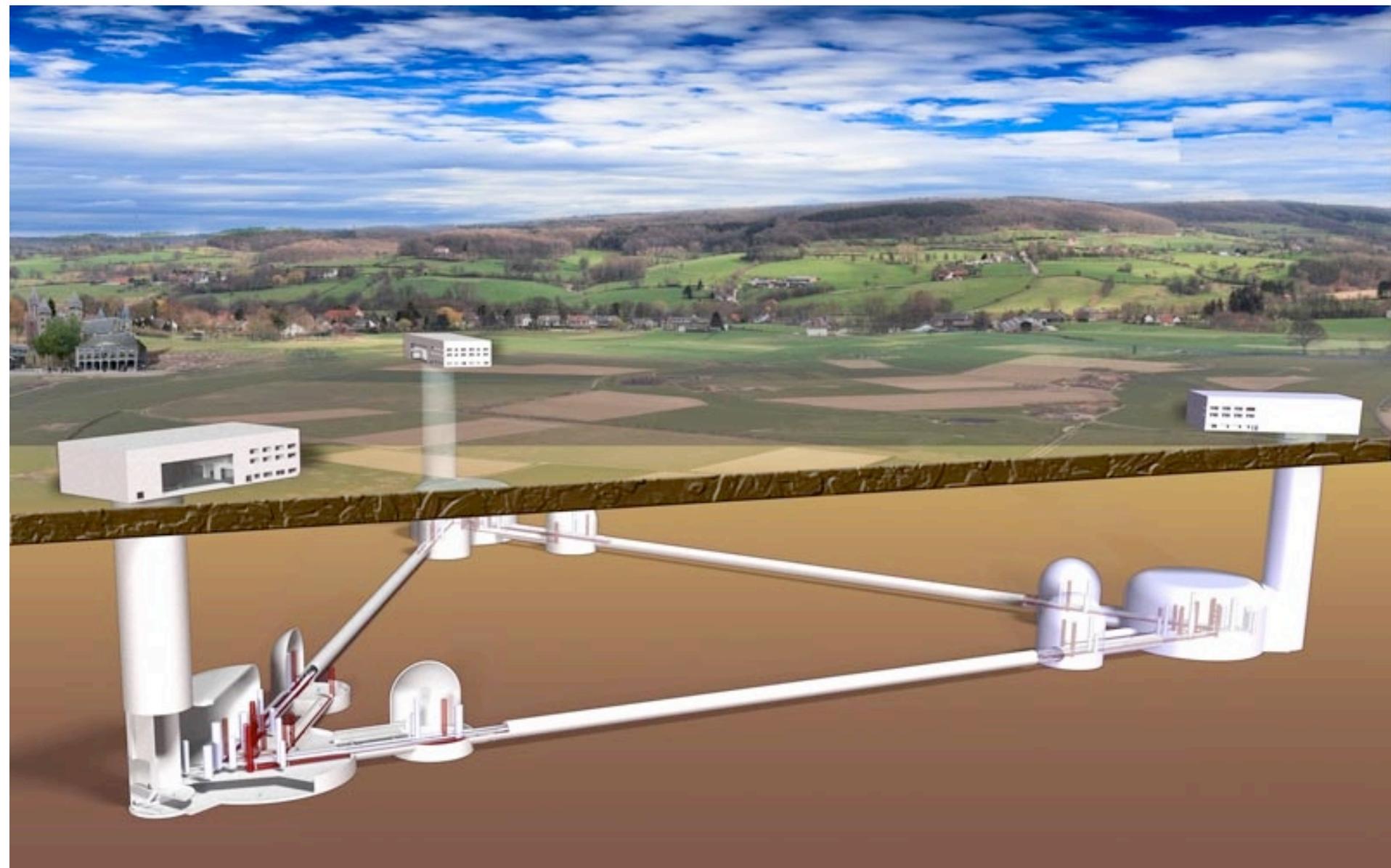


*As of August 2012, over 300,000 volunteers in 221 countries have participated in the project, making it the third-most-popular BOINC project. Users contribute about 1.005 petaFlops of computational power, which would rank Einstein@Home among the top 20 on the TOP500 list of supercomputers. (Fuente: **wikipedia**)*

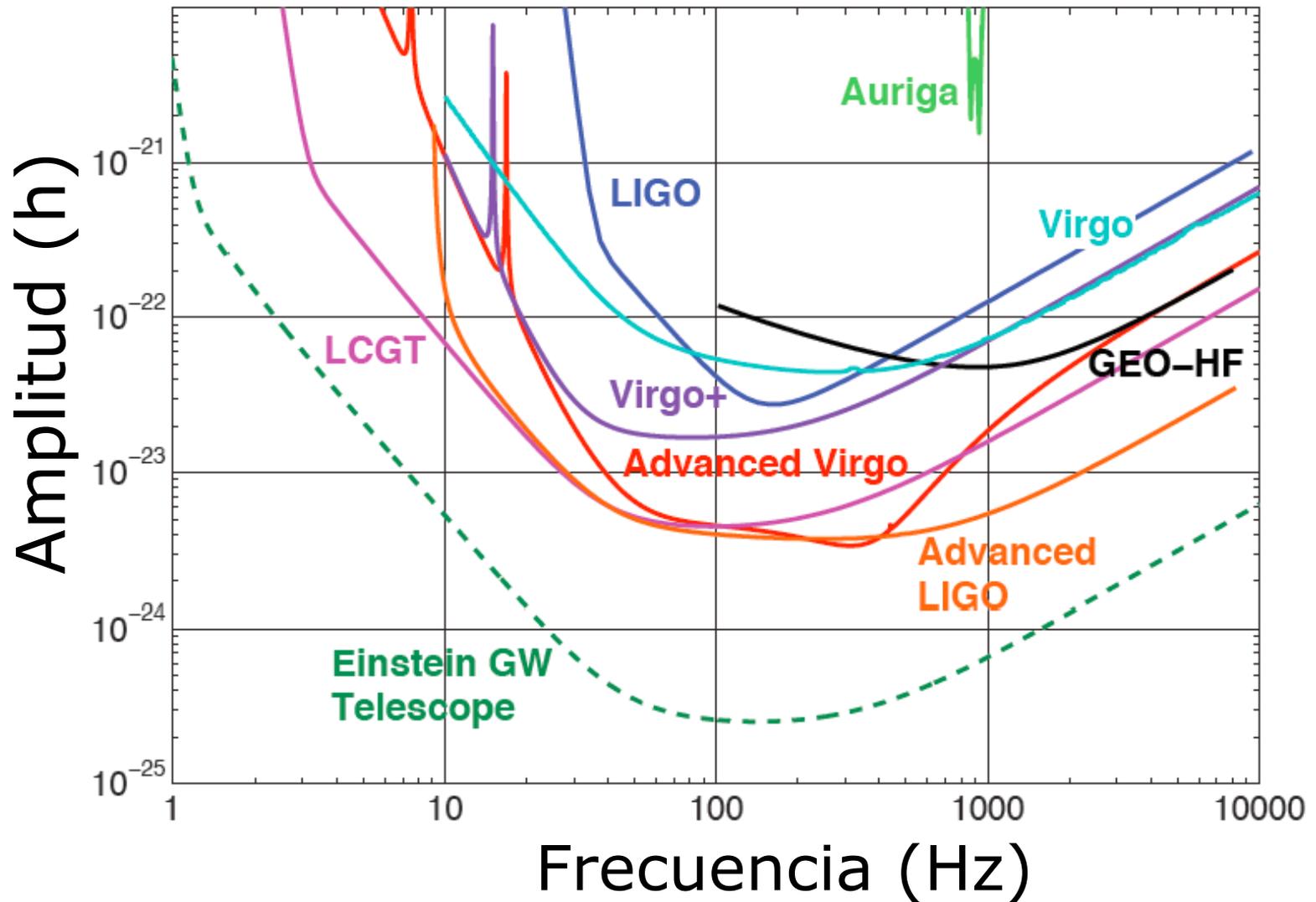
Einstein Telescope (2025+)



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

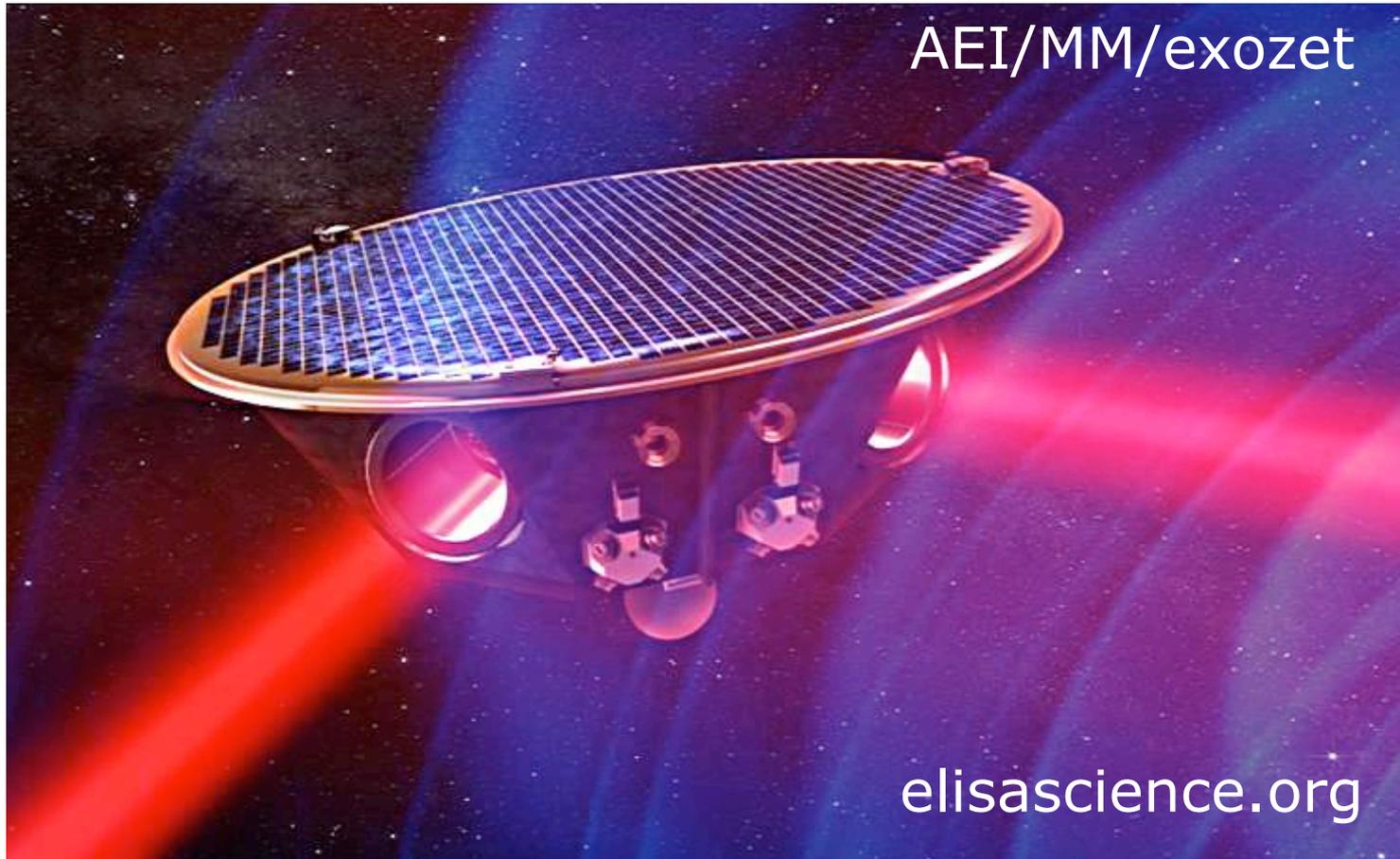


Localización no decidida. Esencial reducir ruido sísmico entre 1-10 Hz.



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

LISA/eLISA/NGO: 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.

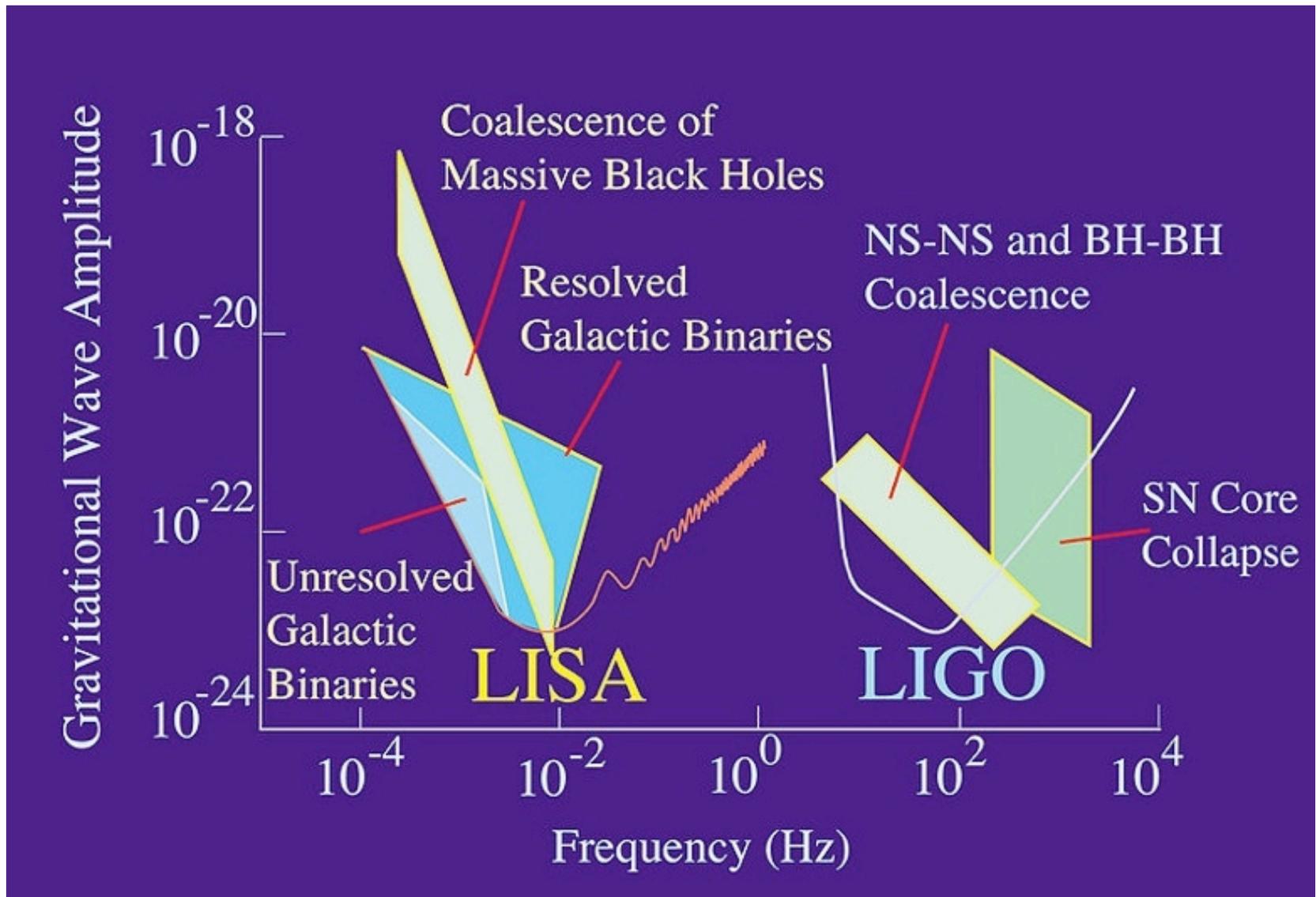
LISA Pathfinder (2015)



ESA/
Astrium/
IABG

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 **2015** desde cohete VEGA (Kourou, Guayana francesa).



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.

Cronología de los retrasos

LISA previsto inicialmente para **2010+**. Proyecto NASA/ESA (50/50)

8 Abril 2011 NASA abandona por limitaciones presupuestarias (James Webb Telescope priorizado)

ESA rediseña el concepto de la misión, renombrada **NGO**. Candidata a primera misión de clase L del programa Cosmic Vision (perdió frente a Jupiter Icy Moon Explorer, JUICE).

Septiembre 2013: candidata (junto con Athena+, entre 32 propuestas) a una de las próximas misiones L2/L3. White paper defendiendo el proyecto renombrado **eLISA**. (elisascience.org)

31 Octubre 2013: director de ESA recomienda a Athena+ y a eLISA para las misiones L2 (2028) y L3 (**2034**) respectivamente.

28-29 Noviembre 2013: **decisión final**. No se esperan sorpresas.

ESA programa tres misiones de clase L cada 20 años.

Mission	Name	Launch date	Study targets
L1	JUICE	2022	The magnetic field of Jupiter's moon Ganymede
L2	Athena+	2028	Black holes and galaxy clusters.
L3	eLISA	2034	Gravitational ripples from black-hole mergers.

Multi-mensajeros cósmicos

LIGO/Virgo están totalmente comprometidos con impulsar la astronomía de los “mensajeros” múltiples.



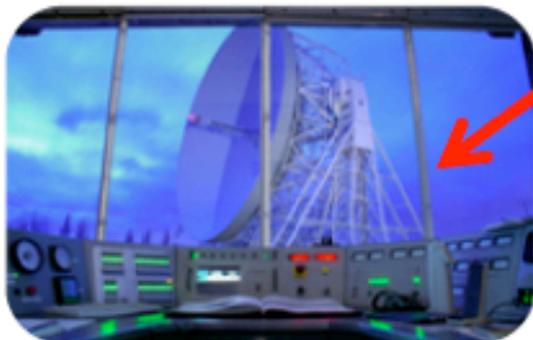
optical



gamma rays,
x-rays



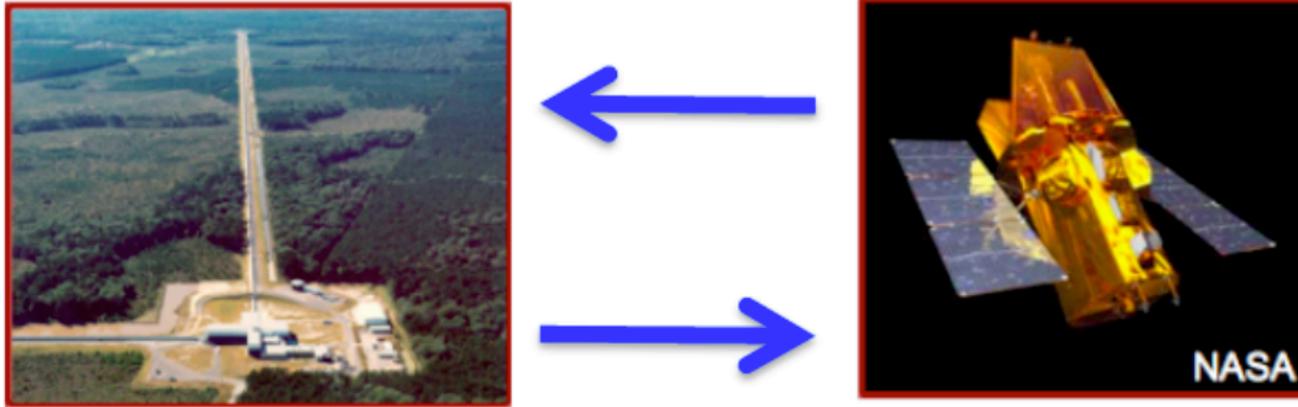
radio



neutrinos



Flujo bidireccional de la información



- **Alarmas EM → análisis datos detectores OG**

Conocer instante preciso y localización en el cielo reduce ruido en la red de interferómetros; búsquedas más profundas.

- **Detección OG → apuntado de telescopios EM**

Fundamental apuntado rápido.

Desarrollo de protocolos de baja latencia de detección de OG y de localización espacial, transferencia de información, coordinación, etc ...

Prototipos desarrollados. Necesitan funcionar sin errores en 2015.

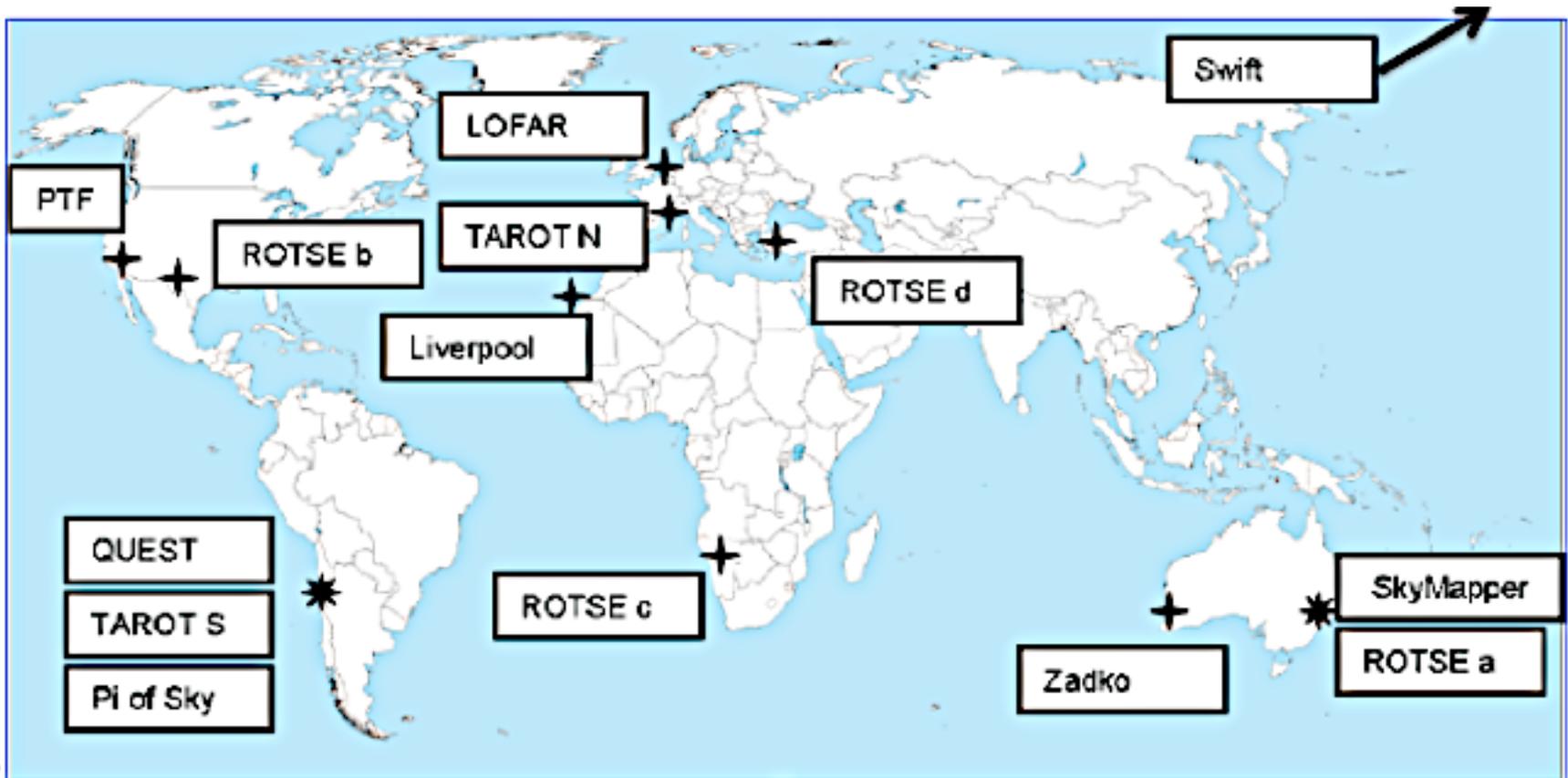
Red de telescopios

detección ondas gravitatorias → apuntar telescopios EM

LIGO/Virgo colaboraron con telescopios de apuntado rápido para una campaña de observación durante el verano y otoño de 2010.

14 alarmas en total, 8 fueron seguidas por los telescopios EM.

También Swift (1 evento) y LOFAR (comisionado durante la campaña).



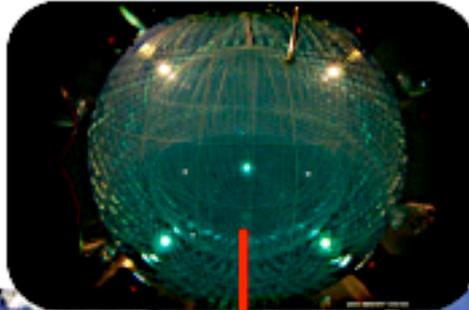
Ondas Gravitatorias y Neutrinos

(colaboraciones emergentes)

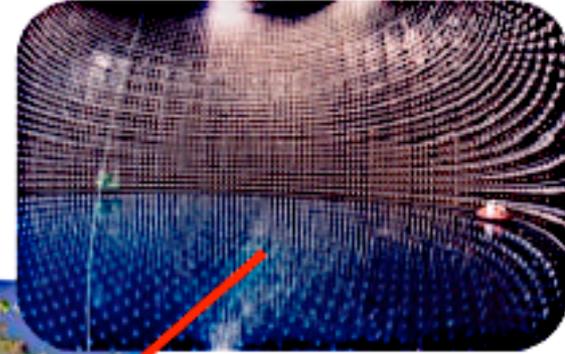
LVD



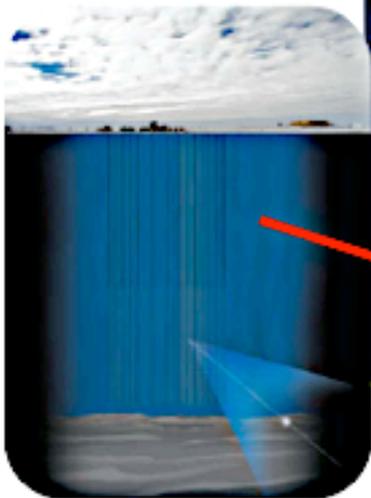
Borexino



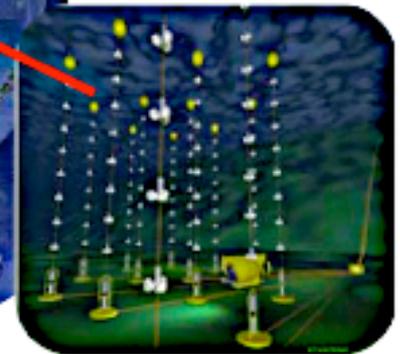
Super-K



IceCube



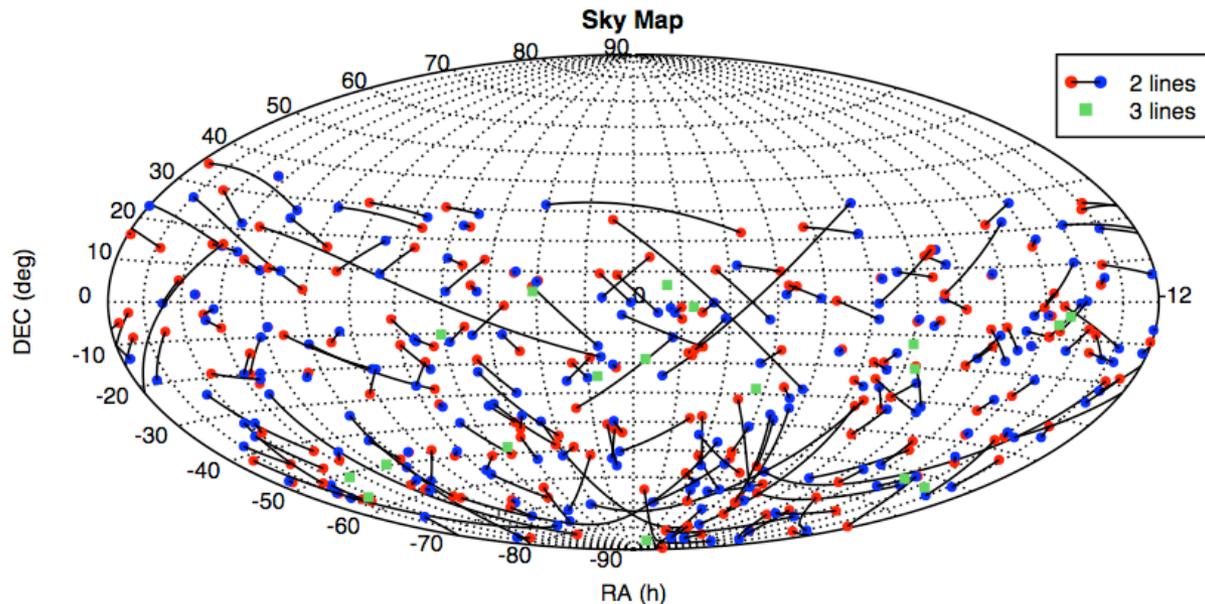
ANTARES



Primera colaboración LIGO/Virgo/ANTARES

Busqueda de coincidencias en OG y neutrinos de alta energía en datos de 2007 (GRBs, SGRs). 17 Mayo 2012.

ANTARES seleccionó 216 posibles eventos de neutrinos. Conocidos el instante temporal y la posición espacial se analizaron en detalle los datos de LIGO (S5) y Virgo (S1). **No se encontraron coincidencias.**



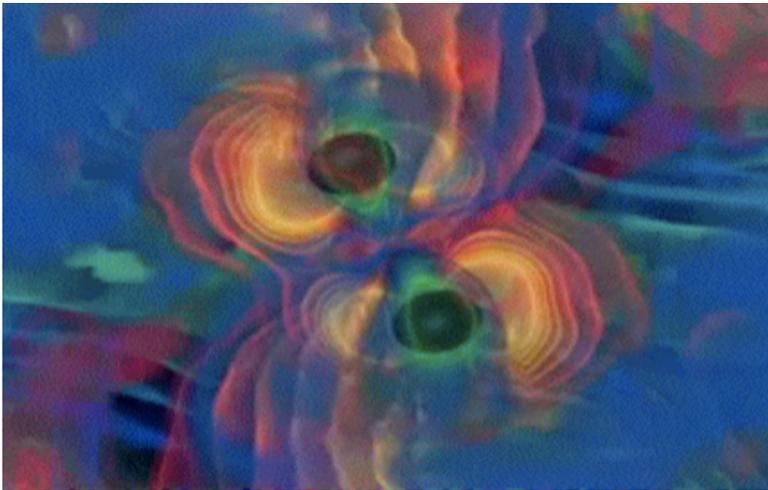
Conclusión: si alguno de los eventos posibles proviene de las fuentes astrofísicas consideradas (NS/NS, NS/BH), éstas deben estar **demasiado distantes** (fuera de la curva de sensibilidad).

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.**