Tests experimentales de la Relatividad General:

¿Tenía razón Einstein 100 años después?

Carlos Fernández Sopuerta

Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC)

Índice

1. Perspectiva Histórica
   - i) Génesis (1887-1919)
   - ii) Glaciación (1920-1960)
   - iii) Edad de Oro (1960-1980)
   - iv) Hacia la Gravedad Extrema (1980-)
2. Perspectiva Contemporánea
3. Las Ondas Gravitatorias: Intentando "escuchar" el Universo
4. Conclusiones

Perspectiva Histórica

Génesis (1887-1919)

Génesis (1887-1919)

- El Génesis de la Relatividad General consiste en el conjunto de experimentos y observaciones anteriores e inmediatamente posteriores a la formulación de la teoría y también a los desarrollos teóricos que facilitaron que completada en 1915.

Génesis (1887-1919)

- El Génesis de la Relatividad General consiste en el conjunto de experimentos y observaciones anteriores e inmediatamente posteriores a la formulación de la teoría y también a los desarrollos teóricos que facilitaron que completada en 1915.

- Los experimentos y observaciones incluyen: El experimento de Eötvös (>1885), el experimento de Michelson-Morley (1887), la observación del avance del perihelio de Mercurio, y la desviación de la luz al pasar cerca de cuerpos masivos.

Génesis (1887-1919)

- El Génesis de la Relatividad General consiste en el conjunto de experimentos y observaciones anteriores e inmediatamente posteriores a la formulación de la teoría y también a los desarrollos teóricos que facilitaron que completada en 1915.

- Los experimentos y observaciones incluyen: El experimento de Eötvös (>1885), el experimento de Michelson-Morley (1887), la observación del avance del perihelio de Mercurio, y la desviación de la luz al pasar cerca de cuerpos masivos.

- Los desarrollos teóricos van desde la formulación de la Relatividad Especial (1905) a los resultados que Einstein fue deduciendo y que fueron previos a la formulación de las ecuaciones de campo [principio de equivalencia, corrimiento al rojo gravitatorio, desviación de la luz (factor de 2 incorrecto), arrastre sistemas de referencia, efectos gravito-magnéticos].

Génesis (1887-1919)

El experimento de Eötvös

Génesis (1887-1919)

El experimento de Eötvös

Comprobando la equivalencia entre la masa inercial y la gravitatoria.

Génesis (1887-1919)

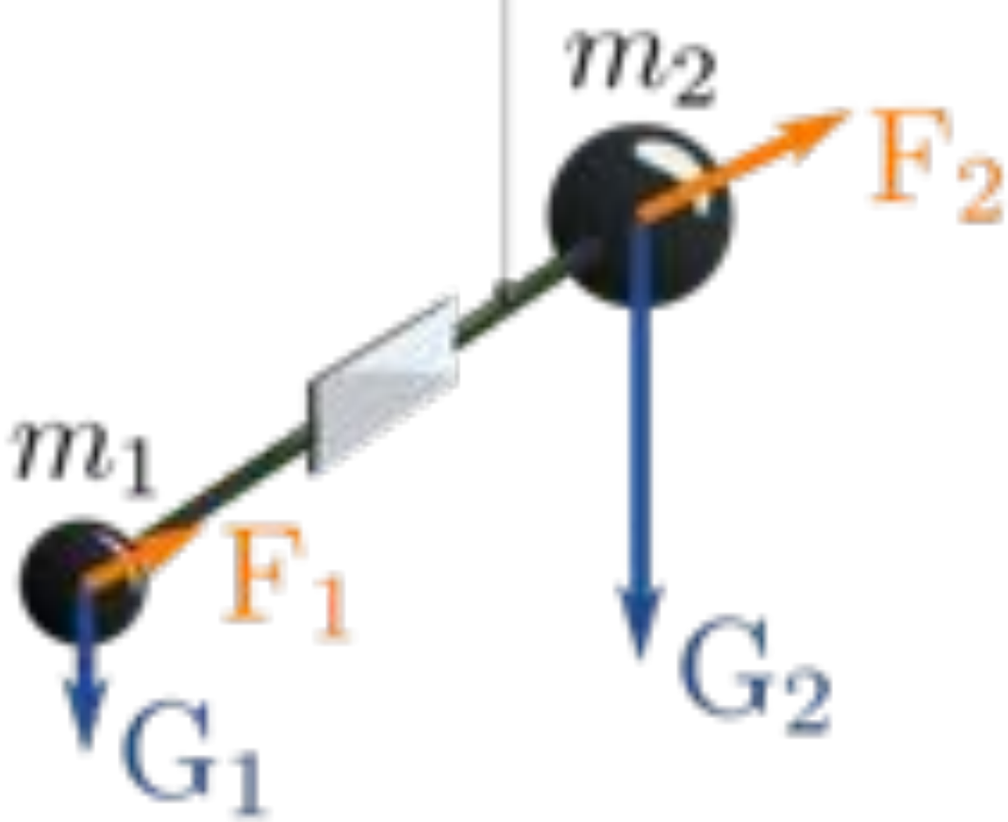
El experimento de Eötvös

Comprobando la equivalencia entre la masa inercial y la gravitatoria.

Hay algunos antecedentes (Newton, Bessel,…) pero los de Eötvös y discípulos (>1885) iniciaron el camino a los experimentos modernos sobre esta cuestión.

Génesis (1887-1919)

El experimento de Eötvös



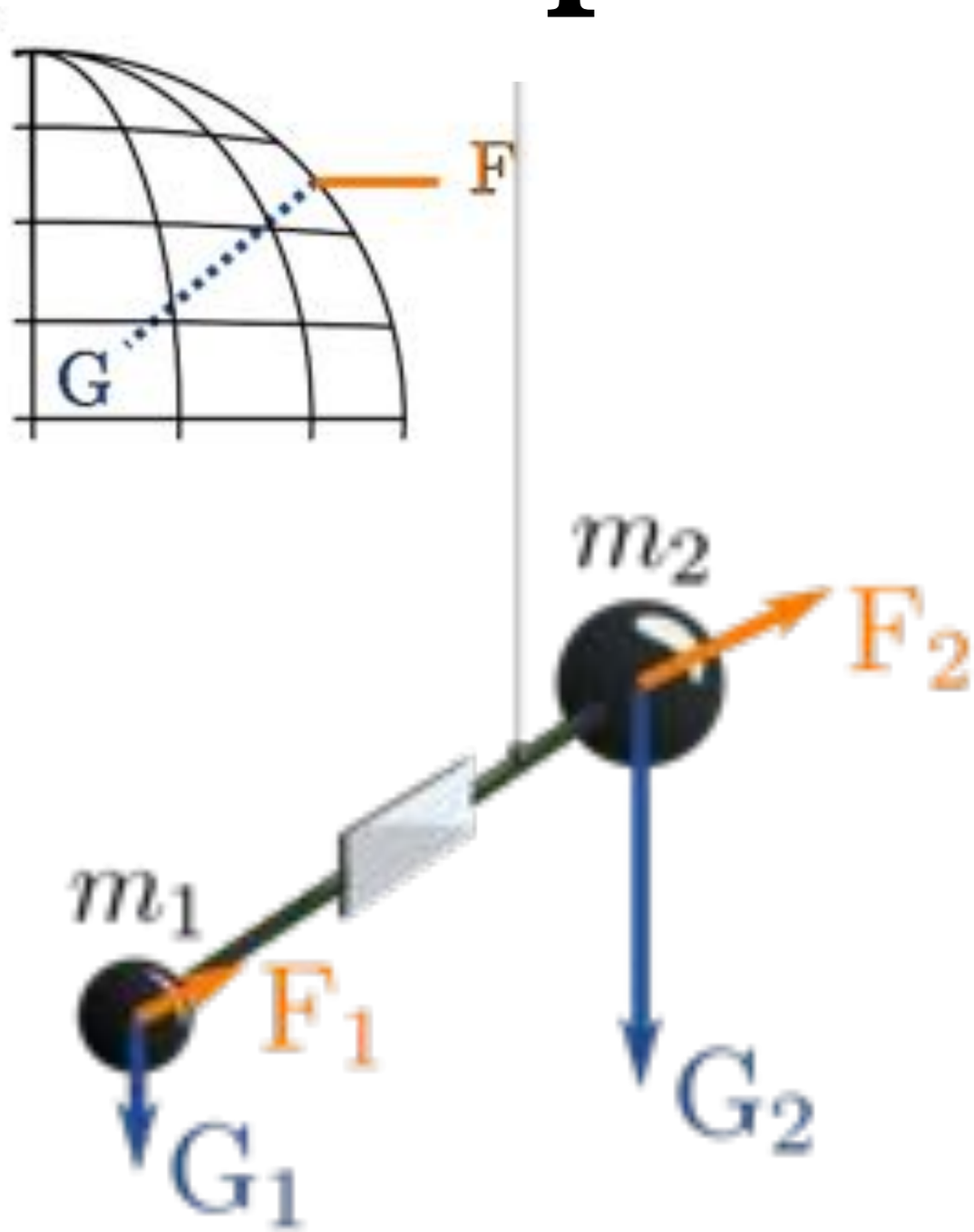
$$\eta \equiv 2\frac{|a_1 - a_2|}{|a_1 + a_2|} = \left[\frac{m_g}{m_i}\right]_1 - \left[\frac{m_g}{m_i}\right]_2$$

Razón de Eötvös

$$\eta < 10^{-8}$$

Génesis (1887-1919)

El experimento de Eötvös



En el experimento está diseñado de forma que si la masas inerciales y gravitatoria son diferentes la barra rotará debido a la existencia de un momento de fuerza neto (la razón F1/F2 es diferente de la razón G1/G2).

$$\eta \equiv 2\frac{|a_1 - a_2|}{|a_1 + a_2|} = \left[\frac{m_g}{m_i}\right]_1 - \left[\frac{m_g}{m_i}\right]_2$$

Razón de Eötvös

$$\eta < 10^{-8}$$

Génesis (1887-1919)

El experimento de Michelson-Morley

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

Génesis (1887-1919)

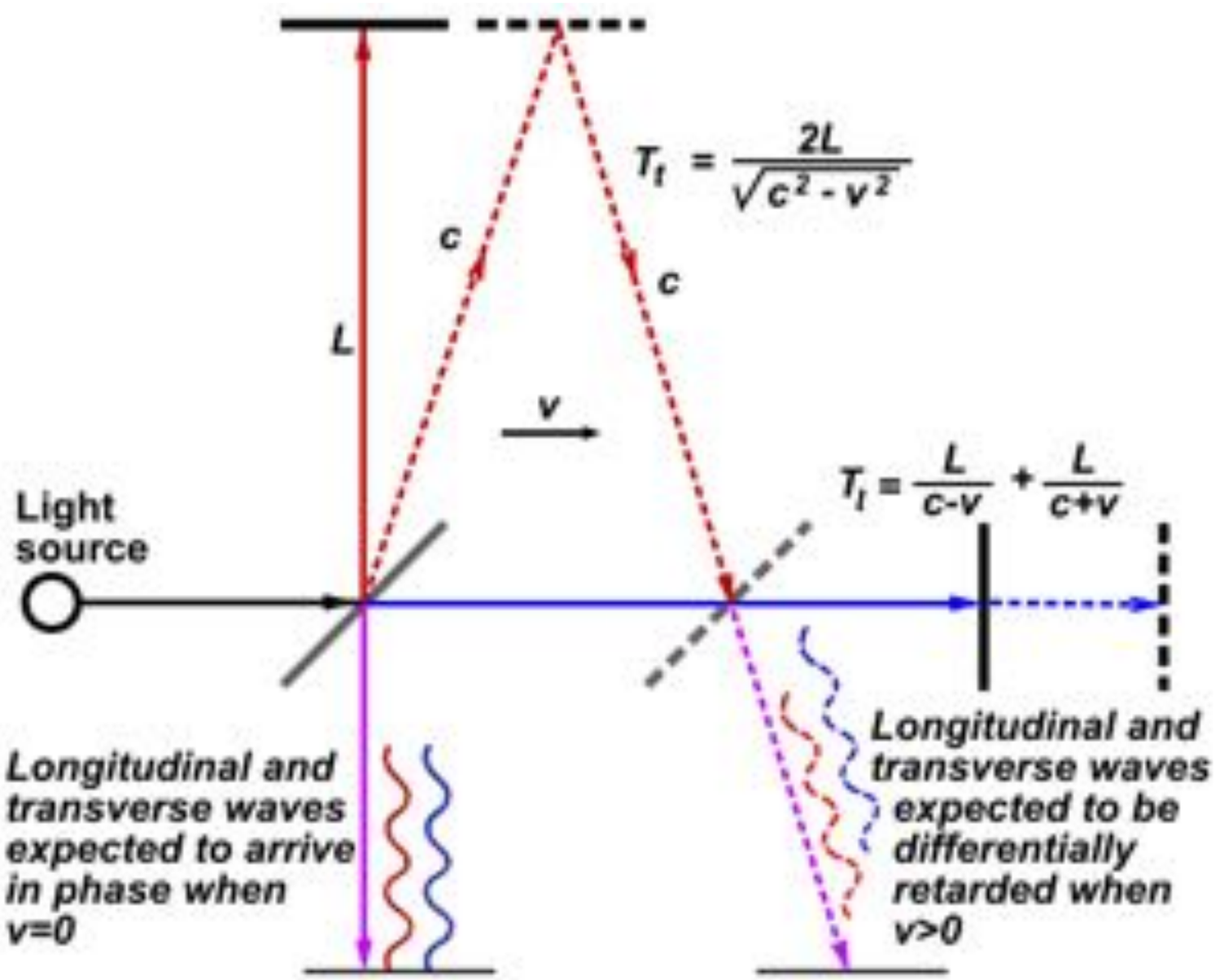
El experimento de Michelson-Morley

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

El objetivo de estos experimentos era intentar detectar efectos de arrastre del éter en la propagación de la luz.

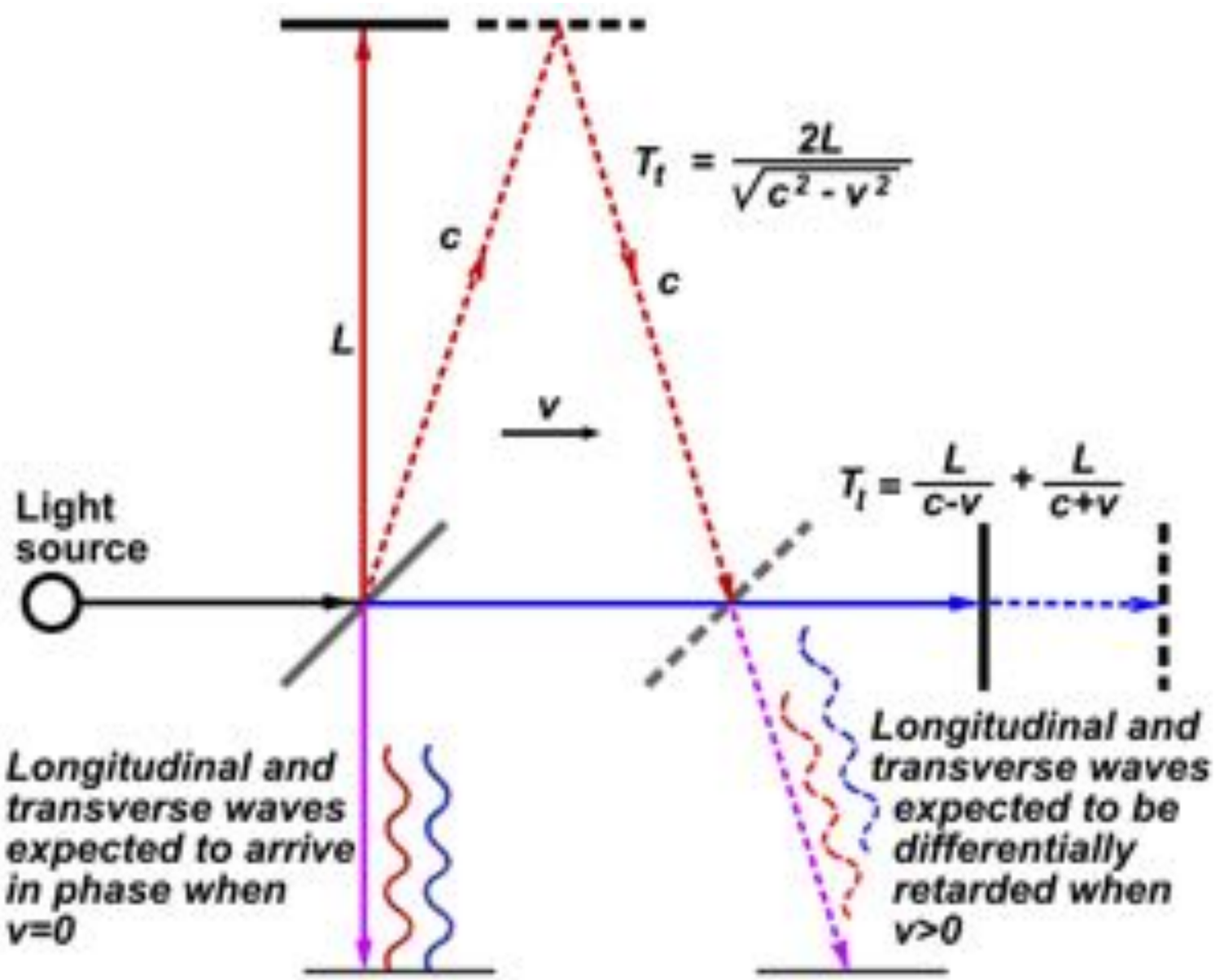
Génesis (1887-1919)

El experimento de Michelson-Morley



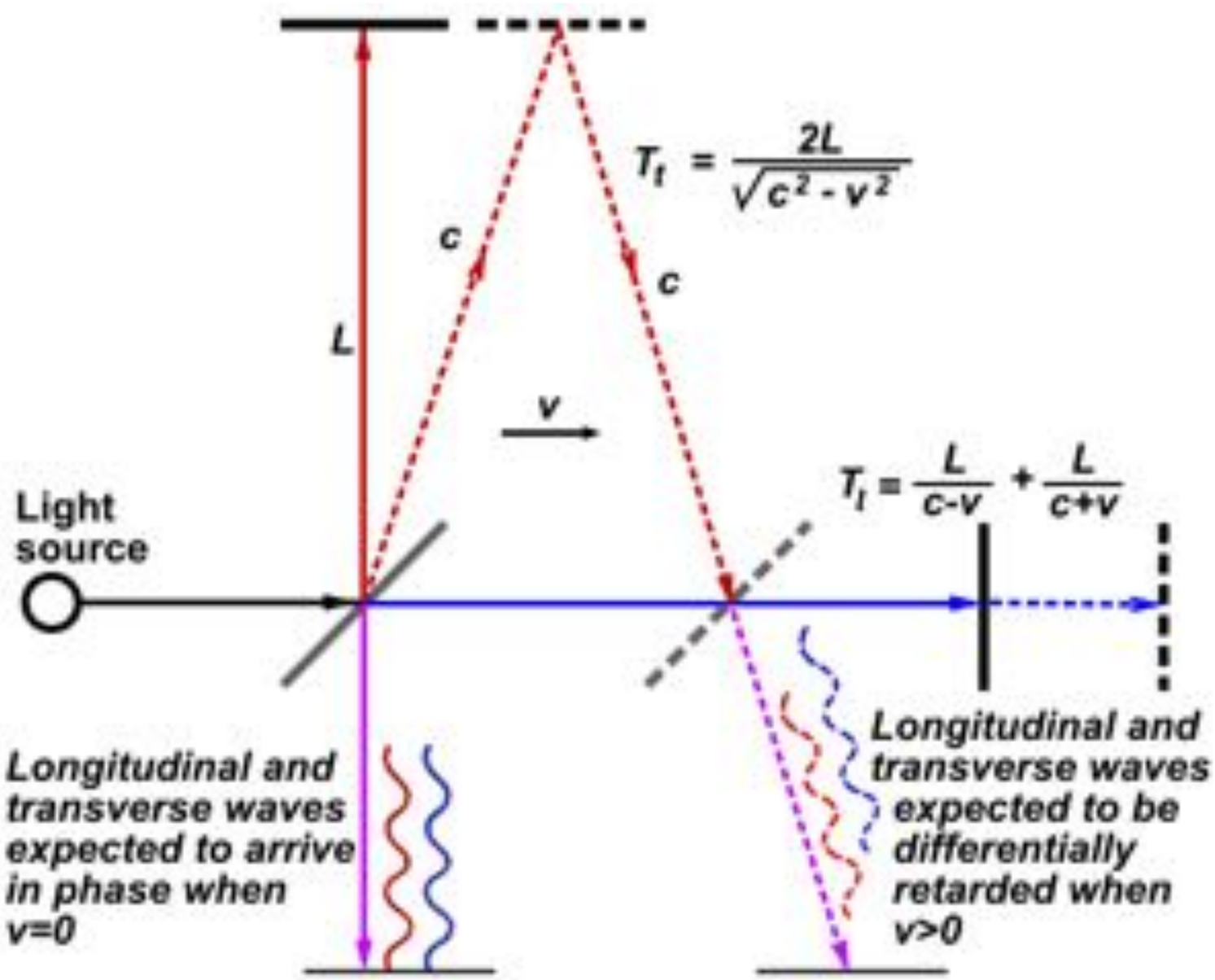
Génesis (1887-1919)

El experimento de Michelson-Morley



Génesis (1887-1919)

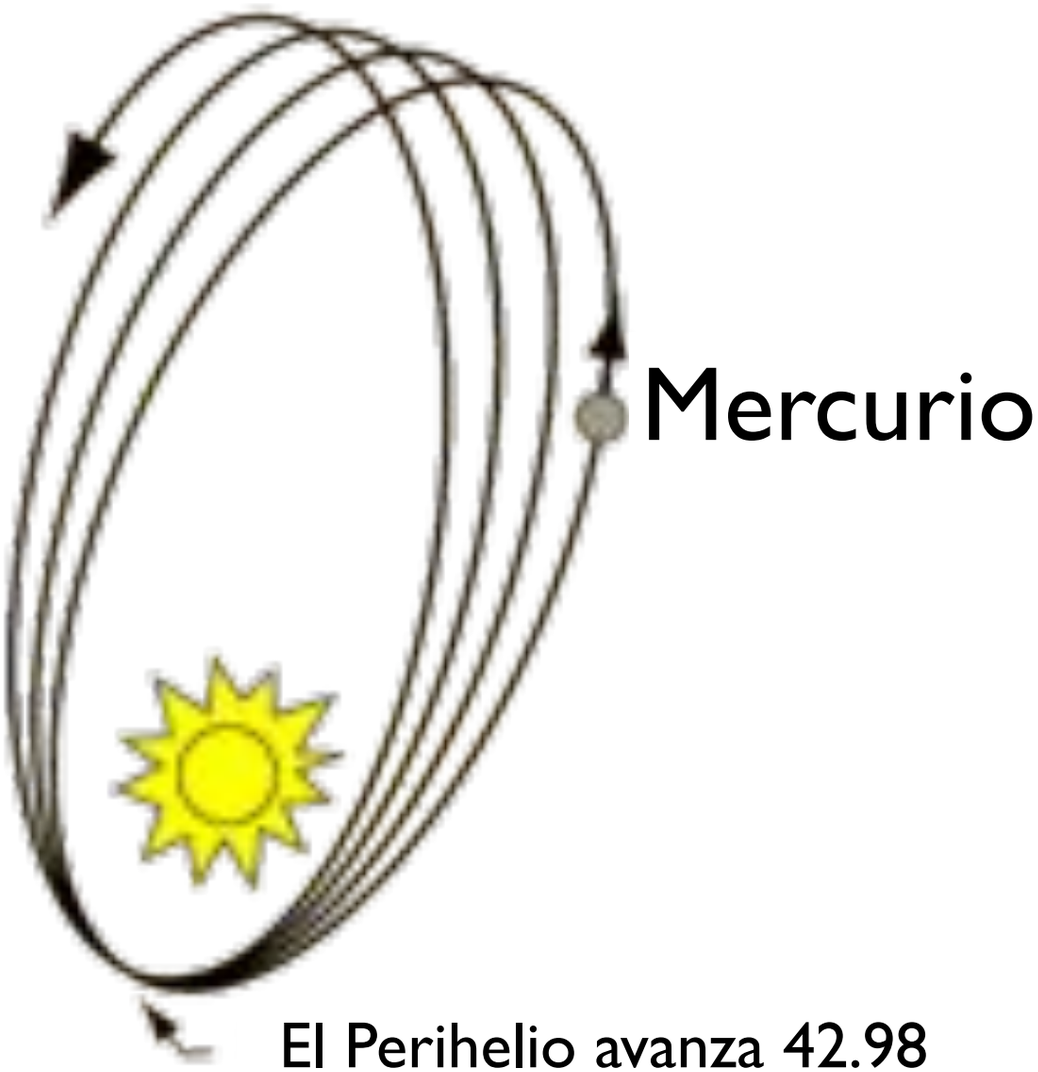
El experimento de Michelson-Morley



Resultado nulo: Compatible con un alto nivel de precesión con un éter con v=0.

Génesis (1887-1919)

El avance del perihelio de Mercurio

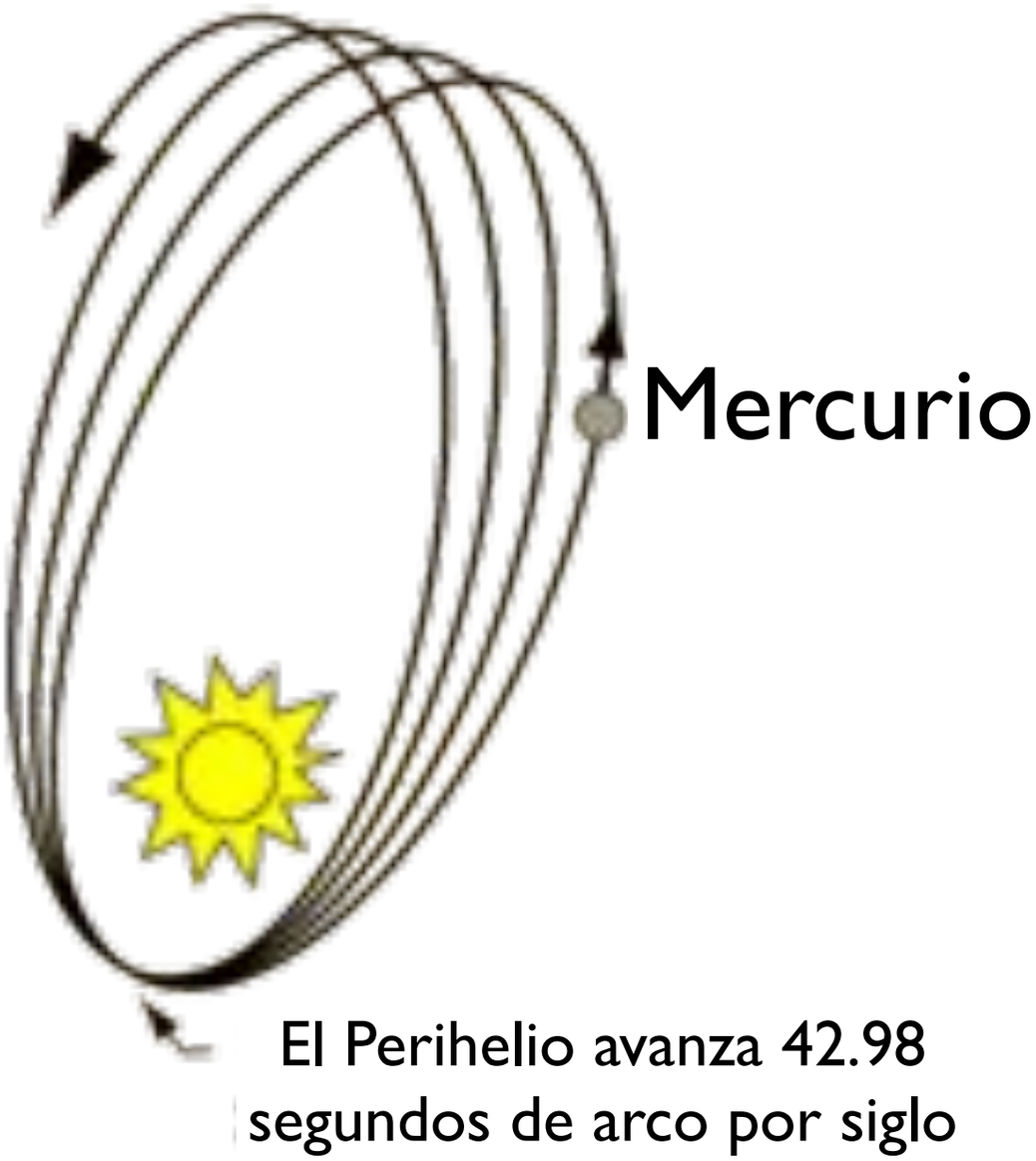


El Perihelio avanza 42.98 segundos de arco por siglo

Le Verrier (1859)

Génesis (1887-1919)

El avance del perihelio de Mercurio



Los 42.98 segundos de arco por siglo es el avance anómalo, no explicable por el efecto de otros planetas.

Le Verrier (1859)

Génesis (1887-1919)

El avance del perihelio de Mercurio

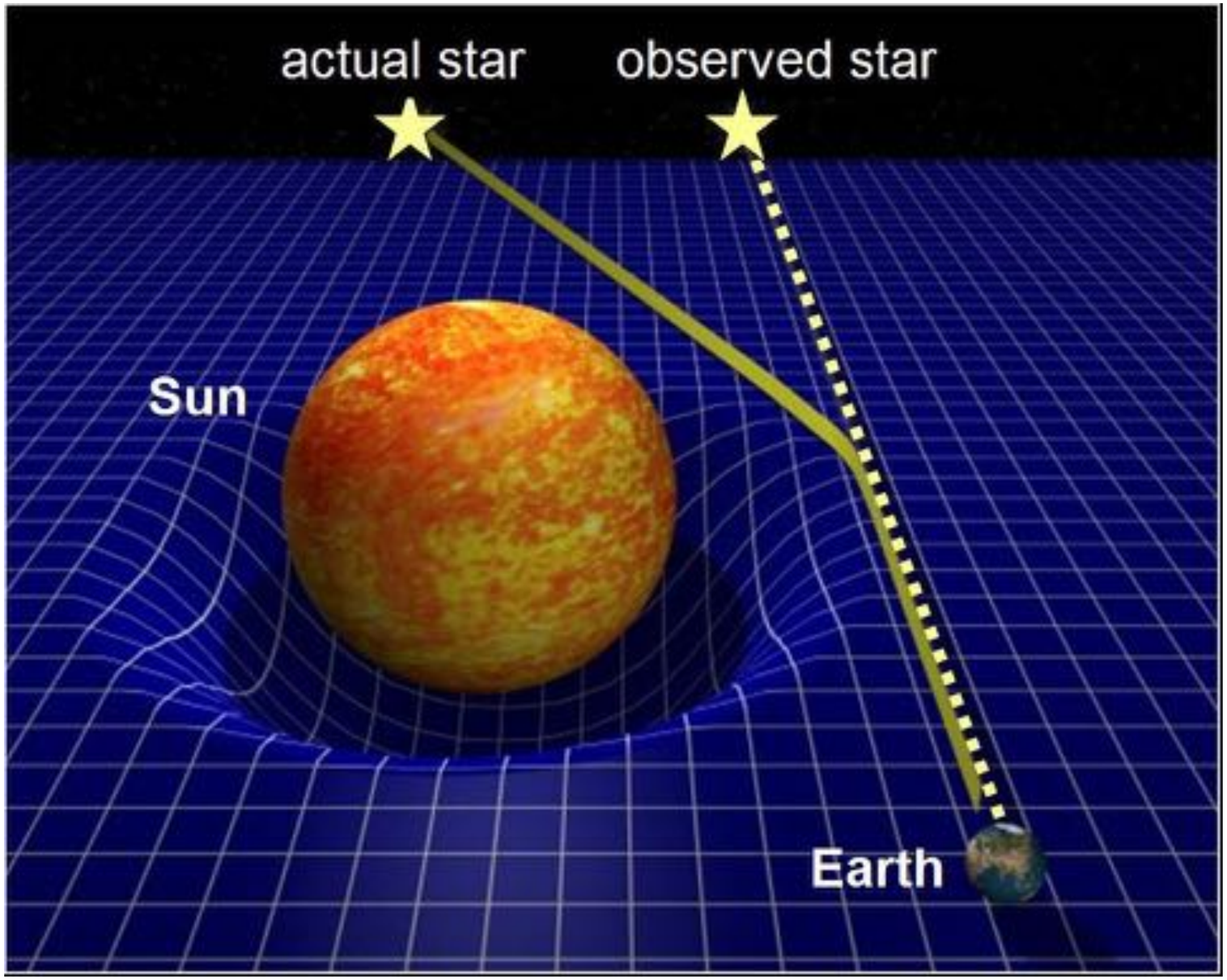
Los 42.98 segundos de arco por siglo es el avance anómalo, no explicable por el efecto de otros planetas.

Einstein conocía el problema y demostró que la Relatividad General lo explicaba, constituyendo un gran triunfo para la teoría.

Le Verrier (1859)

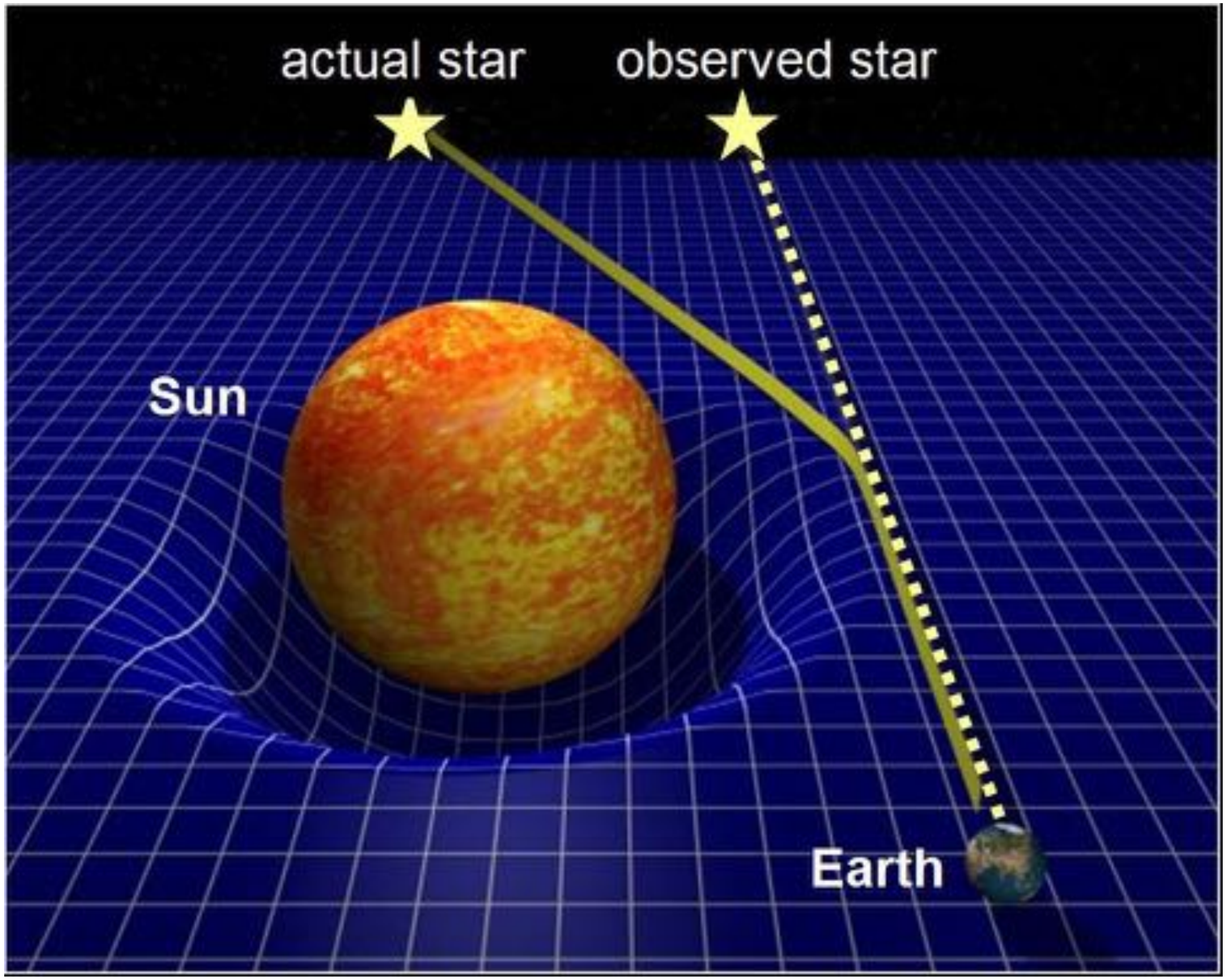
Génesis (1887-1919)

La desviación de la luz por cuerpos masivos



Génesis (1887-1919)

La desviación de la luz por cuerpos masivos



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

Génesis (1887-1919)

La desviación de la luz por cuerpos masivos

Génesis (1887-1919)

La desviación de la luz por cuerpos masivos

Sir Arthur Eddington lideró las expediciones para realizar observaciones durante el eclipse solar de 1919. Hubo dos: Sobral (Brasil) y la Isla del Principe (costa africana).

Génesis (1887-1919)

La desviación de la luz por cuerpos masivos

Sir Arthur Eddington lideró las expediciones para realizar observaciones durante el eclipse solar de 1919. Hubo dos: Sobral (Brasil) y la Isla del Principe (costa africana).

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

Génesis (1887-1919)

La desviación de la luz por cuerpos masivos

Sir Arthur Eddington lideró las expediciones para realizar observaciones durante el eclipse solar de 1919. Hubo dos: Sobral (Brasil) y la Isla del Principe (costa africana).

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

No obstante, hubieron dudas sobre estos resultados hasta nuevas mediciones en los años 1960.

Génesis (1887-1919)

La desviación de la luz por cuerpos masivos

REVOLUTION IN SCIENCE

NEW THEORY OF THE UNIVERSE.

NEWTONIAN IDEAS OVERTHROWN

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".75 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.

COSMIC TIMES

SUN'S GRAVITY BENDS STARLIGHT

Einstein's Theory Triumphs

Esto catapultó a Einstein a la fama mundial.

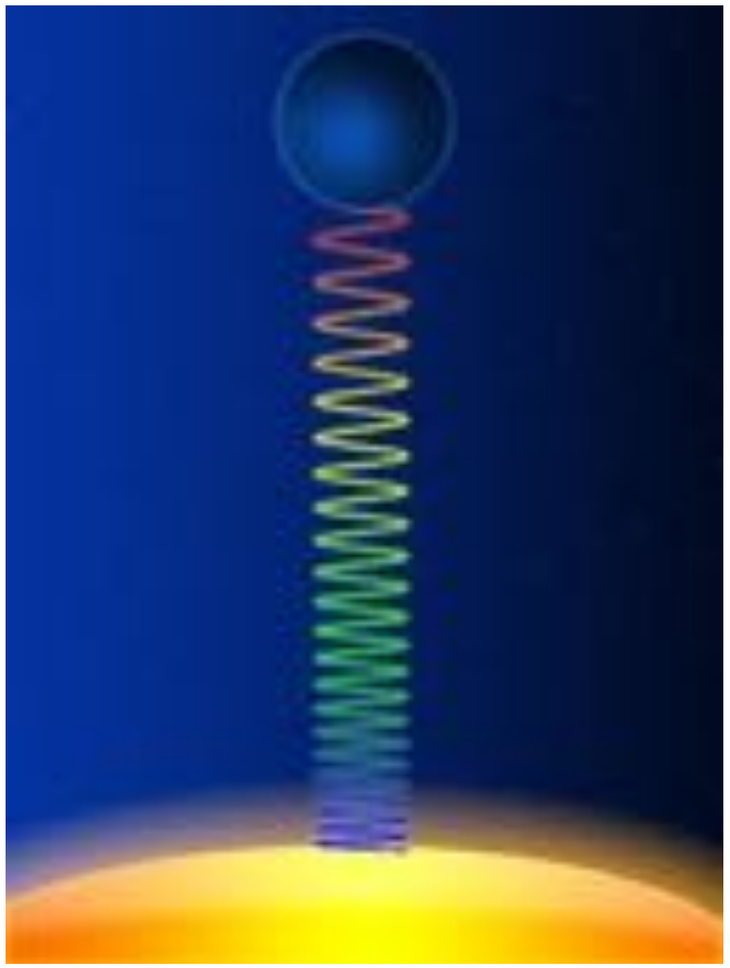
Glaciación (1920-1960)

Glaciación (1920-1960)

- Dos predicciones de Einstein se quedaron sin confirmación experimental durante muchos años.

Glaciación (1920-1960)

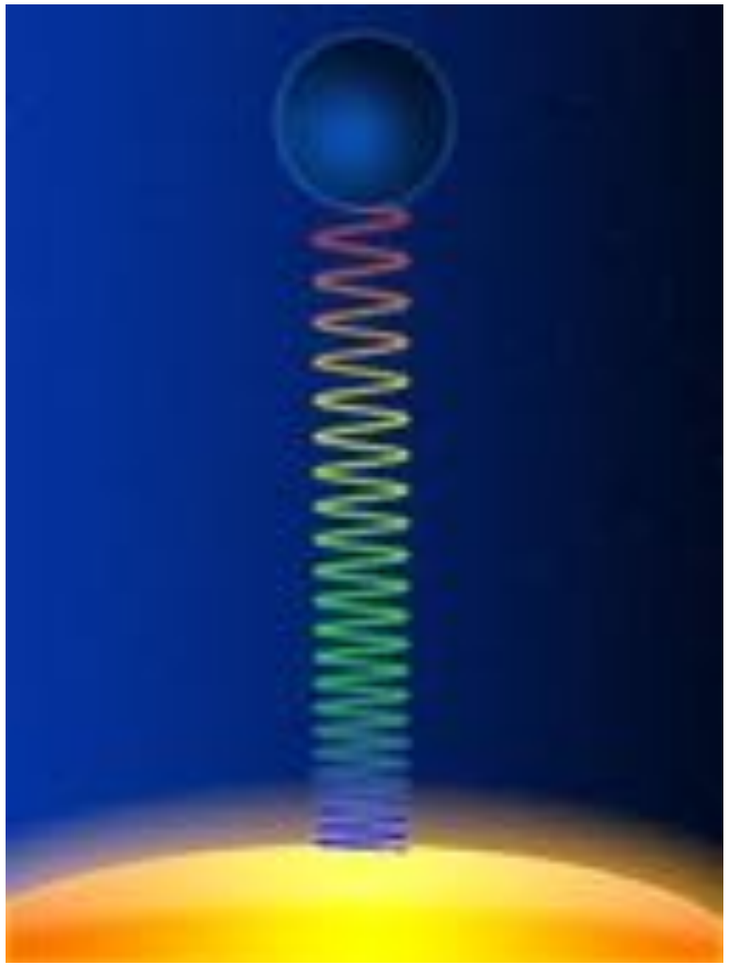
- Dos predicciones de Einstein se quedaron sin confirmación experimental durante muchos años.



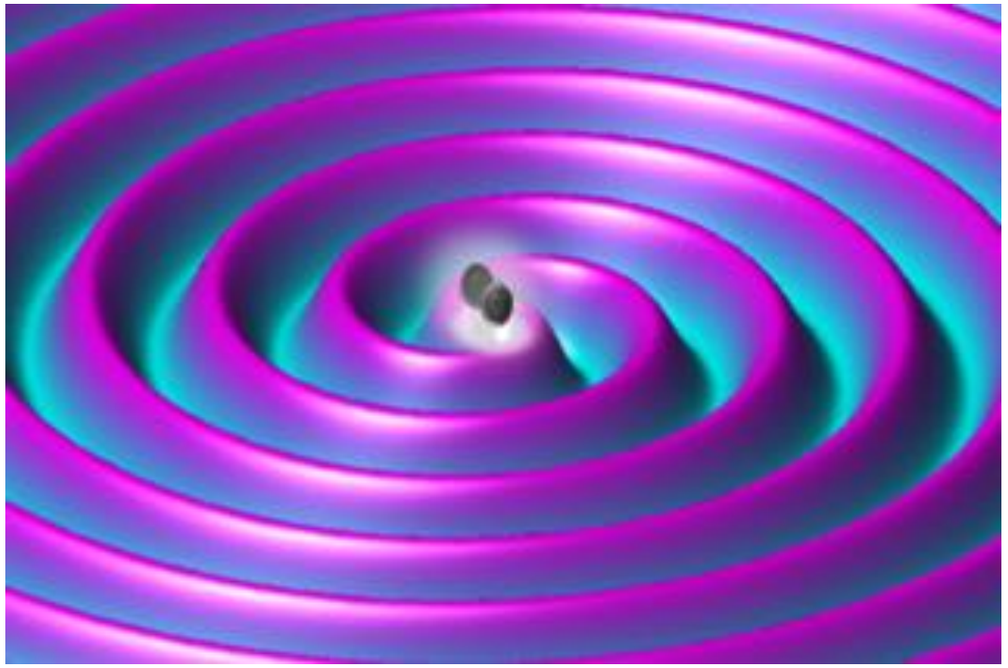
Corrimiento al rojo gravitatorio

Glaciación (1920-1960)

- Dos predicciones de Einstein se quedaron sin confirmación experimental durante muchos años.



Corrimiento al rojo gravitatorio



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

Glaciación (1920-1960)

- La tecnología de la época no permitió el desarrollo experimental del campo.

Glaciación (1920-1960)

- La tecnología de la época no permitió el desarrollo experimental del campo.

- *Sólo* hubo una serie de trabajo teóricos, relegados a las cloacas de la Astronomía y la Física… (C.M. Will, 2014).

Glaciación (1920-1960)

- La tecnología de la época no permitió el desarrollo experimental del campo.

- *Sólo* hubo una serie de trabajo teóricos, relegados a las cloacas de la Astronomía y la Física… (C.M. Will, 2014).

- Como consecuencia de todo esto, el campo se estancó.

Edad de Oro (1960-1980)

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.

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)

Edad de Oro (1960-1980)

- Una combinación de descubrimientos astronómicos (cuásares, púlsares, fondo de radiación de microondas) y de nuevas tecnologías (relojes atómicos, rastreado laser, criogenia, etc.) puso a la Relatividad General al frente de la investigación en Física.

Edad de Oro (1960-1980)

- Una combinación de descubrimientos astronómicos (cuásares, púlsares, fondo de radiación de microondas) y de nuevas tecnologías (relojes atómicos, rastreado laser, criogenia, etc.) puso a la Relatividad General al frente de la investigación en Física.

- Esta época comienza con el experimento de Pound-Rebka y acaba con el anuncio de que la evolución orbital del primer púlsar binario (Hulse-Taylor) concuerda con la propia de un sistema que emite radiación gravitatoria de acuerdo con la Relatividad General.

Edad de Oro (1960-1980)

El experimento de Pound-Rebka

Laboratorio Jefferson en la Universidad de Harvard (EEUU). El experimento tuvo lugar en la "torre" izquierda.

Edad de Oro (1960-1980)

El experimento de Pound-Rebka

Laboratorio Jefferson en la Universidad de Harvard (EEUU). El experimento tuvo lugar en la "torre" izquierda.

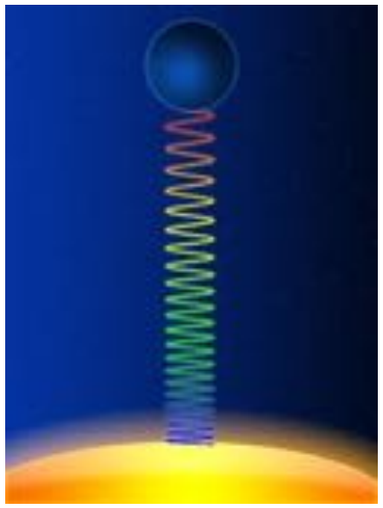
El experimento (1960-1965) midió el cambió en la frecuencia de fotones gamma emitidos por 75-Fe al ascender/descender la torre del Laboratorio Jefferson. La alta precisión que se requiere se logró usando el efecto Mössbauer para producir resonancias estrechas cuyo desplazamiento se puede medir con gran precisión.

Edad de Oro (1960-1980)

El experimento de Pound-Rebka

Laboratorio Jefferson en la Universidad de Harvard (EEUU). El experimento tuvo lugar en la "torre" izquierda.

De esta forma se estableció que la luz que se origina en un campo gravitatorio, su frecuencia disminuye (**corrimiento al rojo**) al ser observada en un región de campo gravitatorio más débil.



Edad de Oro (1960-1980)

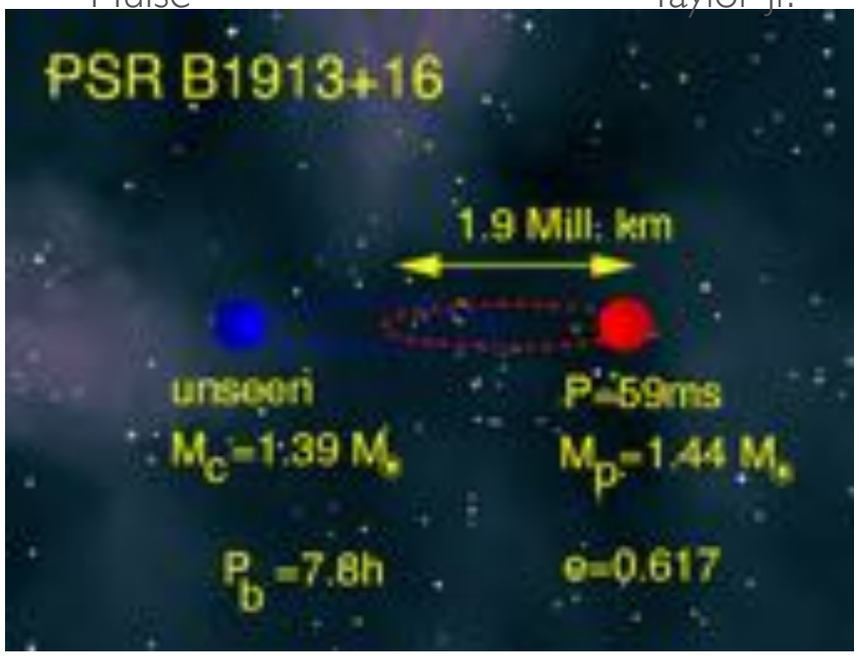
El púlsar binario de Hulse-Taylor

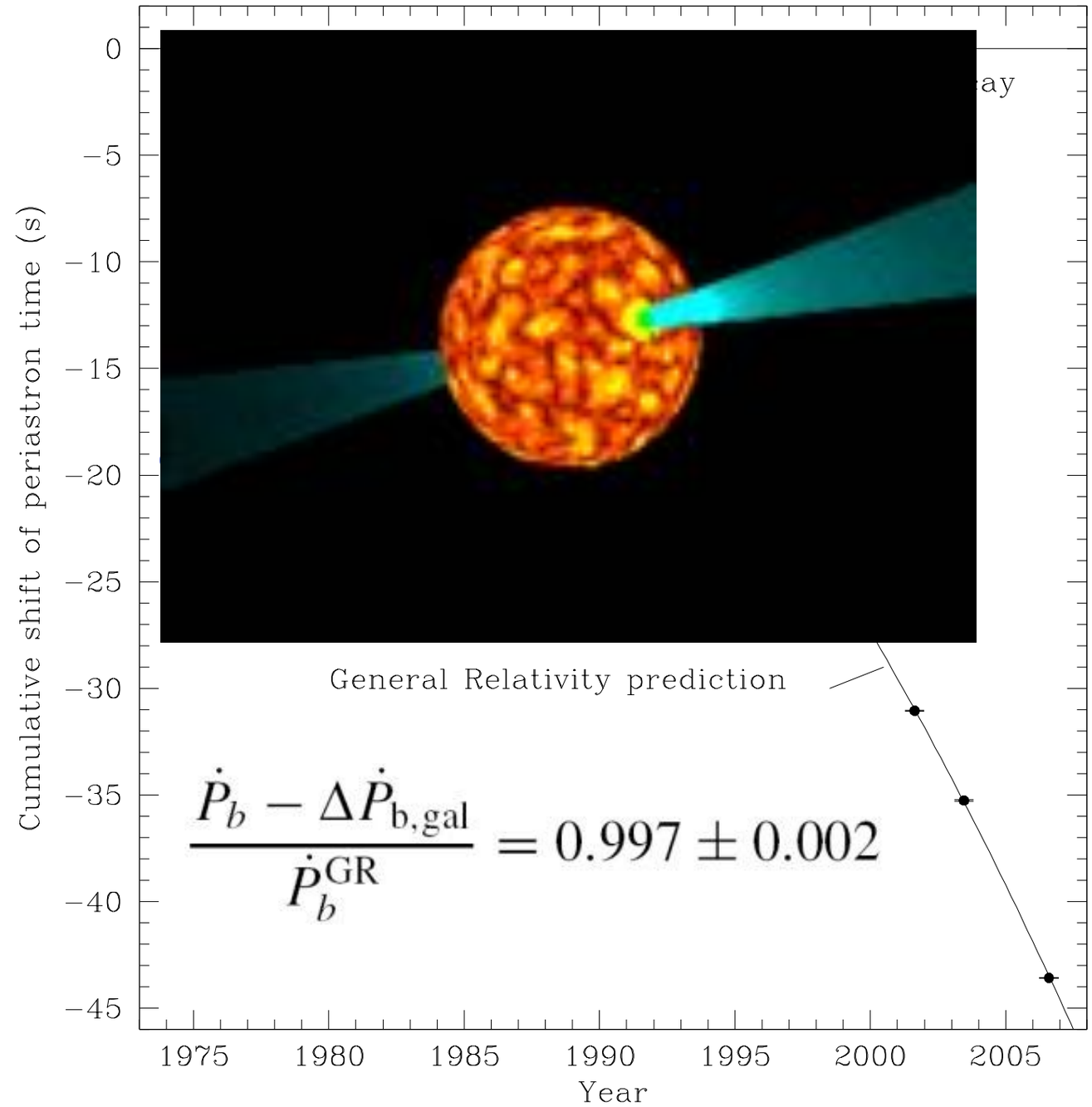
KUNGL. VETENSKAPSAKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

1993 Nobel Prize in Physics

Russell A. Hulse

Joseph H. Taylor Jr.





Weisberg, Nice & Taylor (1011.0718)
Astrophysical Journal, **722**, 1030-1034 (2010)

Edad de Oro (1960-1980)

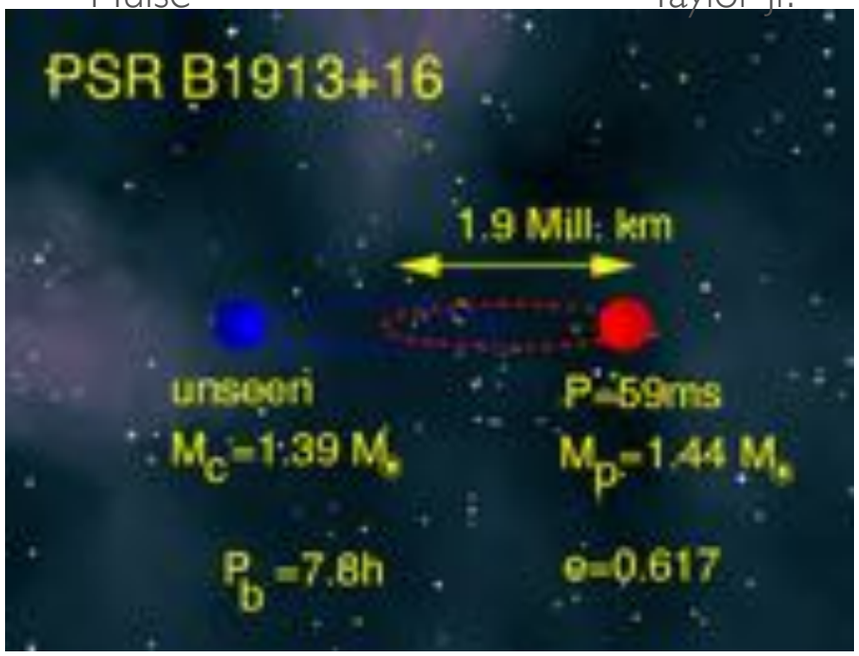
El púlsar binario de Hulse-Taylor

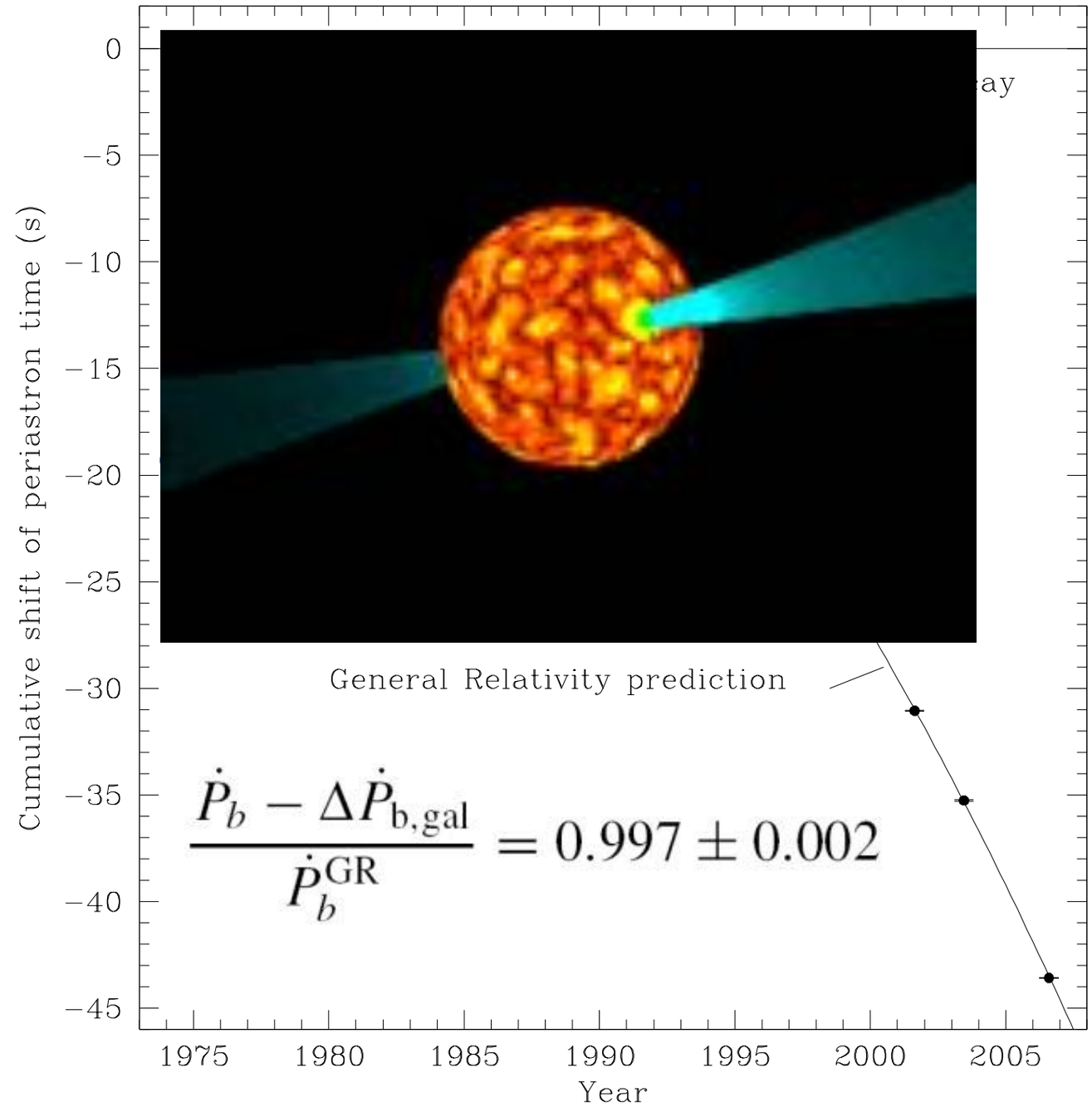
KUNGL. VETENSKAPSAKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

1993 Nobel Prize in Physics

Russell A. Hulse

Joseph H. Taylor Jr.





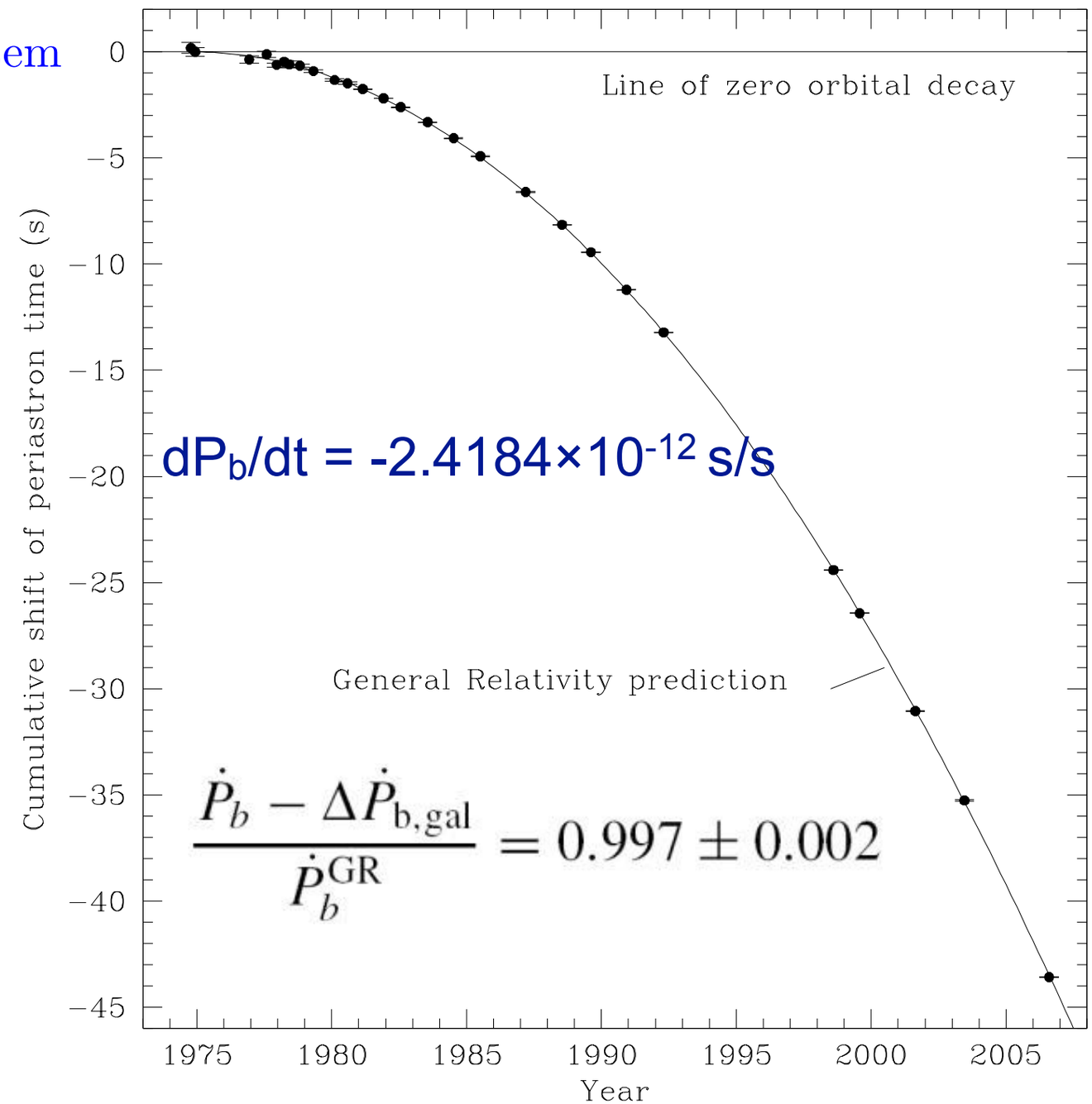
Weisberg, Nice & Taylor (1011.0718)
Astrophysical Journal, **722**, 1030-1034 (2010)

Edad de Oro (1960-1980)

El púlsar binario de Hulse-Taylor

Measured Orbital Parameters for B1913+16 System

Fitted Parameter	Value
$a_p \sin i$ (s)	2.341782 (3)
e	0.6171334 (5)
T_0 (MJD)	52144.90097841 (4)
P_b (d)	0.322997448911 (4)
ω_0 (deg)	292.54472 (6)
$\langle\dot{\omega}\rangle$ (deg/yr)	4.226598 (5)
γ (s)	0.0042992 (8)
$\dot{P}_b$ (10^{-12} s/s)...	-2.423 (1)



… La medida del ritmo de cambio del periodo orbital concuerda con lo esperado en la emisión de radiación gravitatoria, según la Relatividad General, dentro de un intervalo de *0.2%*. …

Weisberg, Nice & Taylor (1011.0718)
Astrophysical Journal, **722**, 1030-1034 (2010)

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)

- ¿Qué es la Gravedad Extrema? Usemos dos figuras de mérito:

  - Potencial Newtoniano adimensional:

$$\varepsilon \equiv \frac{\phi_{\text{Newtoniano}}}{c^2} \sim \frac{GM}{Rc^2}$$

  - Curvatura espacio-temporal asociada con el fenómeno físico concreto:

$$\xi \equiv \frac{GM}{R^3 c^2} \sim \frac{1}{\ell^2}$$

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)

- Usemos la primera (potencial newtoniano)

  - Gravedad en el Sistema Solar (avance del perihelio, arrastre de sistemas de referencia, retrasos temporales, etc.):

$$\frac{\phi_{Newtonian}}{c^2} = \frac{GM_\odot}{c^2\ 1\mathrm{AU}} \sim 10^{-8}$$

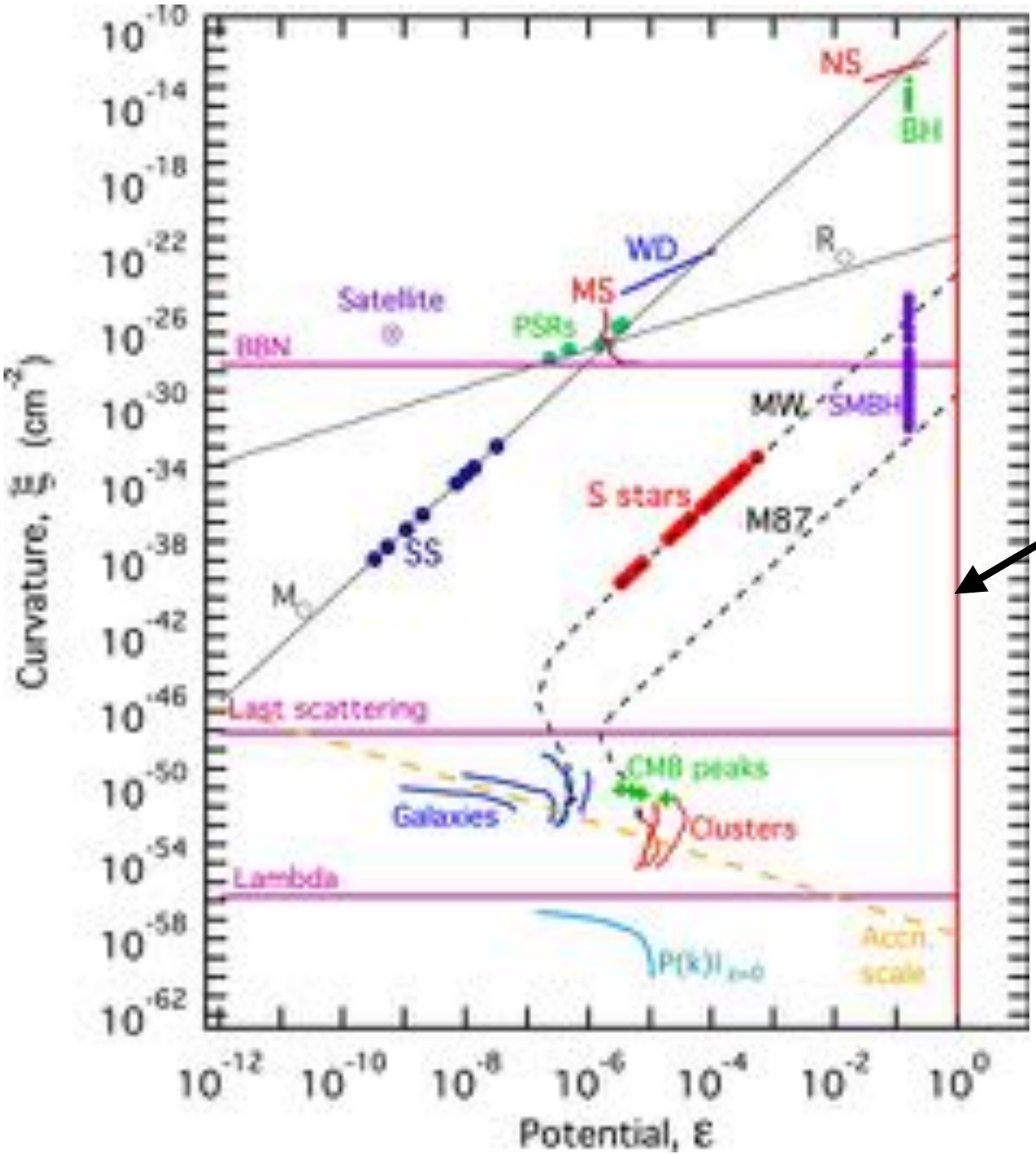
  - Gravedad con Púlsares:

$$\frac{\phi^{\mathrm{NS}}_{Newtonian}}{c^2} \sim \frac{GM_{\mathrm{NS}}}{c^2\ r_{\mathrm{NS}}} \sim 10^{-1} \qquad \frac{\phi^{\mathrm{Binary}}_{Newtonian}}{c^2} \sim \frac{GM_\odot}{c^2\ r^{\mathrm{periastron}}_{\mathrm{Hulse-Taylor}}} \sim 10^{-6}$$

  - Gravedad con estrellas de neutrones y agujeros negros:

$$\frac{\phi_{Newtonian}}{c^2} \sim \frac{GM_{\mathrm{MBH}}}{c^2\ (\mathrm{a\ few}\ r_{\mathrm{Horizon}})} \sim 10^{-1} - 1$$

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)



Horizonte de un agujero negro

Baker, Psaltis, and Skordis (2015)

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)

- Preguntas sobre Gravedad Extrema:

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)

- Preguntas sobre Gravedad Extrema:

  - Los agujeros negros de los que tenemos evidencia, ¿son como nos dice la Relatividad General?

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)

- Preguntas sobre Gravedad Extrema:

  - Los agujeros negros de los que tenemos evidencia, ¿son como nos dice la Relatividad General?

  - ¿Es válida la Relatividad General a escalas cosmológicas?

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)

- Preguntas sobre Gravedad Extrema:

  - Los agujeros negros de los que tenemos evidencia, ¿son como nos dice la Relatividad General?

  - ¿Es válida la Relatividad General a escalas cosmológicas?

  - ¿En qué condiciones podría violarse el principio de equivalencia?

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)

- Preguntas sobre Gravedad Extrema:

  - Los agujeros negros de los que tenemos evidencia, ¿son como nos dice la Relatividad General?

  - ¿Es válida la Relatividad General a escalas cosmológicas?

  - ¿En qué condiciones podría violarse el principio de equivalencia?

  - ¿En qué condiciones podría violarse la invariancia Lorenz?

Hacia la Gravedad Extrema (1980-)

- Preguntas sobre Gravedad Extrema:

  - Los agujeros negros de los que tenemos evidencia, ¿son como nos dice la Relatividad General?

  - ¿Es válida la Relatividad General a escalas cosmológicas?

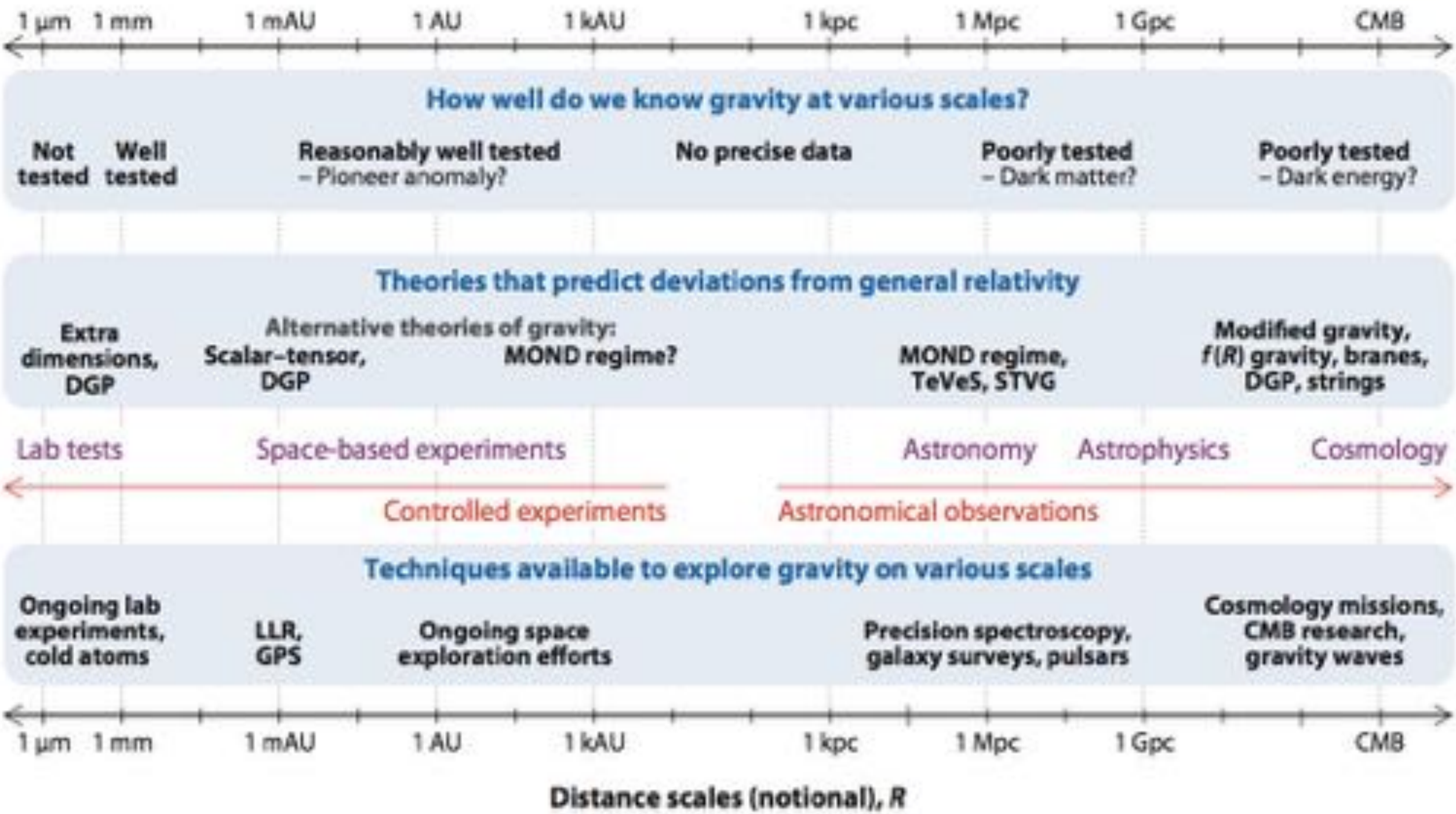
  - ¿En qué condiciones podría violarse el principio de equivalencia?

  - ¿En qué condiciones podría violarse la invariancia Lorenz?

  - Ondas gravitatorias: ¿Son como nos dice la Relatividad General?

Perspectiva Contemporánea

Tests de la RG



S.G. Turyshev (2008)

Tests de la RG

- En Relatividad General, la gravedad se describe por un tensor métrico que se acopla de forma universal a los campos material del Modelo Estándar (Principio de Equivalencia de Einstein).

Tests de la RG

- En Relatividad General, la gravedad se describe por un tensor métrico que se acopla de forma universal a los campos material del Modelo Estándar (Principio de Equivalencia de Einstein).

- Este acoplamiento universal tiene múltiples consecuencias para experimentos y observaciones (a parte del principio de equivalencia débil).

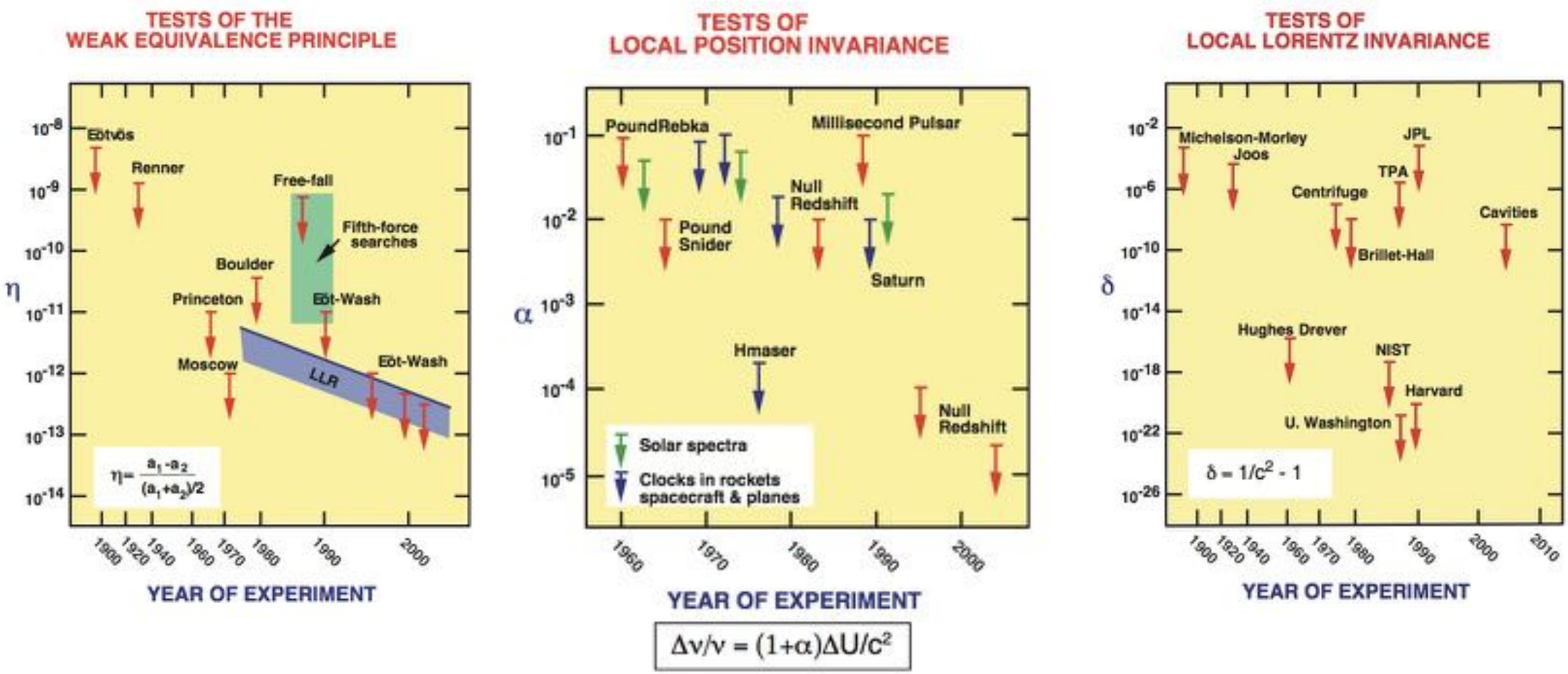
Tests de la RG

- El resultado de experimentos locales no gravitacionales, referidos a estándares locales, no depende ni de donde, ni de cuando, ni en que sistema de referencia localmente inercial el experimento tiene lugar.

Tests de la RG

- El resultado de experimentos locales no gravitacionales, referidos a estándares locales, no depende ni de donde, ni de cuando, ni en que sistema de referencia localmente inercial el experimento tiene lugar.
- Esto significa que experimentos locales no deben notar ni la evolución cosmológica del Universo (*constancia de las constantes*) ni deben exhibir direcciones preferentes en el espacio-tiempo (isotropía del espacio, invariancia Lorenz local).

Tests de la RG



C.M.Will (2014)

Tests de la RG

Constant k	Limit on $\dot{k}/k$ (yr^{-1})	Redshift	Method
Fine structure constant ($\alpha_{\mathrm{EM}} = e^2/\hbar c$)	$< 30 \times 10^{-16}$	0	Clock comparisons [181, 31, 111, 209]
	$< 0.5 \times 10^{-16}$	0.15	Oklo Natural Reactor [72, 116, 210]
	$< 3.4 \times 10^{-16}$	0.45	^{187}Re decay in meteorites [205]
	$(6.4 \pm 1.4) \times 10^{-16}$	0.2–3.7	Spectra in distant quasars [269, 193]
	$< 1.2 \times 10^{-16}$	0.4–2.3	Spectra in distant quasars [242, 51]
Weak interaction constant ($\alpha_{\mathrm{W}} = G_{\mathrm{f}} m_{\mathrm{p}}^2 c/\hbar^3$)	$< 1 \times 10^{-11}$	0.15	Oklo Natural Reactor [72]
	$< 5 \times 10^{-12}$	10^9	Big Bang nucleosynthesis [179, 223]
e-p mass ratio	$< 3 \times 10^{-15}$	2.6–3.0	Spectra in distant quasars [135]

Cotas en cambios de constantes no gravitacionales

C.M. Will (2014)

Tests de la RG

Method	$\dot{G}/G$ $(10^{-13}\ \mathrm{yr}^{-1})$	Reference
Lunar laser ranging	4 ± 9	[295]
Binary pulsar $1913+16$	40 ± 50	[143]
Helioseismology	0 ± 16	[122]
Big Bang nucleosynthesis	0 ± 4	[65, 21]

C.M.Will (2006)

Tests de la RG

Parameter	What it measures relative to GR	Value in GR	Value in semi-conservative theories	Value in fully conservative theories
γ	How much space-curvature produced by unit rest mass?	1	γ	γ
β	How much "nonlinearity" in the superposition law for gravity?	1	β	β
ξ	Preferred-location effects?	0	ξ	ξ
α_1	Preferred-frame effects?	0	α_1	0
α_2		0	α_2	0
α_3		0	0	0
α_3	Violation of conservation of total momentum?	0	0	0
ζ_1		0	0	0
ζ_2		0	0	0
ζ_3		0	0	0
ζ_4		0	0	0

C.M.Will (2014)

$$g_{00} = -1 + 2U - 2\beta U^2 - 2\xi\Phi_W + (2\gamma + 2 + \alpha_3 + \zeta_1 - 2\xi)\Phi_1 + 2(3\gamma - 2\beta + 1 + \zeta_2 + \xi)\Phi_2 + 2(1+\zeta_3)\Phi_3 + 2(3\gamma + 3\zeta_4 - 2\xi)\Phi_4 - (\zeta_1 - 2\xi)\mathcal{A} - (\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)w^2 U - \alpha_2 w^i w^j U_{ij} + (2\alpha_3 - \alpha_1)w^i V_i + \mathcal{O}(\epsilon^3),$$

$$g_{0i} = -\frac{1}{2}(4\gamma + 3 + \alpha_1 - \alpha_2 + \zeta_1 - 2\xi)V_i - \frac{1}{2}(1 + \alpha_2 - \zeta_1 + 2\xi)W_i - \frac{1}{2}(\alpha_1 - 2\alpha_2)w^i U - \alpha_2 w^j U_{ij} + \mathcal{O}(\epsilon^{5/2}),$$

$$g_{ij} = (1 + 2\gamma U)\delta_{ij} + \mathcal{O}(\epsilon^2).$$

Formalismo Parametrizado Post-Newtoniano (PPN)

Tests de la RG

Parameter	Effect	Limit	Remarks
$\gamma - 1$	time delay	2.3×10^{-5}	Cassini tracking
	light deflection	2×10^{-4}	VLBI
$\beta - 1$	perihelion shift	8×10^{-5}	$J_{2\odot} = (2.2 \pm 0.1) \times 10^{-7}$
	Nordtvedt effect	2.3×10^{-4}	$\eta_N = 4\beta - \gamma - 3$ assumed
ξ	spin precession	4×10^{-9}	millisecond pulsars
α_1	orbital polarization	10^{-4}	Lunar laser ranging
		4×10^{-5}	PSR J1738+0333
α_2	spin precession	2×10^{-9}	millisecond pulsars
α_3	pulsar acceleration	4×10^{-20}	pulsar $\dot{P}$ statistics
ζ_1	—	2×10^{-2}	combined PPN bounds
ζ_2	binary acceleration	4×10^{-5}	$\ddot{P}_p$ for PSR 1913+16
ζ_3	Newton's 3rd law	10^{-8}	lunar acceleration
ζ_4	—	—	not independent

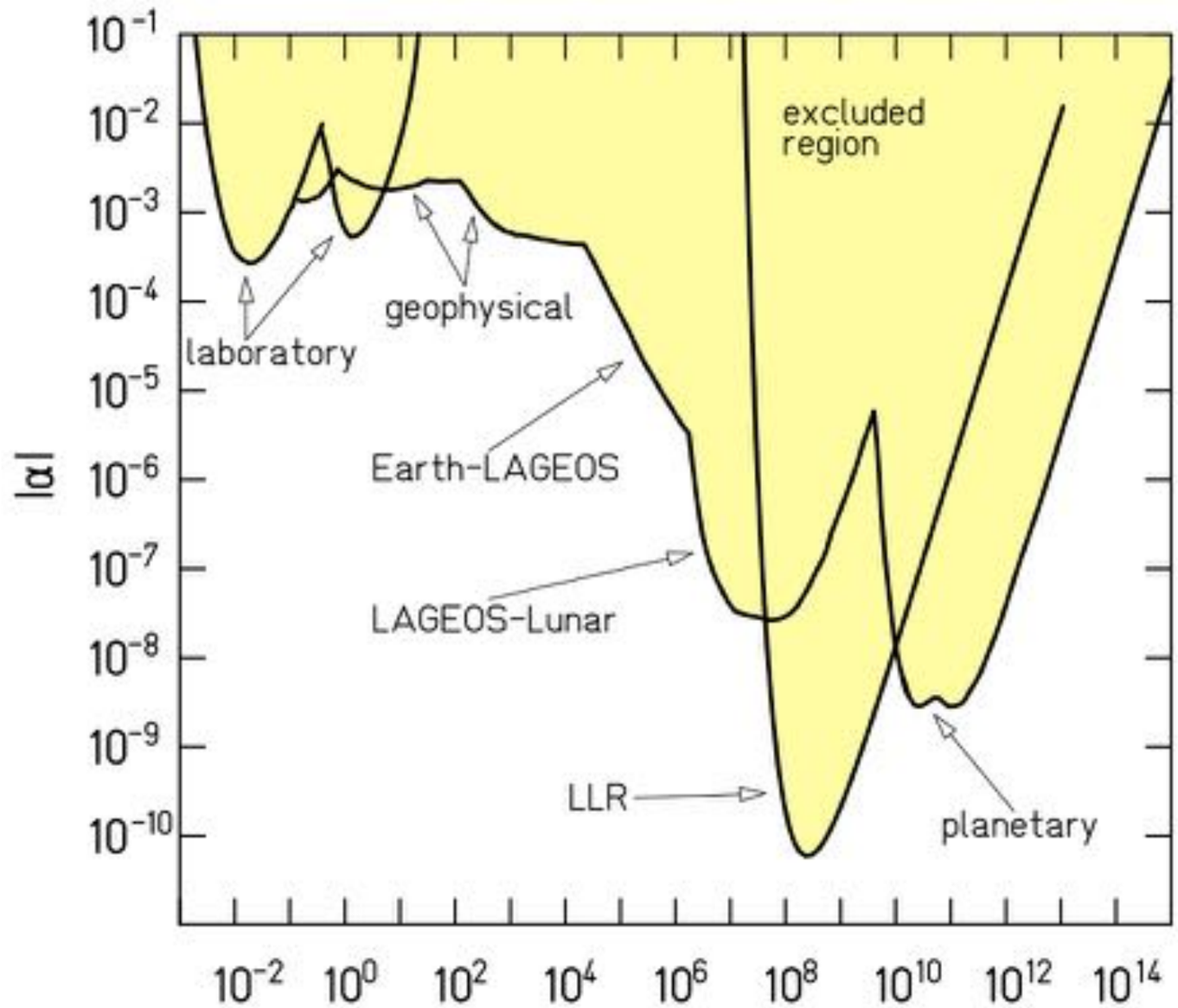
C.M.Will (2014)

Tests de la RG

- Modificaciones de la Gravedad Newtoniana

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}\left[1 + \alpha\left(1 + \frac{r}{\lambda}\right)e^{-r/\lambda}\right]$$

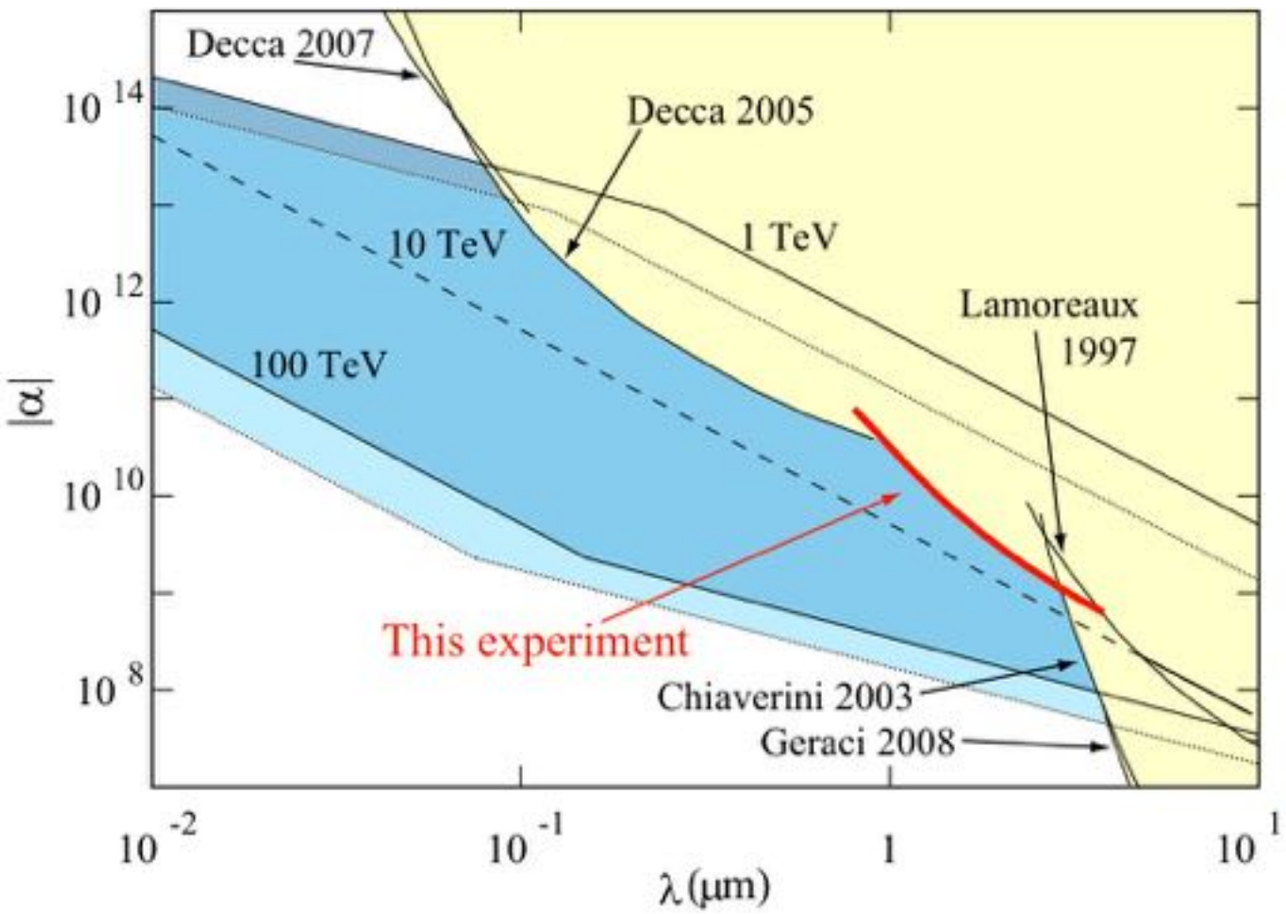
Esto incluye bosones gauge; modelos con dimensiones extra; etc.

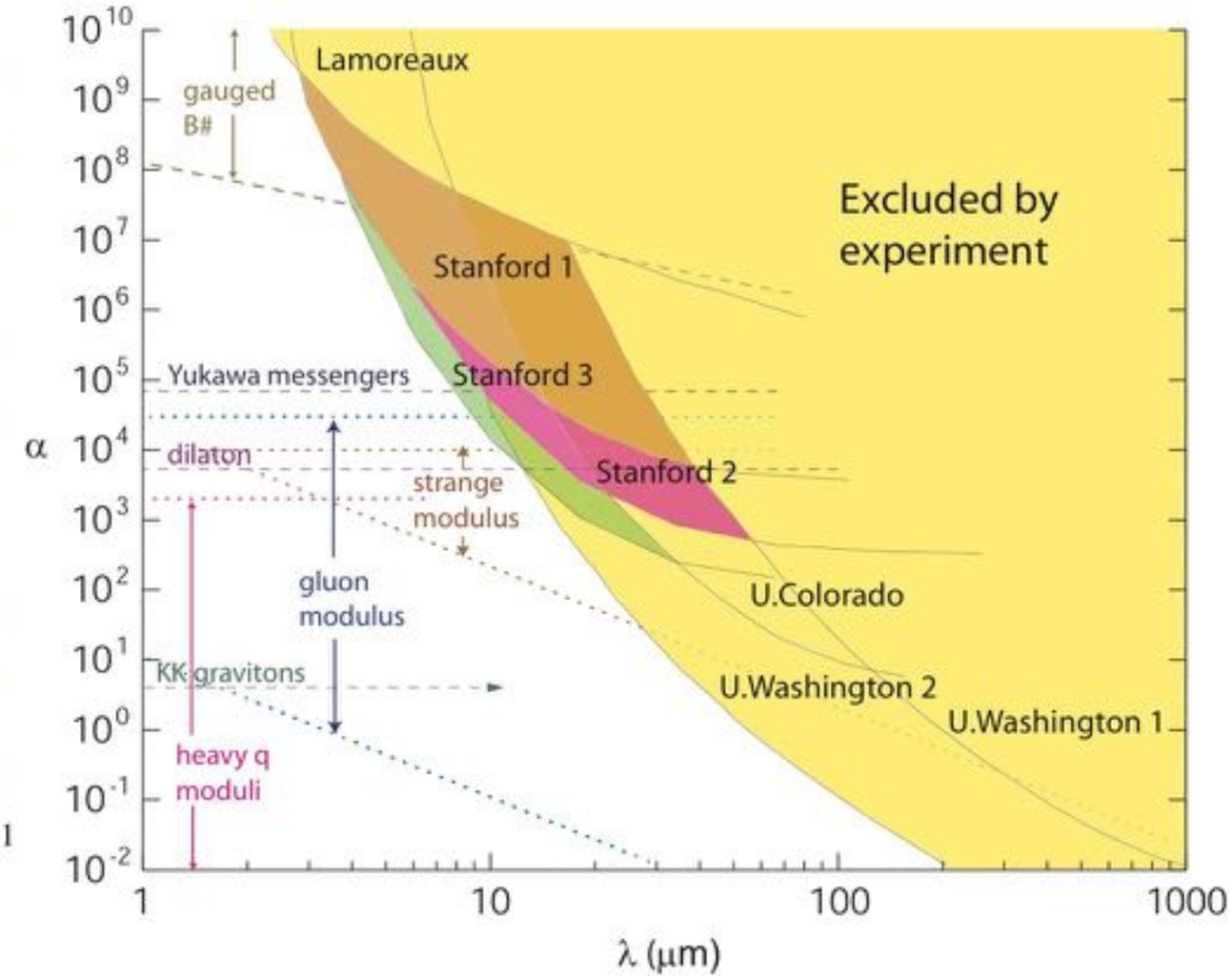


Blayne Heckel

Tests de la RG

- Modificaciones de rango corto de la Gravedad Newtoniana



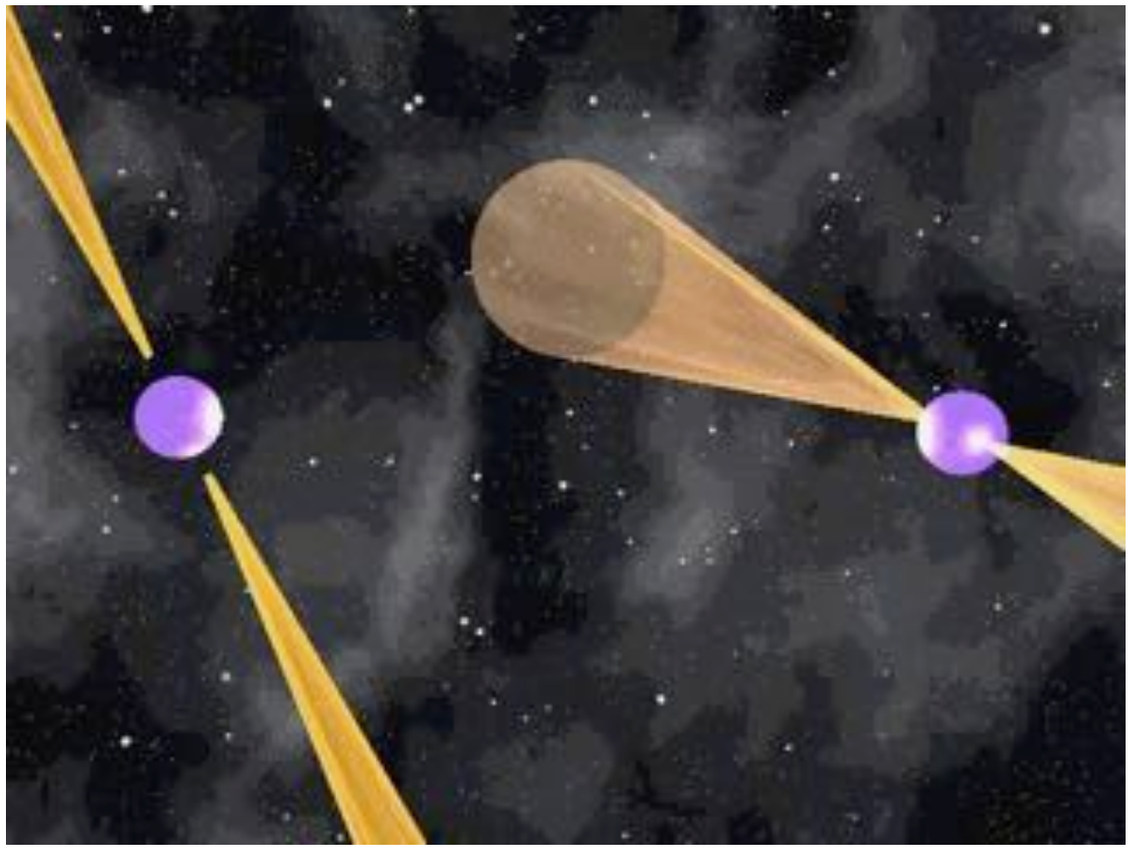


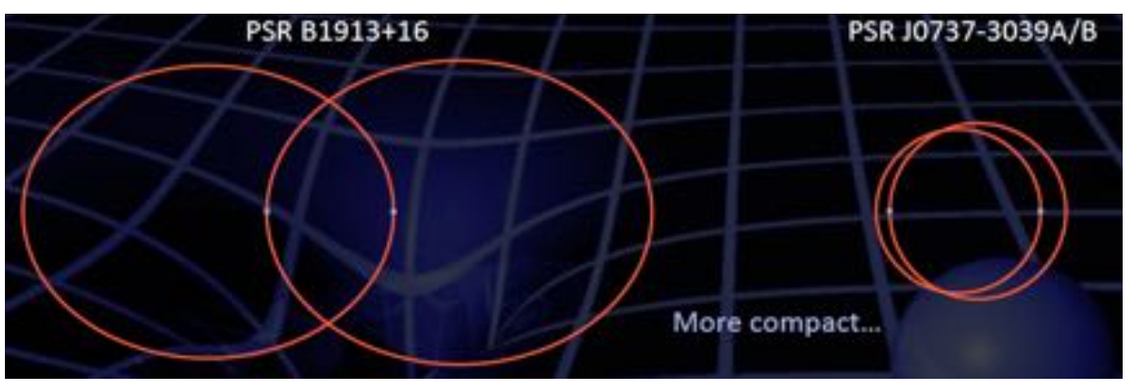
M. Masuda, M. Sasaki: *Limits on Nonstandard Forces in the Submicrometer Range*.
Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 171101

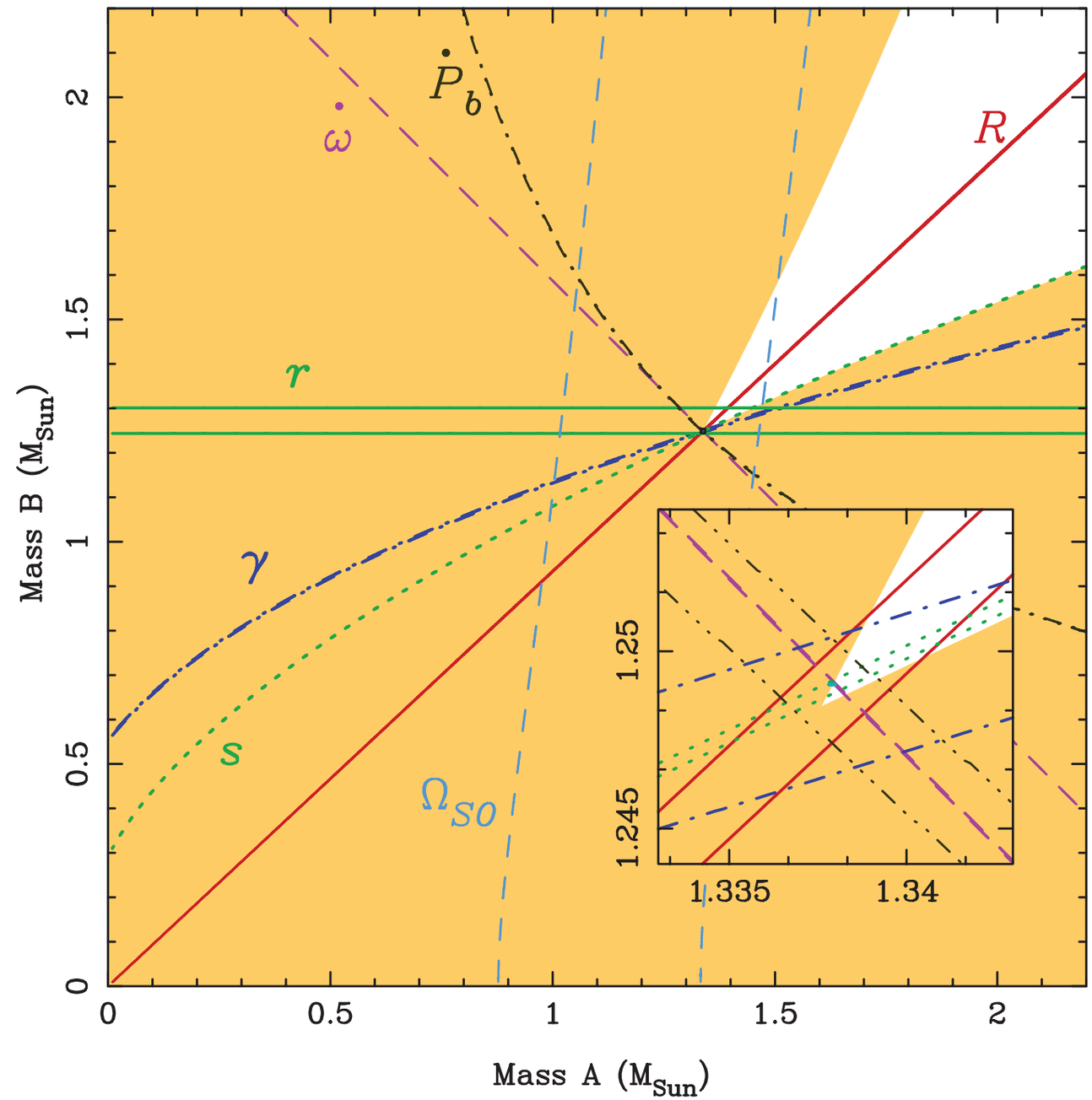
A.A. Geraci et al: *Improved constraints on non-Newtonian forces at 10 microns.*
Phys. Rev. D**78** (2008) 022002

Tests de la RG

- Tests con púlsares: PSR J0737-3039A/B, el único púlsar doble conocido. Tests de RG al 0.05%.

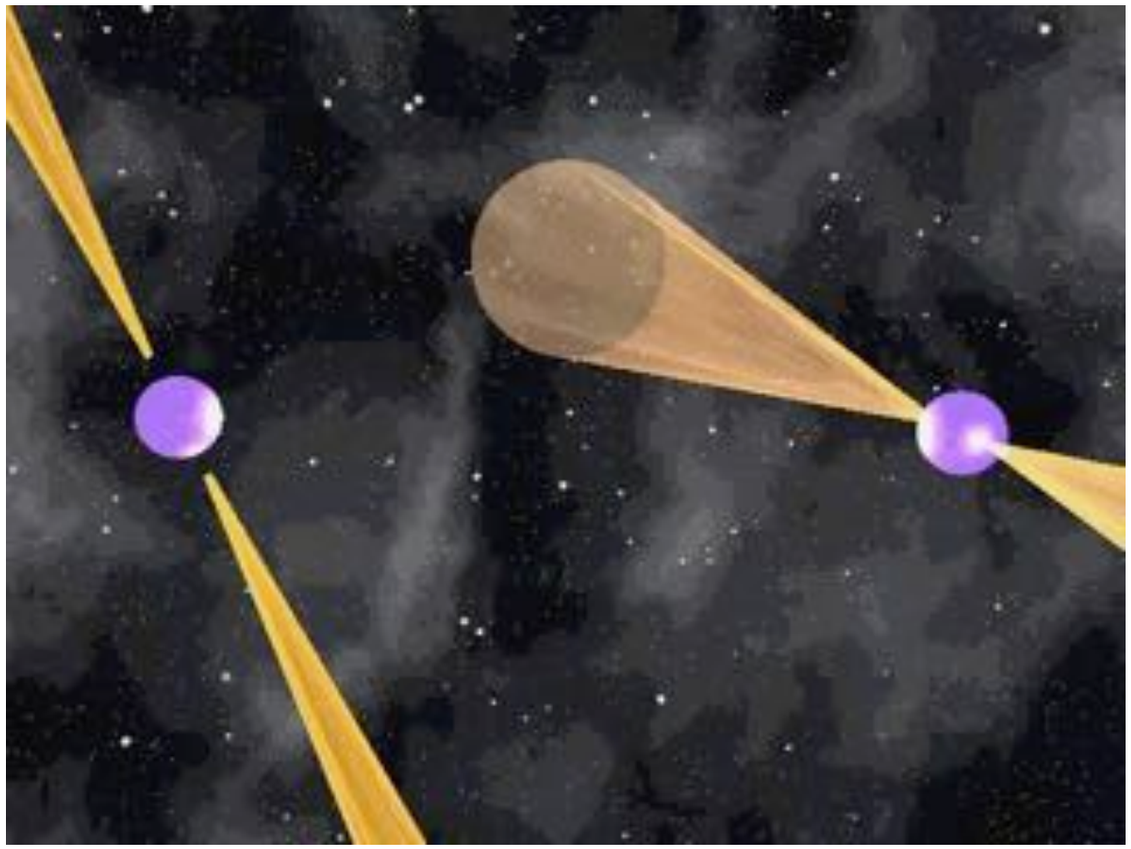


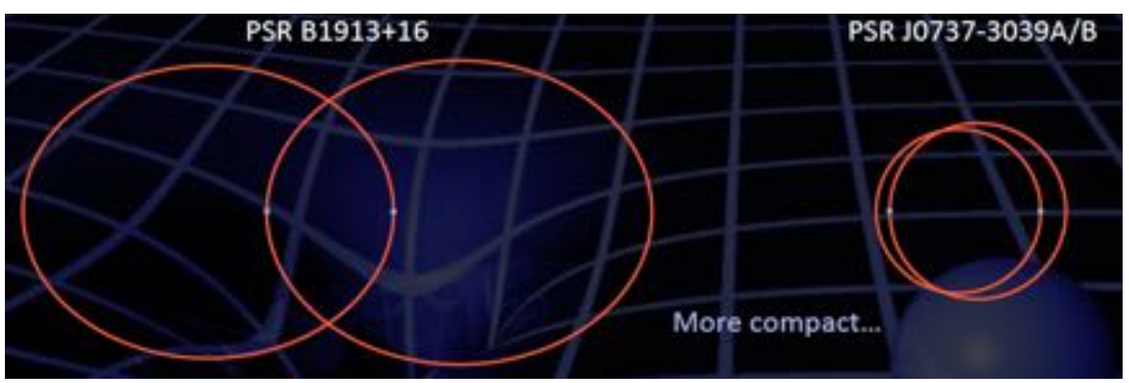


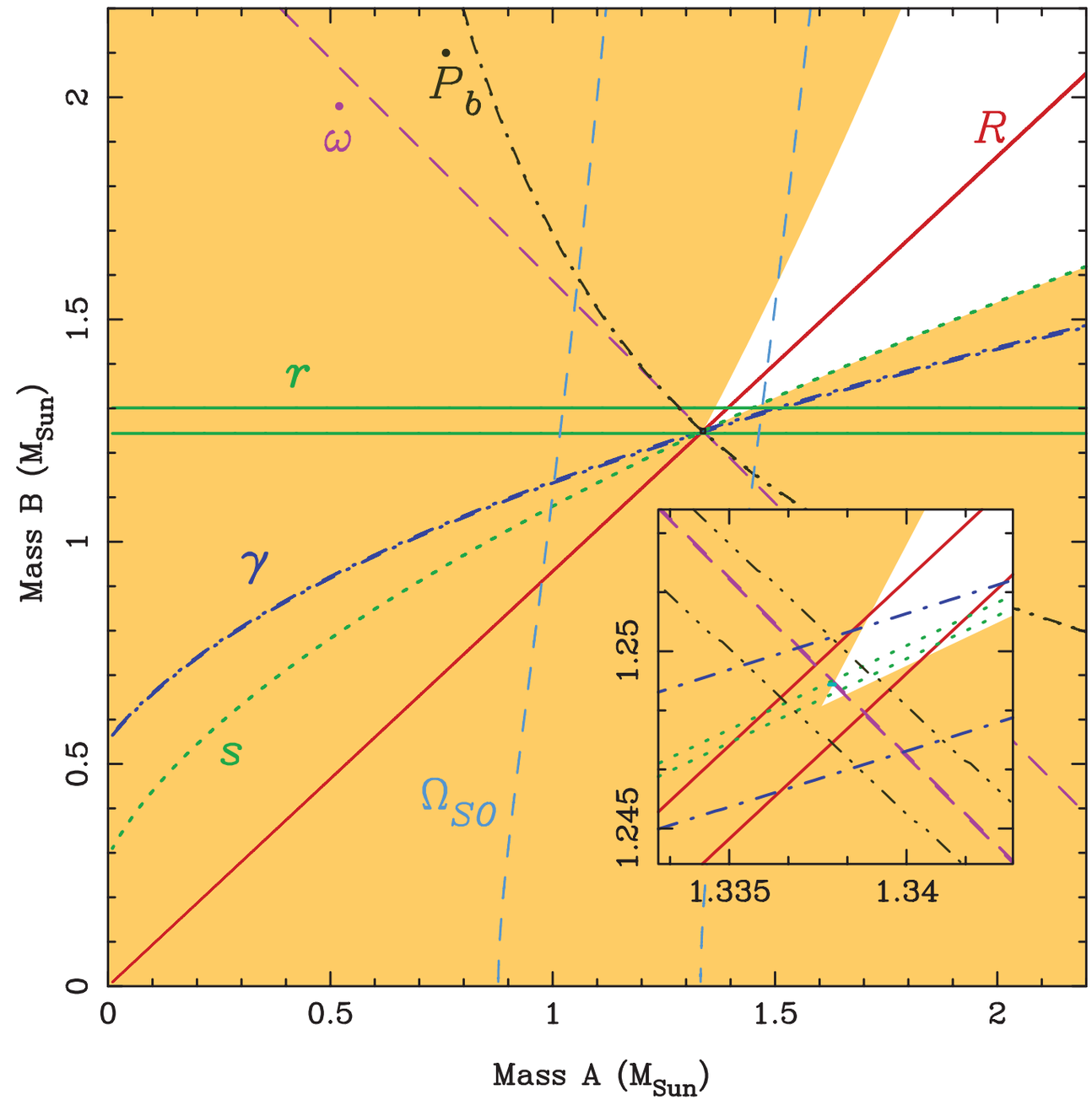


Tests de la RG

- Tests con púlsares: PSR J0737-3039A/B, el único púlsar doble conocido. Tests de RG al 0.05%.







Tests de la RG

- Gravito-Magnetismo: **Gravity Probe B**

Tests de la RG

- Gravito-Magnetismo: **Gravity Probe B**

La Relatividad General nos dice que no solo la masa, sino también el momento de la materia (lineal y angular) gravity produciendo efectos similares a los de los campos magnéticos: Gravito-magnetismo.

Tests de la RG

- Gravito-Magnetismo: **Gravity Probe B**

La Relatividad General nos dice que no solo la masa, sino también el momento de la materia (lineal y angular) gravity produciendo efectos similares a los de los campos magnéticos: Gravito-magnetismo.

En particular, materia en rotación arrastra los sistemas de referencia inerciales (efecto Lense-Thirring).

Tests de la RG

- Gravito-Magnetismo: **Gravity Probe B**

La Relatividad General nos dice que no solo la masa, sino también el momento de la materia (lineal y angular) gravity produciendo efectos similares a los de los campos magnéticos: Gravito-magnetismo.

En particular, materia en rotación arrastra los sistemas de referencia inerciales (efecto Lense-Thirring).

Además, si el sistema de referencia está en rotación se produce un efecto de precesión del spin (*geodetic precession*).

Tests de la RG

- Gravito-Magnetismo: **Gravity Probe B**

Tests de la RG

- Gravito-Magnetismo: **Gravity Probe B**

Gravity Probe B (Stanford + NASA) llevaron a cabo un experimento (2004-2005) para medir los dos efectos (Lense-Thirring y *geodetic precession*)

Tests de la RG

- Gravito-Magnetismo: **Gravity Probe B**

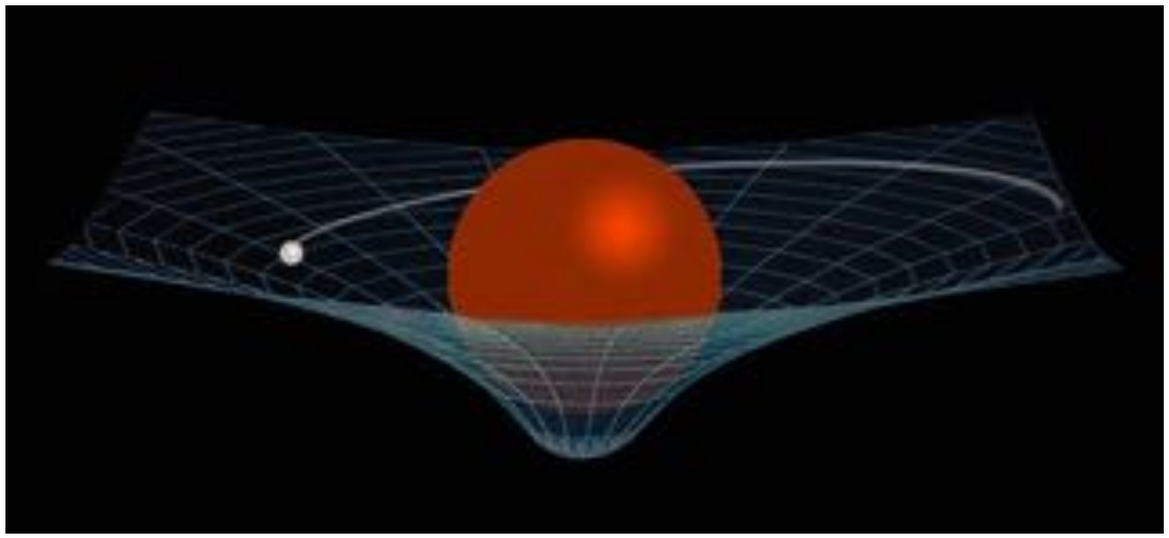
Gravity Probe B (Stanford + NASA) llevaron a cabo un experimento (2004-2005) para medir los dos efectos (Lense-Thirring y *geodetic precession*)

Después de muchas dificultades los resultados están de acuerdo con la RG con una precisión de 0.3% (*geodetic precession*) y 20% (Lense-Thirring).

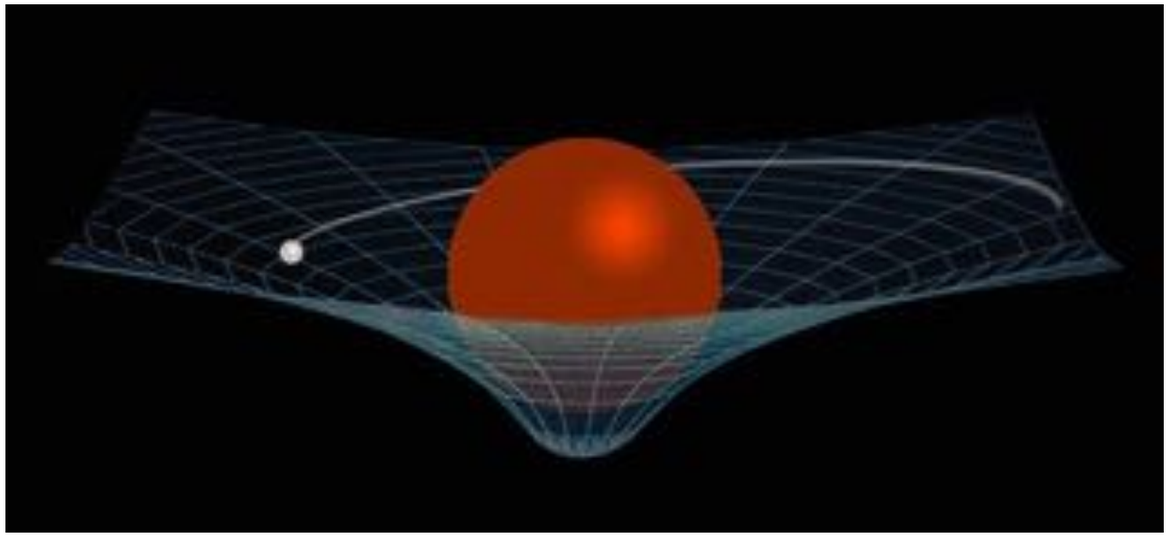
Las Ondas Gravitatorias: Intentando "escuchar" el Universo

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- En Relatividad General la gravedad es una manifestación de la geometría del espacio-tiempo.

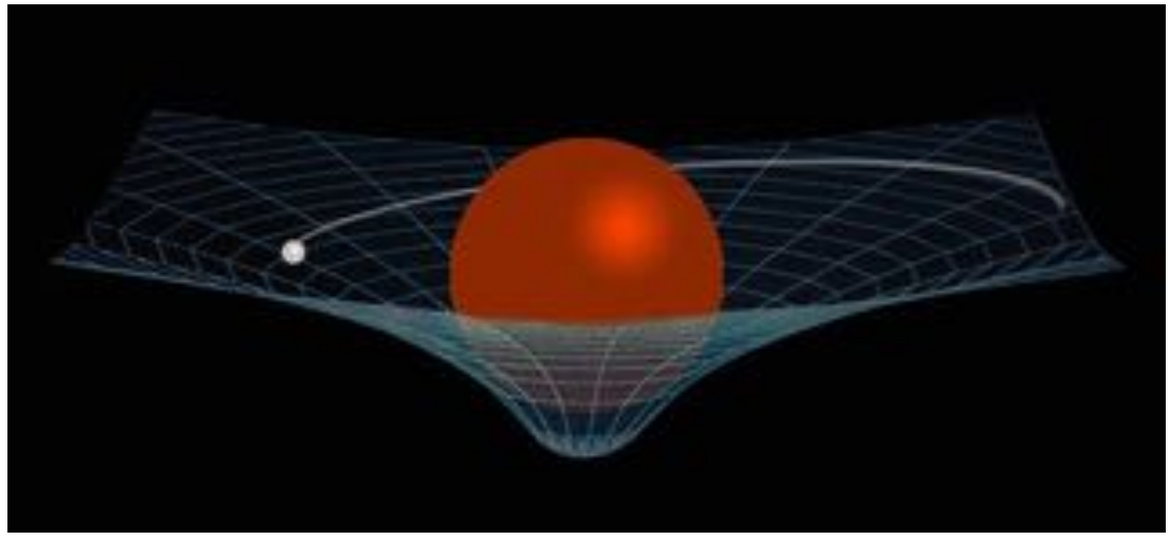


Astronomía de Ondas Gravitatorias

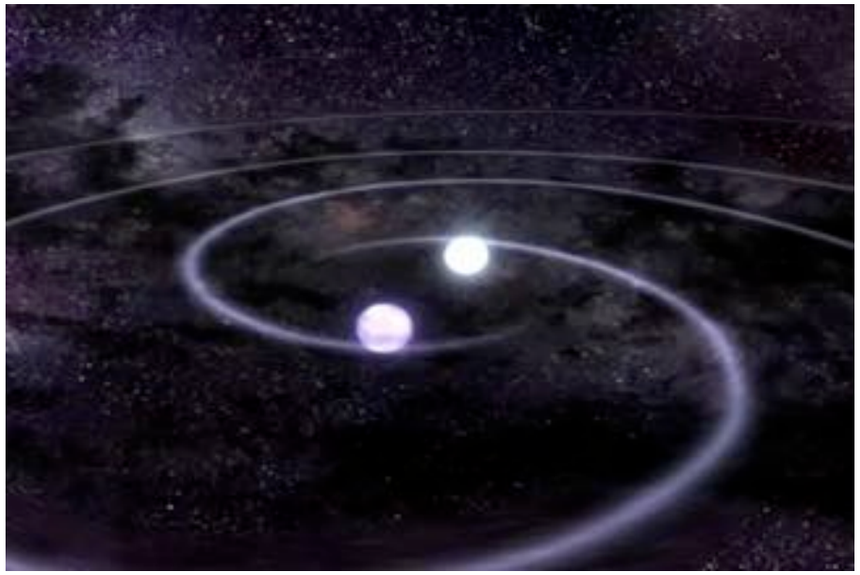


- En Relatividad General la gravedad es una manifestación de la geometría del espacio-tiempo.
- Las ondas gravitatorias (Einstein 1916, 1918) son una consecuencia de que la gravedad, en Relatividad General, es un fenómeno causal (se propaga a una velocidad finita, la de la luz).

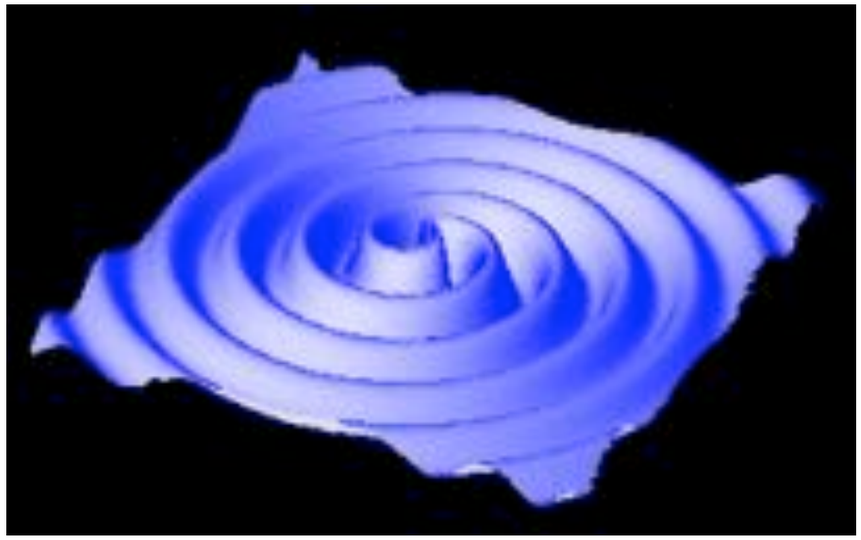
Astronomía de Ondas Gravitatorias



- En Relatividad General la gravedad es una manifestación de la geometría del espacio-tiempo.



- Las ondas gravitatorias (Einstein 1916, 1918) son una consecuencia de que la gravedad, en Relatividad General, es un fenómeno causal (se propaga a una velocidad finita, la de la luz).



- Son variaciones en la geometría espacio-temporal generadas por cambios en la distribución de energía y momento.

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- **Efecto sobre la materia**: Las Ondas Gravitatorias cambian la distancia propia entre dos objetos:

$$\Delta L = h \times L$$

Cambio en la Distancia — **Amplitud de la Onda** — **Distancia**

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- **Efecto sobre la materia**: Las Ondas Gravitatorias cambian la distancia propia entre dos objetos:

$$\Delta L = h \times L$$

Cambio en la Distancia — **Amplitud de la Onda** — **Distancia**

Concepto de Detección!

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Similitudes: Son ondas transversales que viajan a la velocidad de la luz (300 000 km/s).

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Similitudes: Son ondas transversales que viajan a la velocidad de la luz (300 000 km/s).

Diferencias en su naturaleza

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Similitudes: Son ondas transversales que viajan a la velocidad de la luz (300 000 km/s).

Diferencias en su naturaleza

OEMs son generadas por cargas aceleradas

OGs son generadas por distribuciones de energía/ momento *aceleradas*

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Similitudes: Son ondas transversales que viajan a la velocidad de la luz (300 000 km/s).

Diferencias en su naturaleza

OEMs son generadas por cargas aceleradas	OGs son generadas por distribuciones de energía/ momento *aceleradas*
Spin 1	Spin 2

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Similitudes: Son ondas transversales que viajan a la velocidad de la luz (300 000 km/s).

Diferencias en su naturaleza

OEMs son generadas por cargas aceleradas	OGs son generadas por distribuciones de energía/ momento *aceleradas*
Spin 1	Spin 2
El Dipolo es el multipolo más bajo que puede dar lugar a OEMs. (conservación de la carga)	El Cuadrupolo es el multipolo más bajo que puede dar lugar a OGs. (conservación de masa y momento)

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Diferencias en la generación/detección

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Diferencias en la generación/detección

Las OEMs se generan en interacciones entre electrones, núcleos, etc. dentro de las fuentes astrofísicas:

$$\lambda_{\rm EM} \ll L_{\rm source}$$

Las OGs se generan en los cambios temporales de la distribución global de materia y energía de la fuente:

$$\lambda_{\rm GW} \sim L_{\rm source}$$

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Diferencias en la generación/detección

Las OEMs se generan en interacciones entre electrones, núcleos, etc. dentro de las fuentes astrofísicas:

$$\lambda_{\rm EM} \ll L_{\rm source}$$

Las OGs se generan en los cambios temporales de la distribución global de materia y energía de la fuente:

$$\lambda_{\rm GW} \sim L_{\rm source}$$

Con OEMs podemos construir imágenes de las fuentes.

Las OGs no son buenas para producir imágenes de las fuentes.
La información se extrae con métodos "auditivos" (*matched filter*)

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Diferencias en la generación/detección

Las OEMs se generan en interacciones entre electrones, núcleos, etc. dentro de las fuentes astrofísicas:	Las OGs se generan en los cambios temporales de la distribución global de materia y energía de la fuente:
$\lambda_{\rm EM} \ll L_{\rm source}$	$\lambda_{\rm GW} \sim L_{\rm source}$
Con OEMs podemos construir imágenes de las fuentes.	Las OGs no son buenas para producir imágenes de las fuentes. La información se extrae con métodos "auditivos" (*matched filter*)
No es necesario en general tener una modelización precisa de la emisión	Es crucial tener una modelización muy precisa de la emisión

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Diferencias en la generación/detección

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Diferencias en la generación/detección

Detección basada en la deposición de energía (fotones) en el detector:

$$L_{\rm EM} \sim \frac{1}{D_L^2}$$

Detección basada en la estimación del campo gravitatorio radiativo (h~1/D), no en su flujo de energía:

$$L_{\rm GW} \sim \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \sim \frac{1}{D_L^2}$$

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Comparación entre ondas electromagnéticas y gravitatorias:

Diferencias en la generación/detección

Detección basada en la deposición de energía (fotones) en el detector:

$$L_{\rm EM} \sim \frac{1}{D_L^2}$$

La interacción con la materia es importante: dispersión, absorción, …

Detección basada en la estimación del campo gravitatorio radiativo (h~1/D), no en su flujo de energía:

$$L_{\rm GW} \sim \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \sim \frac{1}{D_L^2}$$

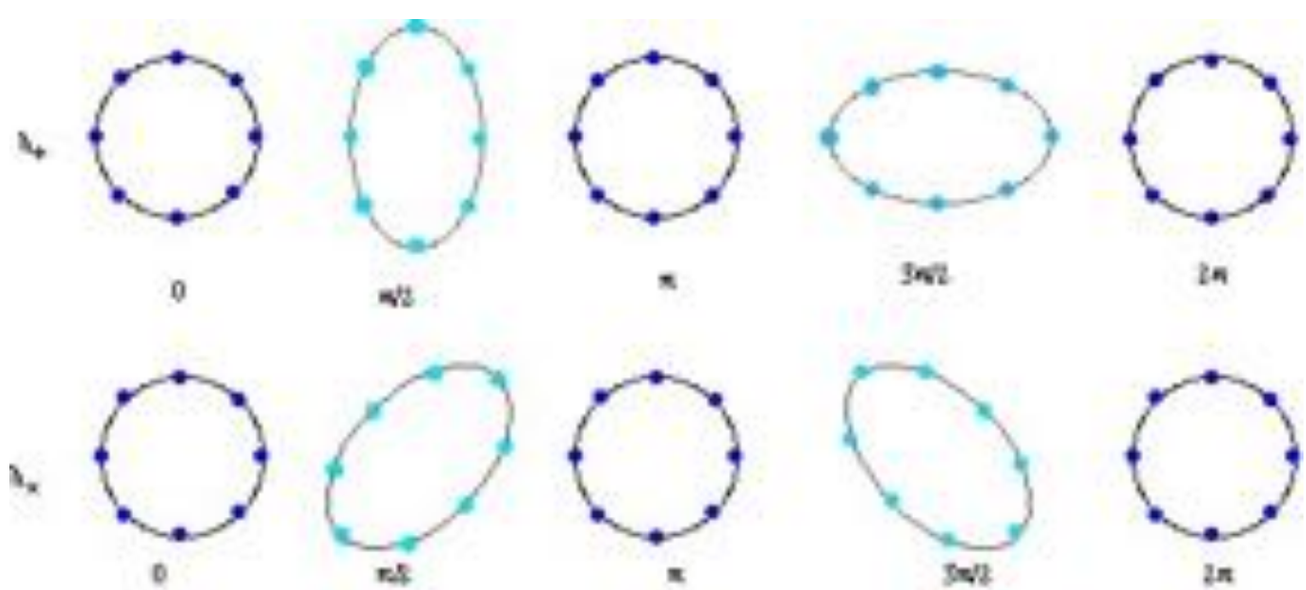
Muy débil interacción con la materia: dispersion y absorción despreciables.

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Dos polarizaciones independientes (en Relatividad General):

Polarización +

Polarización x

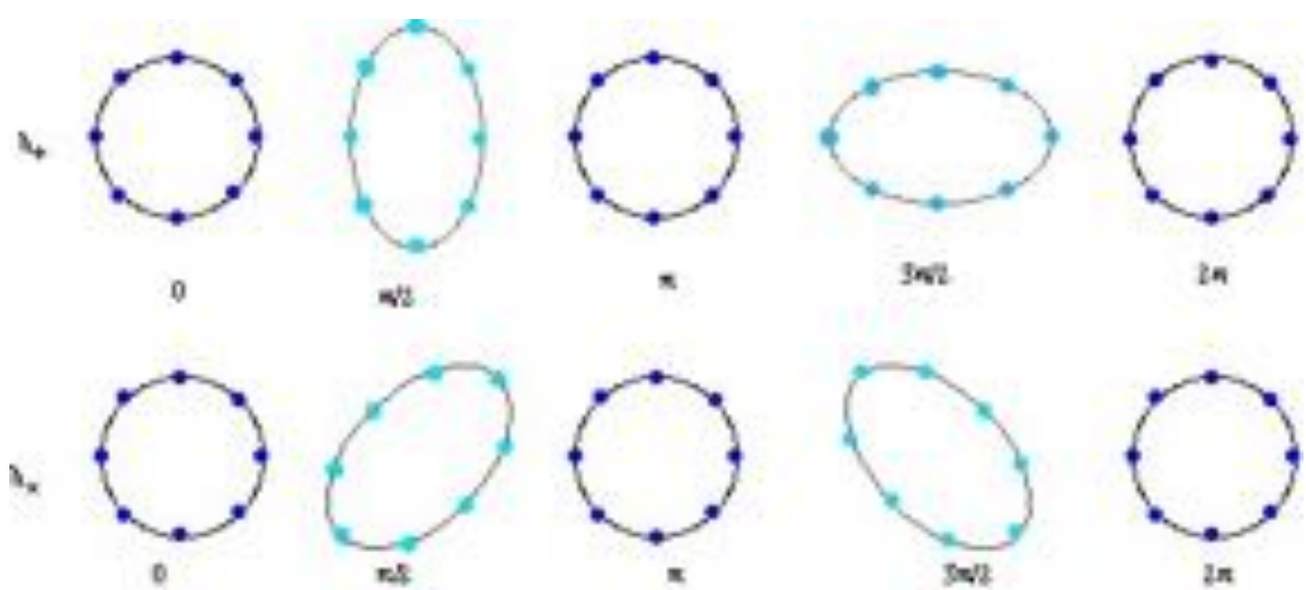


Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Dos polarizaciones independientes (en Relatividad General):

Polarización +

Polarización x



Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Amplitud de las Ondas Gravitatorias:

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Amplitud de las Ondas Gravitatorias:
  - Usando la aproximación cuadrupolar:

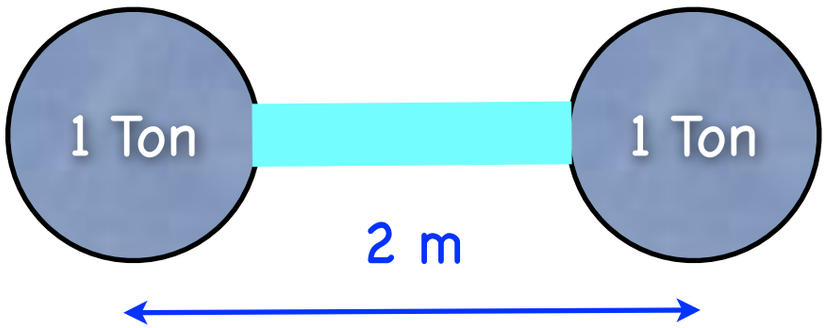
$$\frac{\Delta L}{L} = h \sim \frac{G\ddot{Q}}{c^4\, r}\,, \quad Q \sim M_{\rm total} R^2 \;\Rightarrow\; \ddot{Q} \sim M_{\rm total} v^2$$

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Amplitud de las Ondas Gravitatorias:
  - Usando la aproximación cuadrupolar:

$$\frac{\Delta L}{L} = h \sim \frac{G\ddot{Q}}{c^4\, r}\,, \quad Q \sim M_{\rm total} R^2 \;\Rightarrow\; \ddot{Q} \sim M_{\rm total} v^2$$

  - En un laboratorio:



$$f \sim 1kHz \quad \Rightarrow \quad h \sim 10^{-37}\,\frac{1\,km}{D_{\rm detector}}$$

$$\Delta L \sim 10^{-33} m \left(\frac{1\,km}{D_{\rm detector}}\right)\left(\frac{L}{4\,km}\right)$$

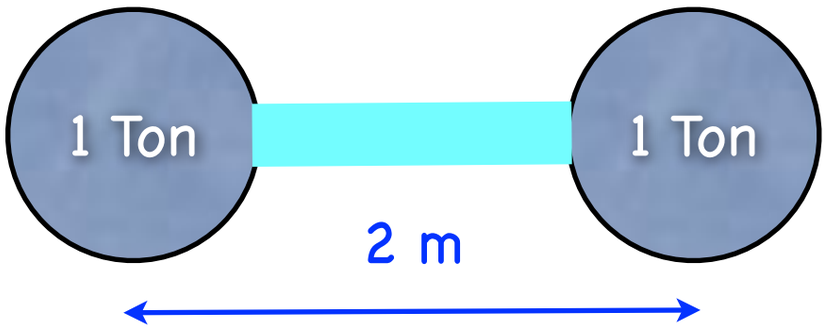
$$\ell_{\rm Planck} \sim 10^{-35} m$$

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Amplitud de las Ondas Gravitatorias:
  - Usando la aproximación cuadrupolar:

$$\frac{\Delta L}{L} = h \sim \frac{G\ddot{Q}}{c^4\, r}\,, \quad Q \sim M_{\rm total} R^2 \;\Rightarrow\; \ddot{Q} \sim M_{\rm total} v^2$$

  - En un laboratorio:



$$f \sim 1kHz \quad \Rightarrow \quad h \sim 10^{-37}\,\frac{1\,km}{D_{\rm detector}}$$

$$\Delta L \sim 10^{-33} m \left(\frac{1\,km}{D_{\rm detector}}\right)\left(\frac{L}{4\,km}\right)$$

$$\ell_{\rm Planck} \sim 10^{-35} m$$

  - Con Sistemas Astrofísicos Relativistas:

$$M \sim M_\odot\,, \quad v \sim c\,, \quad D_{\rm detector} \sim 15\,{\rm Mpc} \quad \longrightarrow \quad h \sim 10^{-21}$$

$$\Delta L = h \cdot L \sim 10^{-15}\,{\rm cm} \quad (L = 4\,{\rm km})$$

$$R_{\rm atomic\ nuclei} \sim 10^{-13}\,{\rm cm}$$

Astronomía de Ondas Gravitatorias

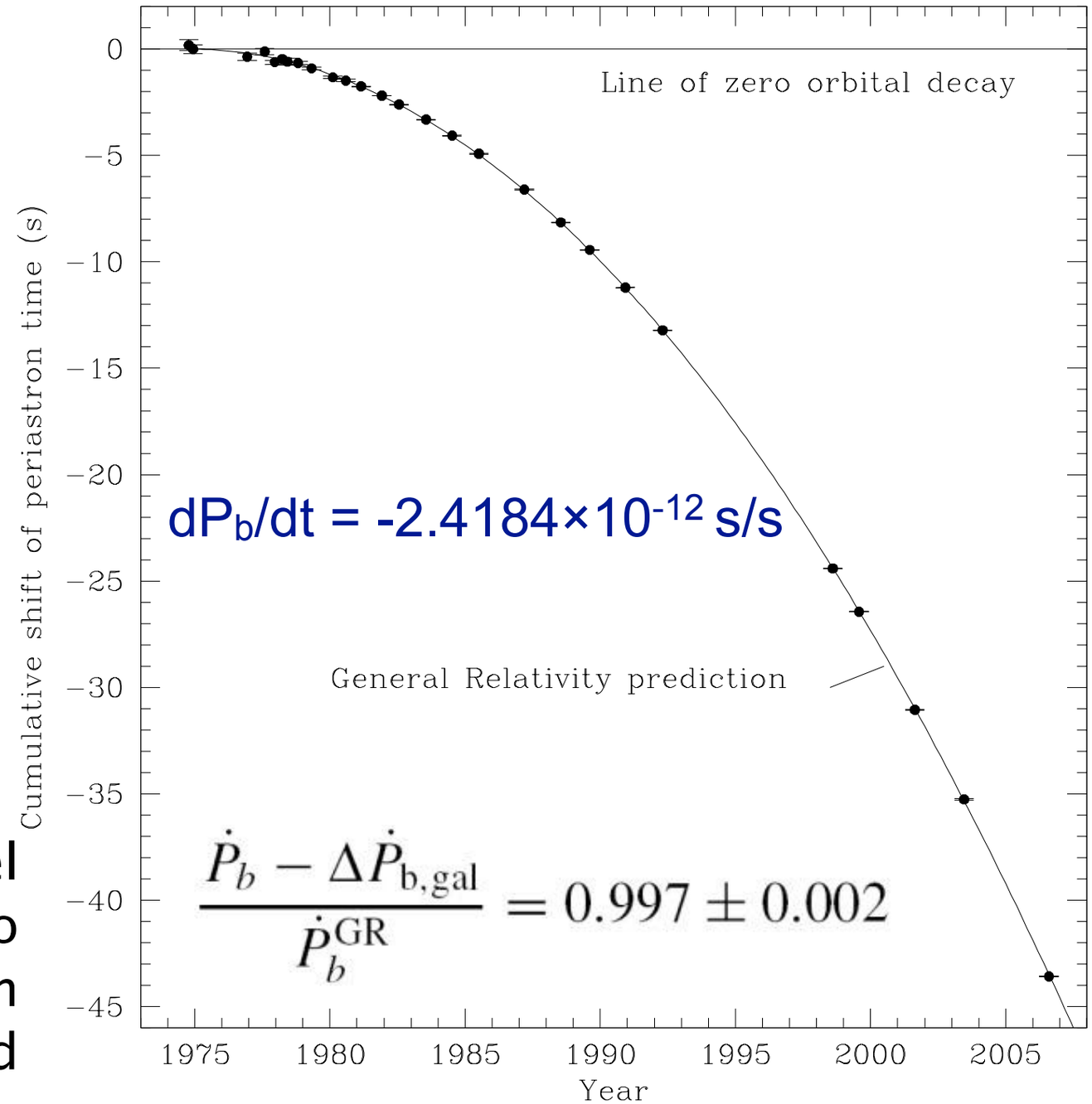
- Evidencia de su existencia:

KUNGL. VETENSKAPSAKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

1993 Nobel Prize in Physics

Russell A. Hulse

Joseph H. Taylor Jr.

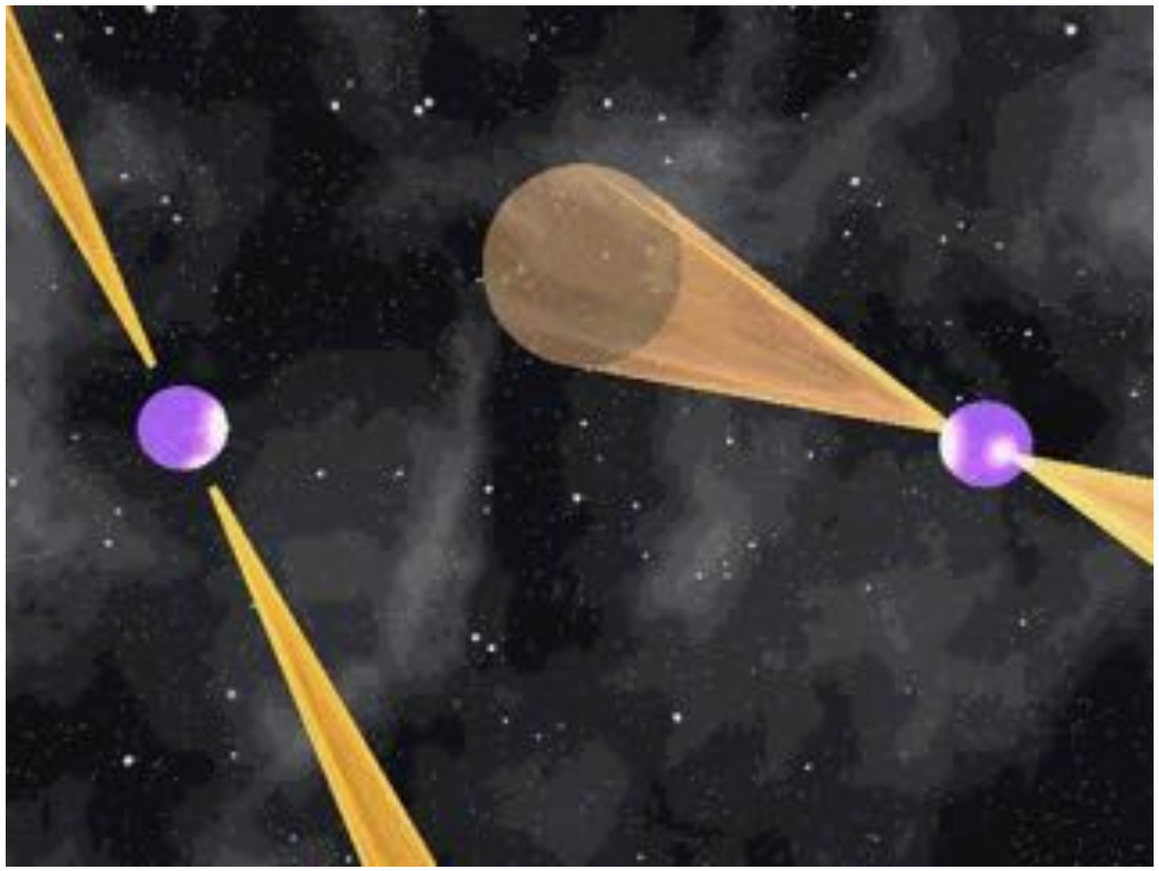


... La medida del ritmo de cambio del periodo orbital concuerda con lo esperado en la emisión de radiación gravitatoria, según la Relatividad General, dentro de un intervalo de *0.2%*. ...

Weisberg, Nice & Taylor (1011.0718)
Astrophysical Journal, **722**, 1030-1034 (2010)

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Evidencia de su existencia:



El Púlsar Doble: PSR J0737-3039A/B

$dP_b/dt = (-1.248 \pm 0.001) \times 10^{-12}$.

Acuerdo con la Relatividad General al 0.1%!

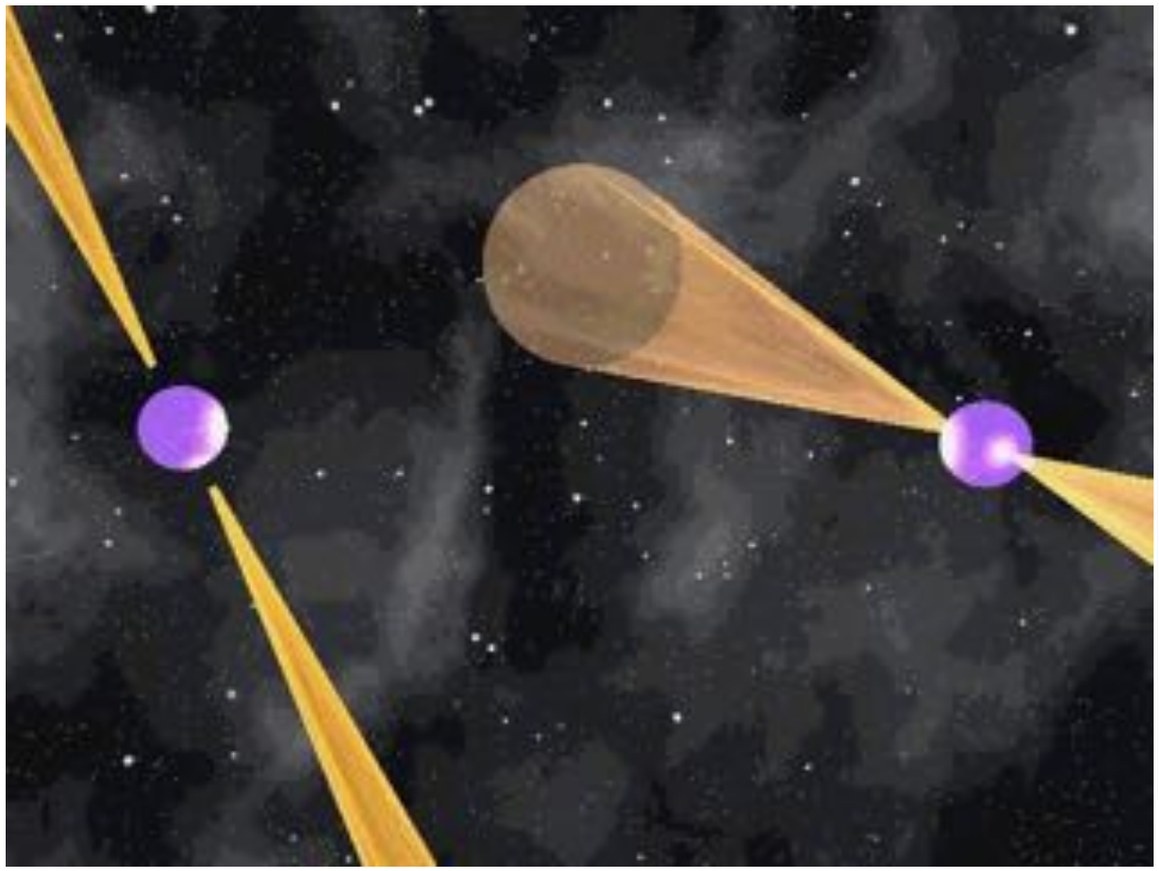
PSR J0348+0432: Un sistema binario de un púlsar con una enana blanca

$$\dot{P}_b^{GR} = (-2.58^{+0.07}_{-0.11}) \times 10^{-13} \text{ s s}^{-1}$$

$$\dot{P}_b / \dot{P}_b^{GR} = 1.05 \pm 0.18$$

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Evidencia de su existencia:



El Púlsar Doble: PSR J0737-3039A/B

$dP_b/dt = (-1.248 \pm 0.001) \times 10^{-12}$.

Acuerdo con la Relatividad General al 0.1%!

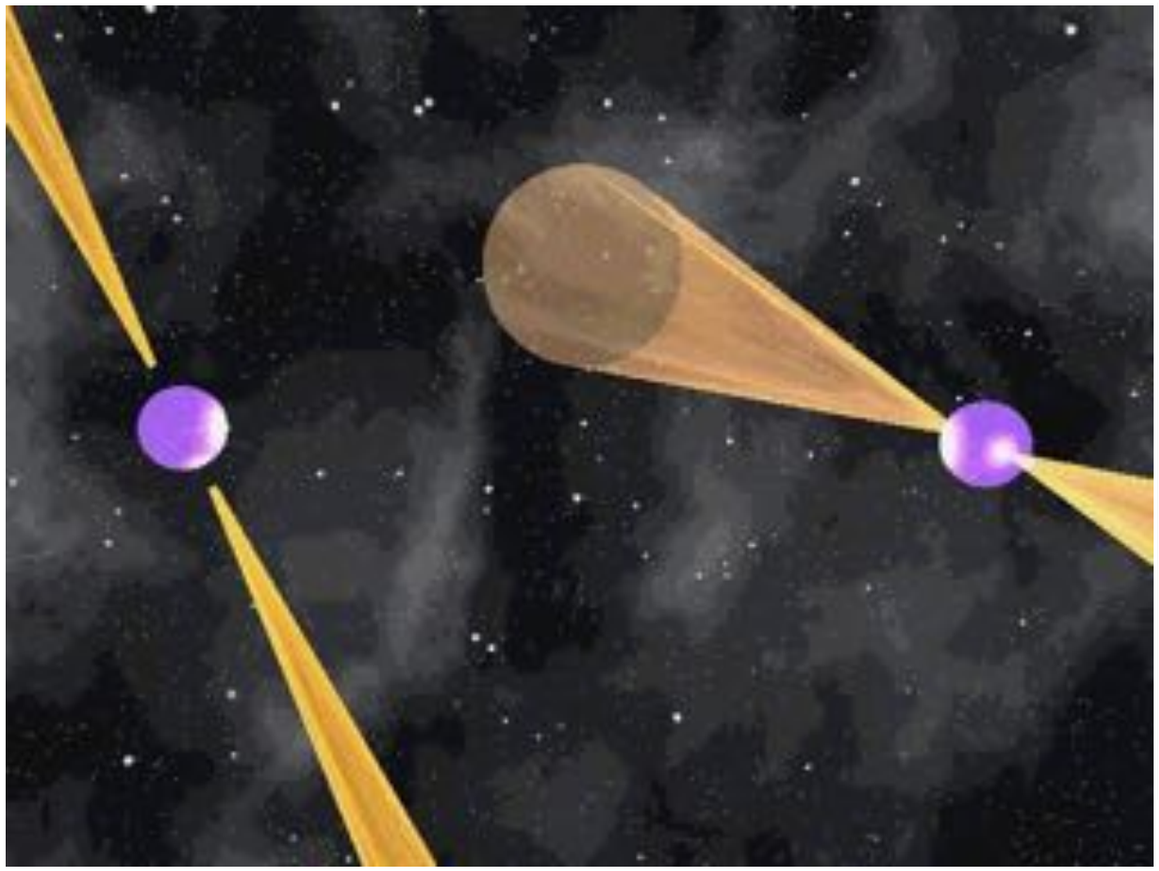
PSR J0348+0432: Un sistema binario de un púlsar con una enana blanca

$$\dot{P}_b^{GR} = (-2.58^{+0.07}_{-0.11}) \times 10^{-13} \text{ s s}^{-1}$$

$$\dot{P}_b / \dot{P}_b^{GR} = 1.05 \pm 0.18$$

Astronomía de Ondas Gravitatorias

- Evidencia de su existencia:



El Púlsar Doble: PSR J0737-3039A/B

$dP_b/dt = (-1.248 \pm 0.001) \times 10^{-12}$.

Acuerdo con la Relatividad General al 0.1%!

PSR J0348+0432: Un sistema binario de un púlsar con una enana blanca

$$\dot{P}_b^{GR} = (-2.58^{+0.07}_{-0.11}) \times 10^{-13} \text{ s s}^{-1}$$

$$\dot{P}_b / \dot{P}_b^{GR} = 1.05 \pm 0.18$$

¡Regimen no lineal, aunque campo débil!

Astronomía de Ondas Gravitatorias

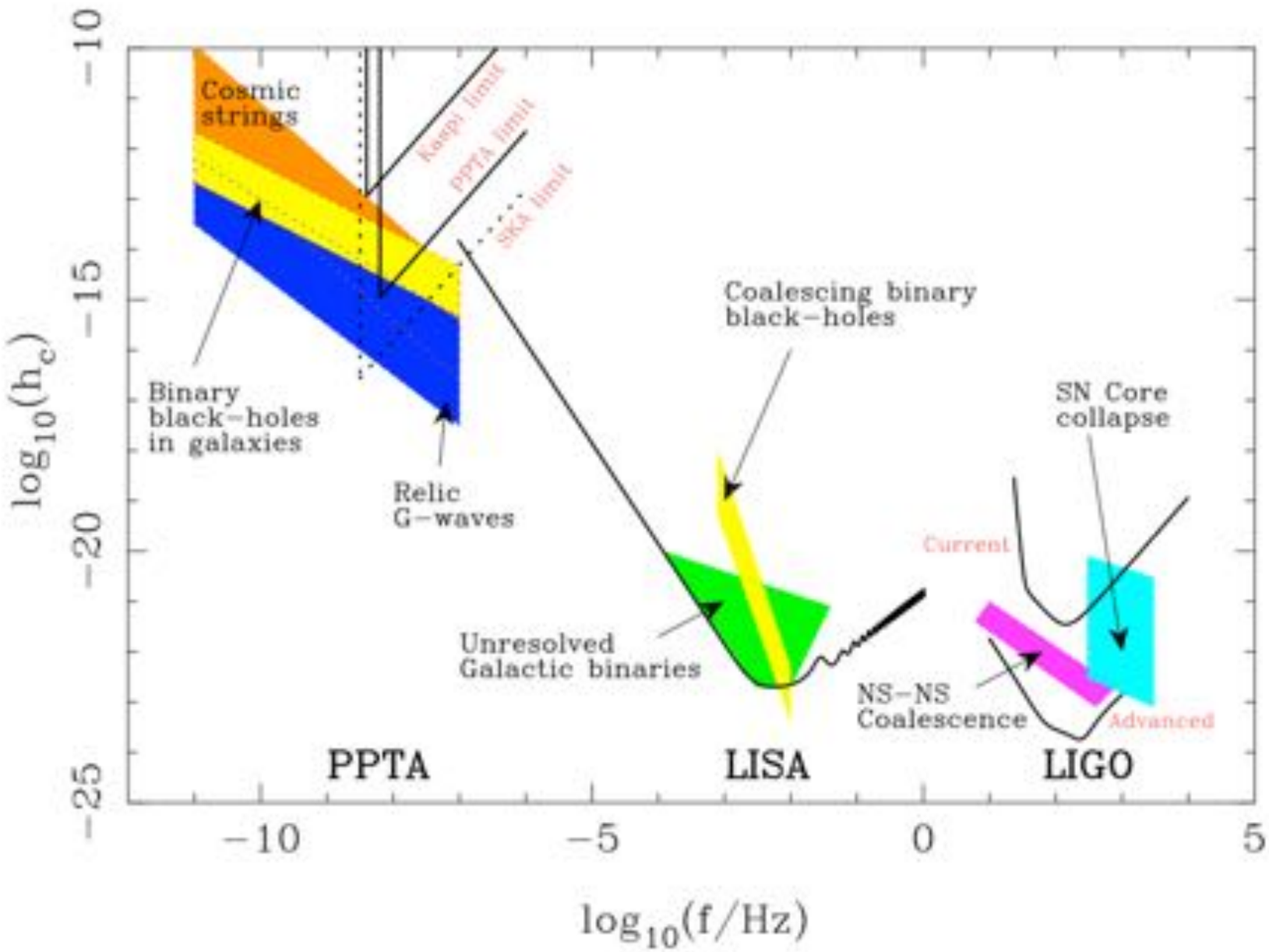
- Principal Objetivo: Detección y Análisis de Radiación Gravitatoria proveniente de Fuentes Astrofísicas y Cosmológicas para producir descubrimientos con impacto en Astrofísica, Cosmología y Física Fundamental.

Un nuevo mensajero para la Astronomía de Múltiples Mensajeros.

Detectores de Ondas Gravitatorias

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Espectro de las Ondas Gravitatorias:



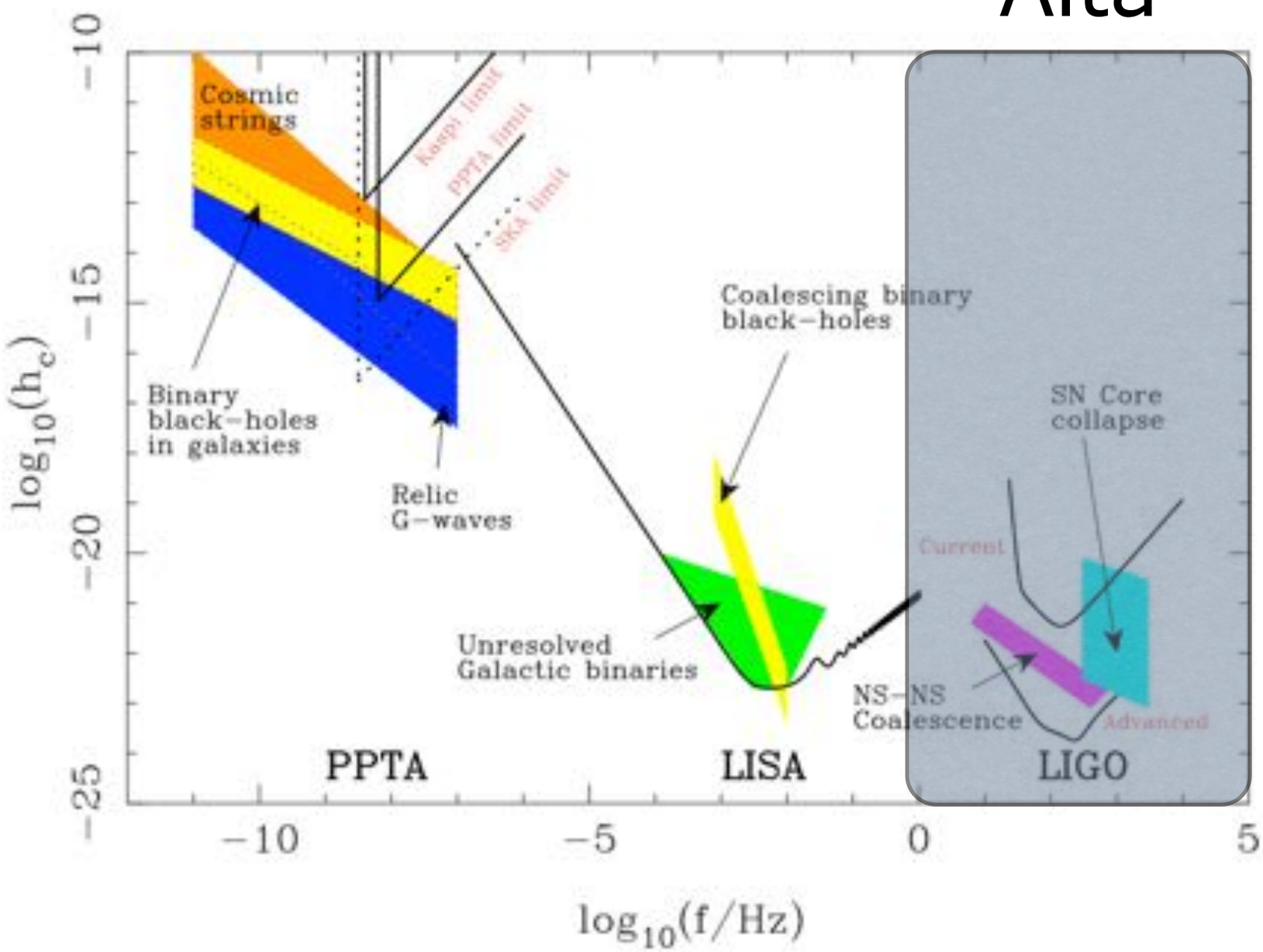
Frecuencia Ondas Gravitatorias ↓

Tamaño Detector ↑

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Espectro de las Ondas Gravitatorias:

Banda
Alta

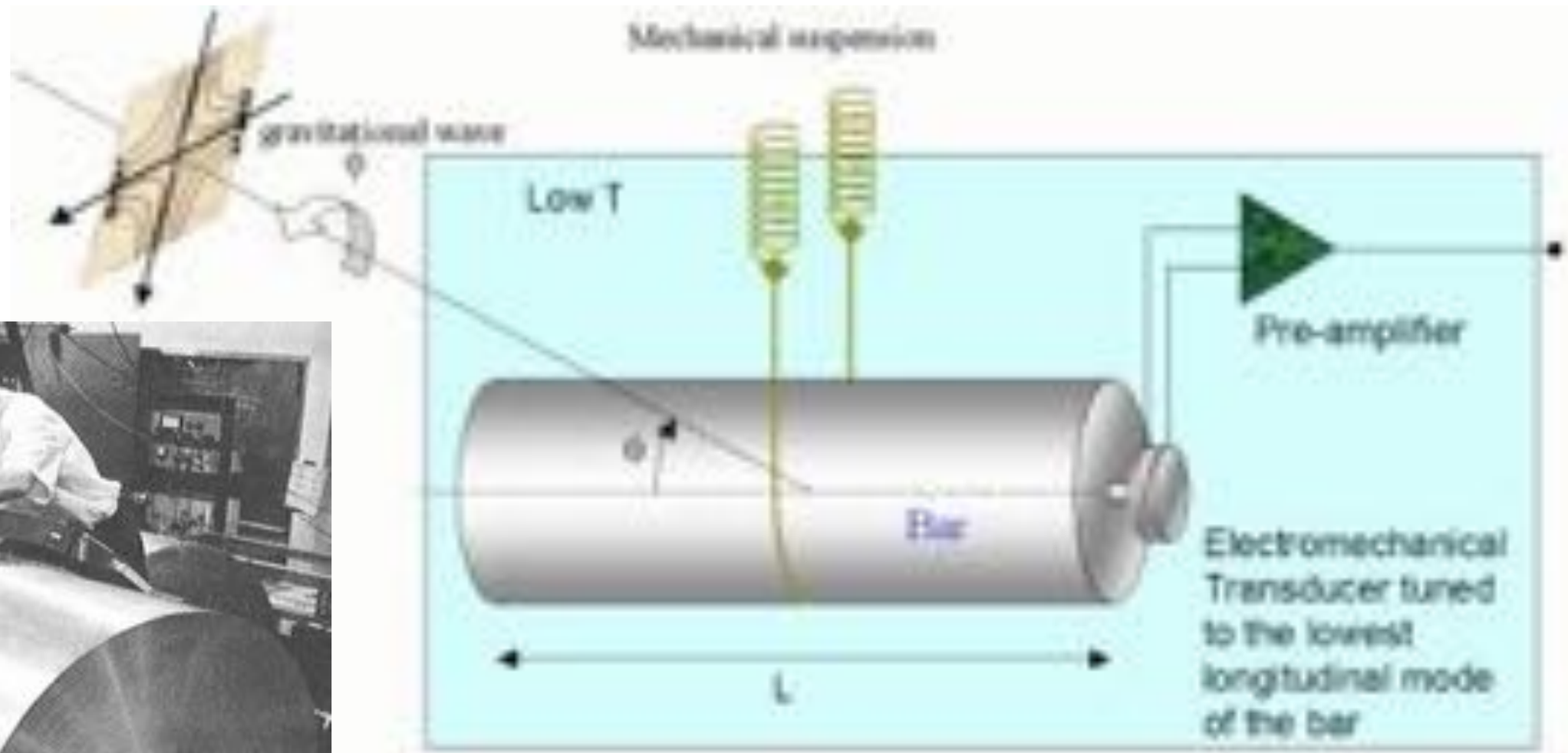


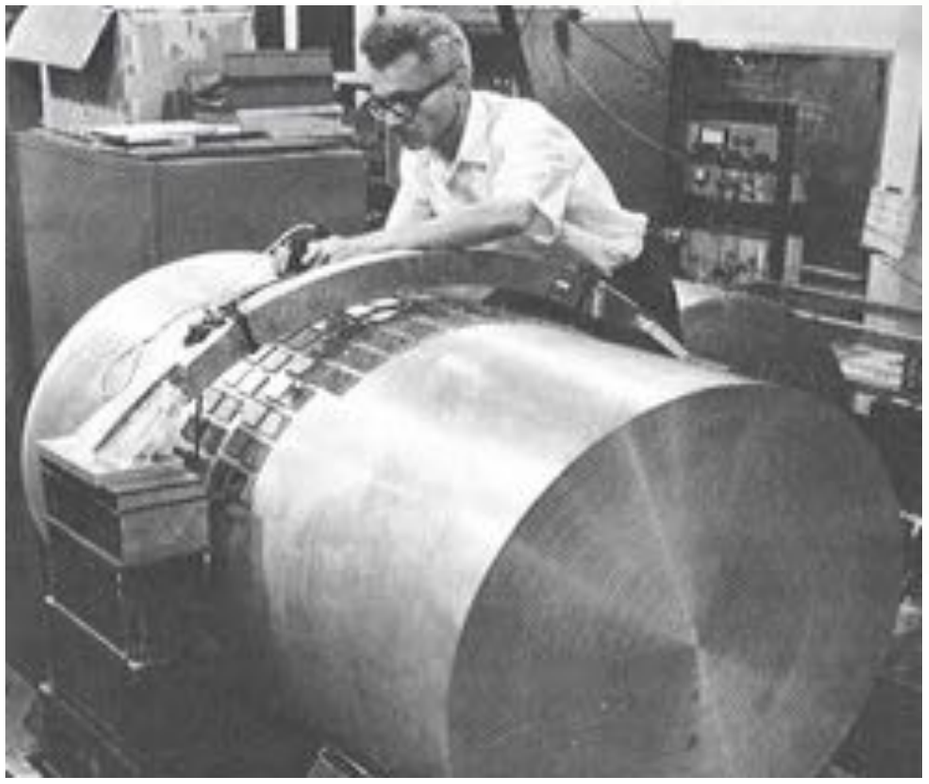
Frecuencia Ondas Gravitatorias ↓

Tamaño Detector ↑

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Detectores Resonantes: Introducidos por Joseph Weber en los 60s. Se miden las deformaciones longitudinales de una barra típicamente cilíndrica producidas por ondas gravitatorias que la atraviesan.





Detectores de Ondas Gravitatorias

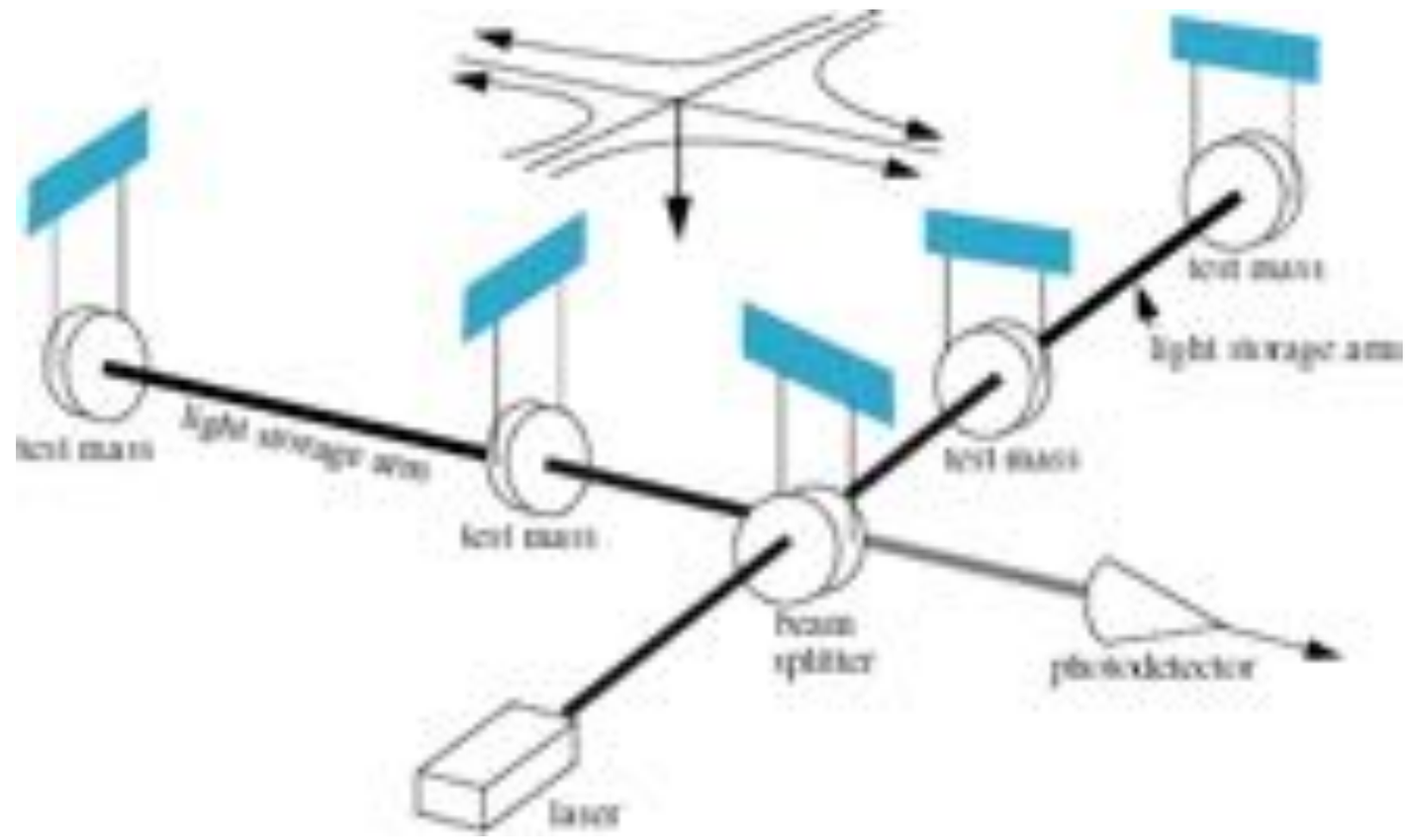
- Detectores Resonantes:
  - Aspectos positivos: Bajo coste; capacidad de construir una red de detectores; tecnología muy desarrollada; décadas de experiencia.
  - Aspectos negativos: Alta dependencia direccional; sensibilidad limitada (galaxia); banda estrecha; posibilidades de mejora muy limitadas.

	AURIGA	NAUTILUS	EXPLORER	ALLEGRO	NIOBE
Bar Material	Al5056	Al5056	Al5056	Al5056	Nb
Bar Mass M [kg]	2230	2260	2270	2296	1500
Bar Length L [m]	2.9	3.0	3.0	3.0	2.75
Frequency - [Hz]	912	908	905	895	694
Frequency + [Hz]	930	924	921	920	713
$Q_{\pm}$ [10^6]	3	0.5	1.5	2	20
Bar Temperature [K]	0.25	0.1	2.6	4.2	5
Latitude	45°21'12"N	41°49'26"N	46°27'00"N	30°27'00"N	31°56'00"S
Longitude	11°56'54"	12°40'21"	6°12'00"	268°50'00"	115°49'00"
Azimuth	44°	44°	39°	-40°	0°
Misalignment (*)	5°	2°	3°	6°	16°

(*) Angle between bar axis and the perpendicular to the Earth great circle closer to the five detectors.

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Interferometría láser: Las fuerzas de marea producidas por las Ondas Gravitatorias encogen un brazo y estiran el otro de forma alternada.



$$h(t) = \frac{\delta L(t)}{L}$$

$$= F^{+}\, h_{+}(t) + F^{\times}\, h_{\times}(t)$$

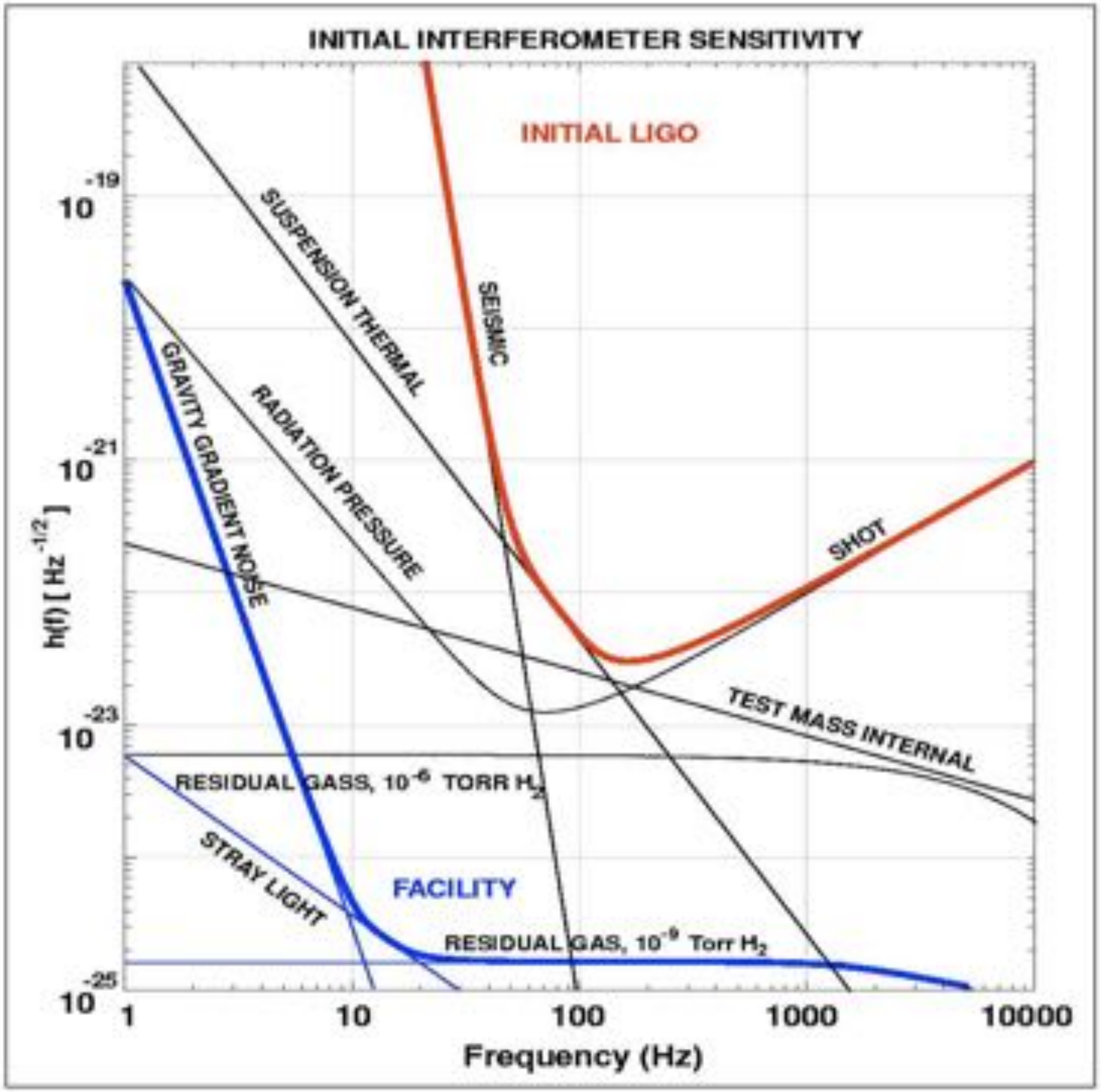
Detectores de Ondas Gravitatorias

- Fuentes de Ruido:

Bajas frecuencias: Ruido sísmico y gradiente gravitatorio newtoniano (actividad humana, movimientos atmosféricos, etc).

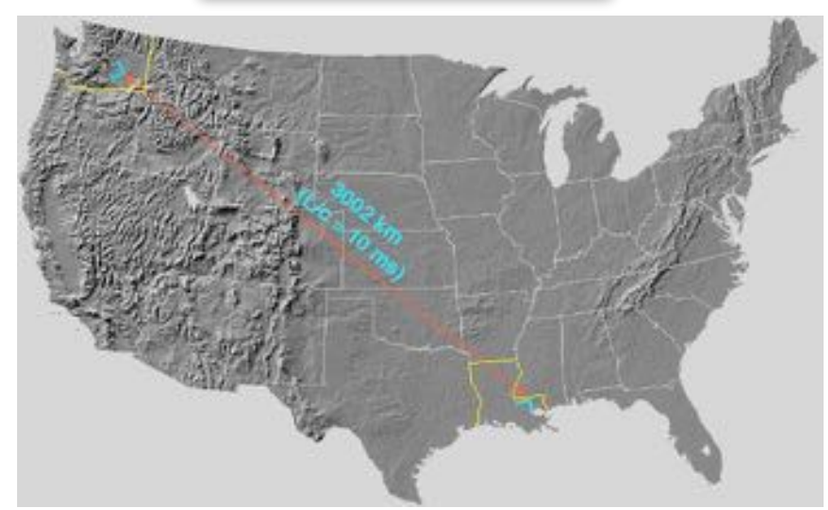
Altas frecuencias: La sensibilidad se degrada rápidamente a causa del ruido del láser (fluctuaciones en el número de fotones utilizados en la medición).

Frecuencias intermedias: Excitación térmica de modos normales de los espejos (masas test) y de las suspensiones.



Detectores de Ondas Gravitatorias

- LIGO [USA]: El *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* consiste en 3 interferómetros: uno de 4 km en Livingston (Louisiana), y un par (de 4 km y 2 km) en Hanford (Washington). Las instalaciones están separadas por 3000 Km (10 ms), de forma que permite el análisis de coincidencias.



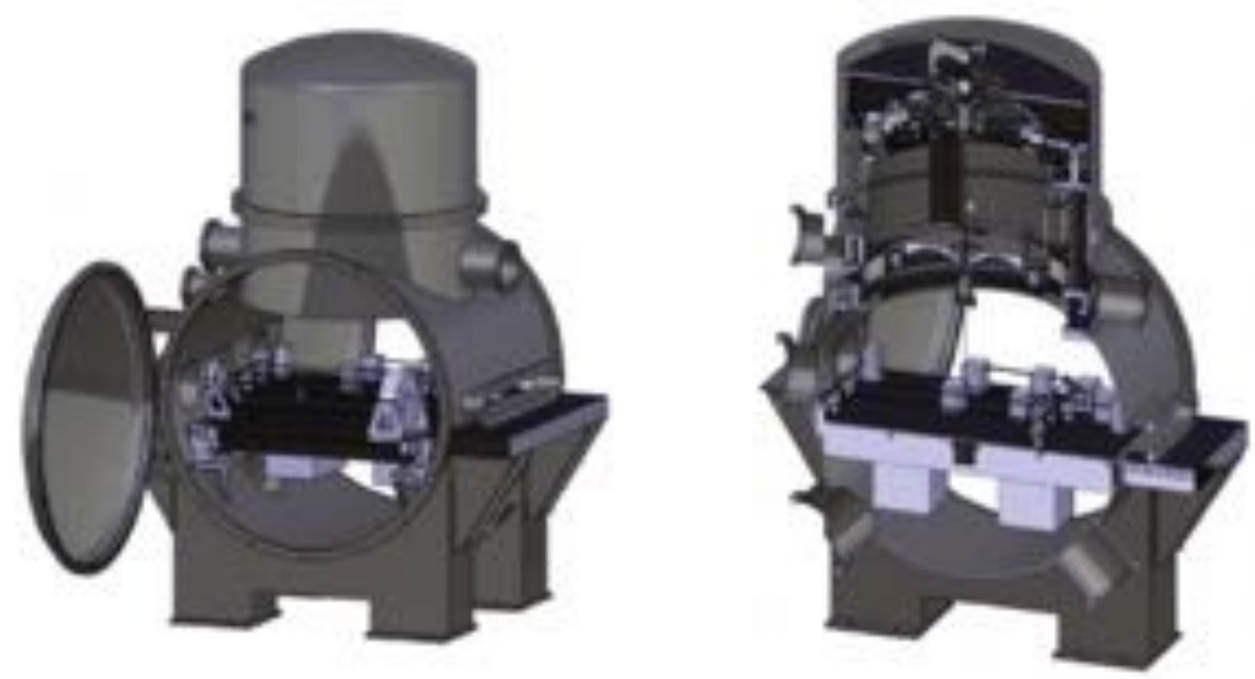
LIGO Hanford

LIGO Livingston

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Virgo [Italia + Francia + (Holanda + Hungría + Polonia) = *European Gravitational Observatory* (EGO)]: Un detector de 3 Km cerca de Pisa (Italia). La principal diferencia con LIGO es la sofisticación del sistema de aislamiento sísmico (mejor sensibilidad a bajas frecuencias).

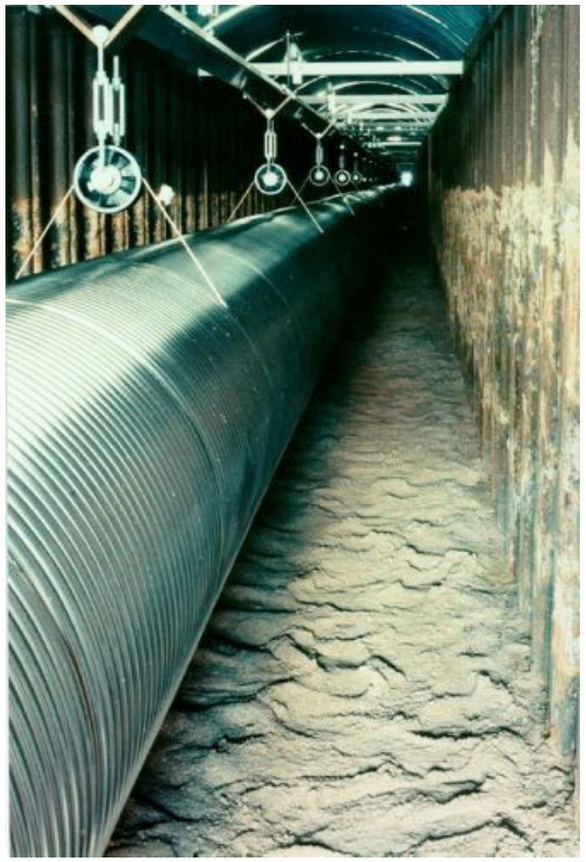
Virgo



Detectores de Ondas Gravitatorias

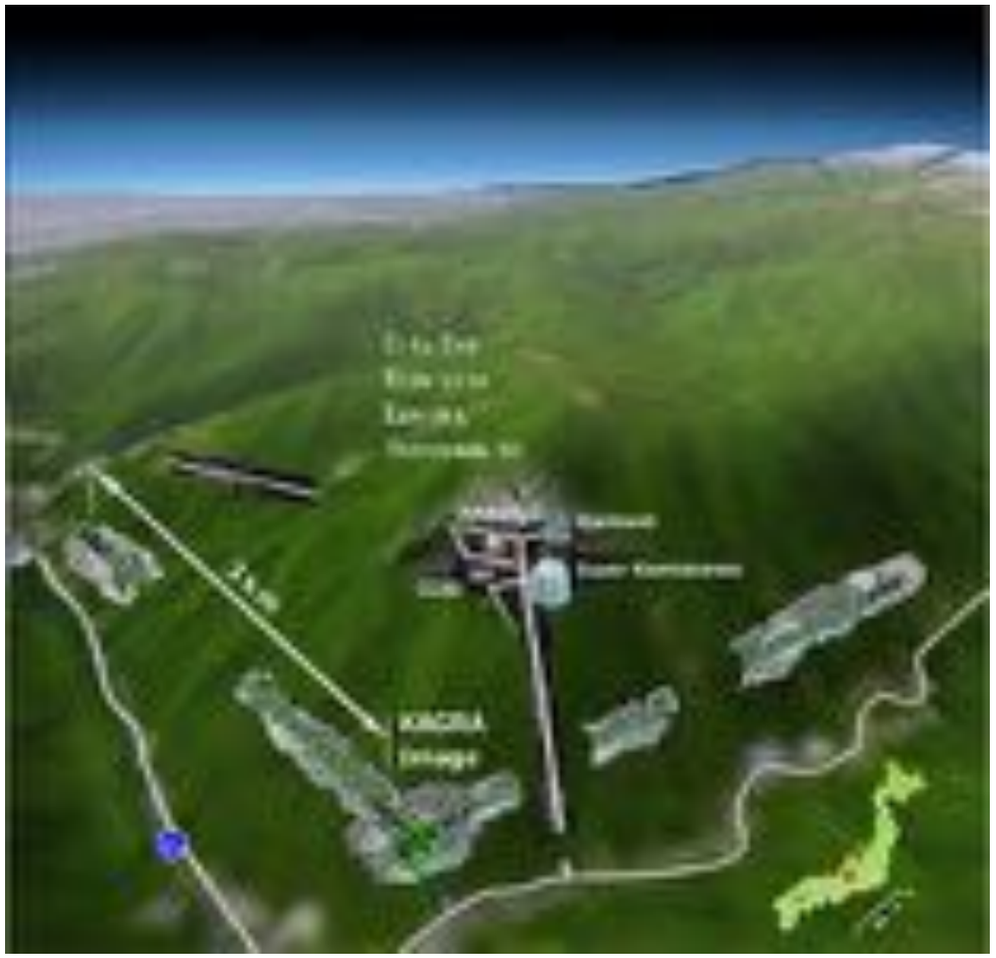
- GEO600 [Alemania+Reino Unido]: Un detector de 600m cerca de Hannover (Alemania). Desde Septiembre de 2011, GEO600 está en el llamado programa *Astrowatch*. Mientras LIGO y Virgo se actualizan a sus configuraciones avanzadas, GEO600 es el único detector en operación. GEO también está siendo actualizado (GEO-HF) pero continua operando y consiguiendo datos de alta calidad durante la mayor parte del tiempo.

GEO600



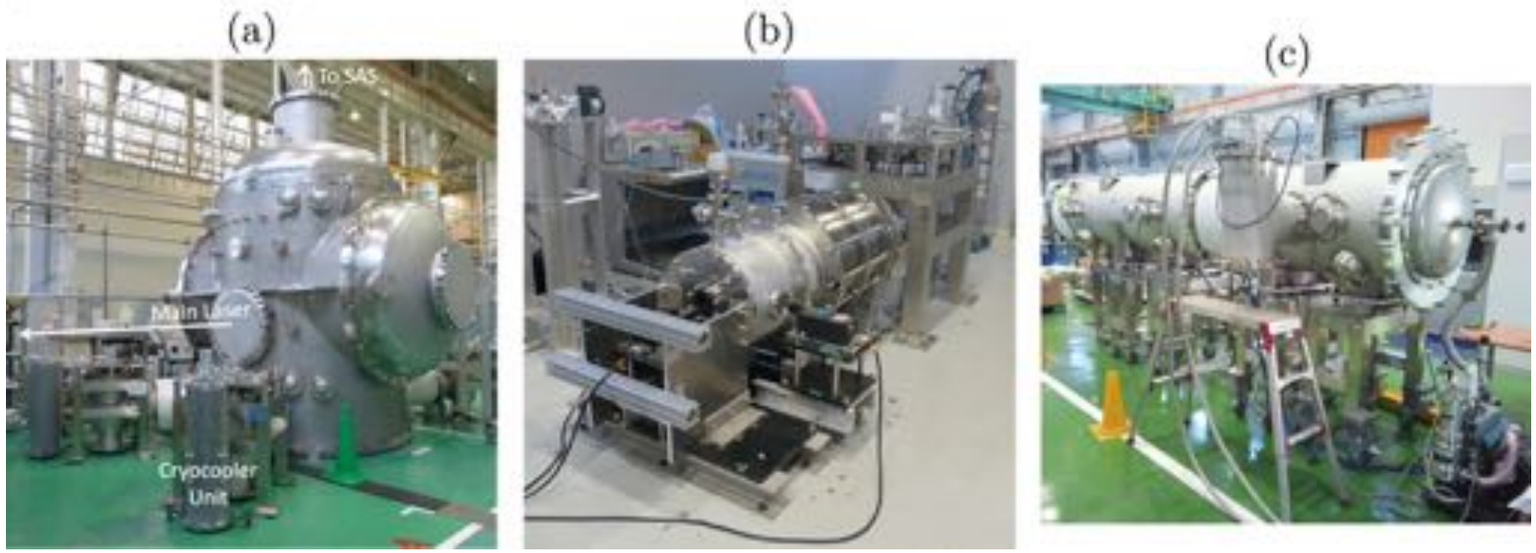
Detectores de Ondas Gravitatorias

✳KAGRA [Japón]: KAGRA tiene dos conjuntos de detectores interferómetricos de 3 km de brazo. Se construye en los túneles de la mina de Kamioka. Usa espejos criogénicos.



KAGRA

Figure 2 from Yusuke Sakakibara et al 2014 Class. Quantum Grav. 31 224003

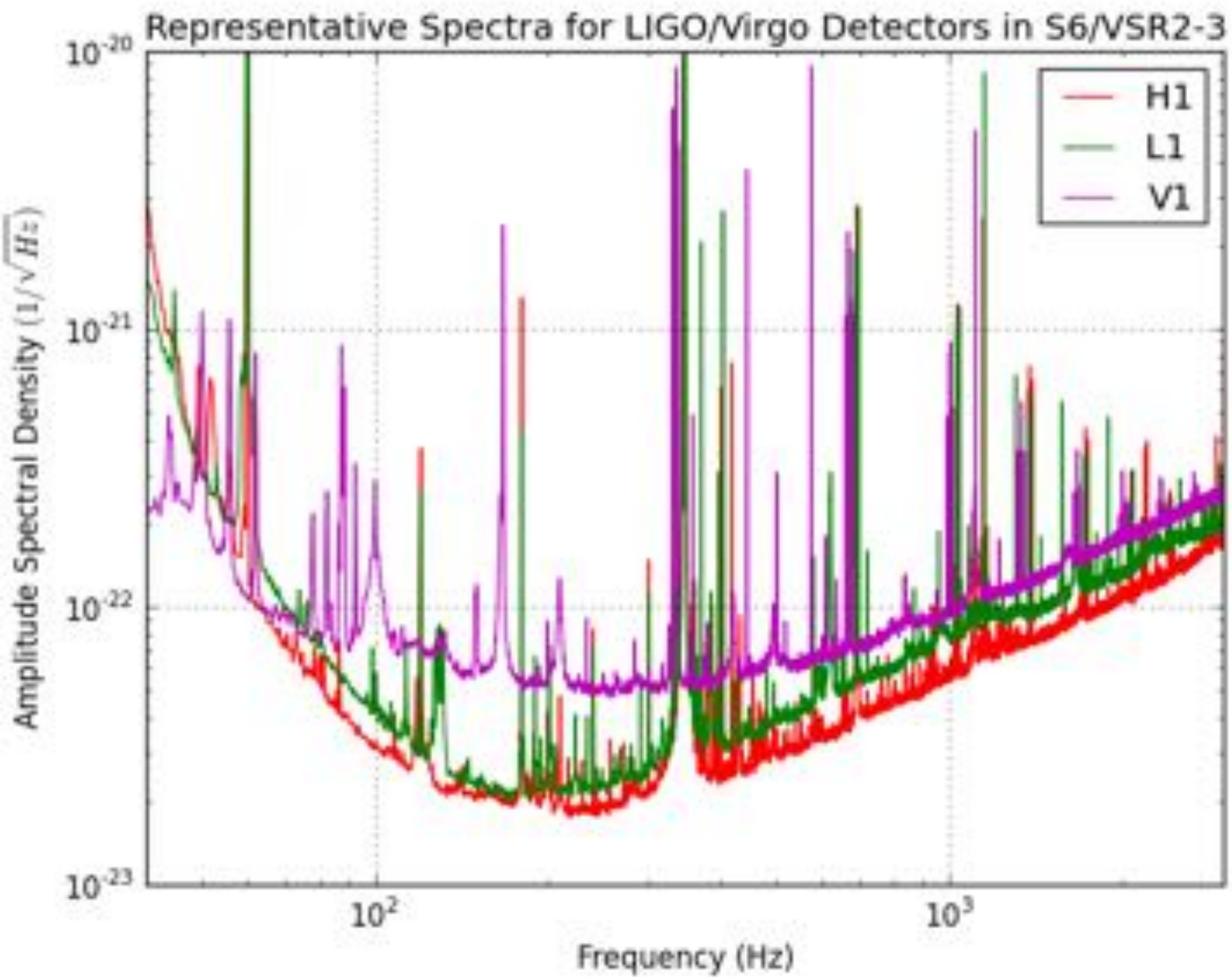


Detectores de Ondas Gravitatorias

- Últimos *Science Runs* de los Detectores Iniciales (LIGO y Virgo):

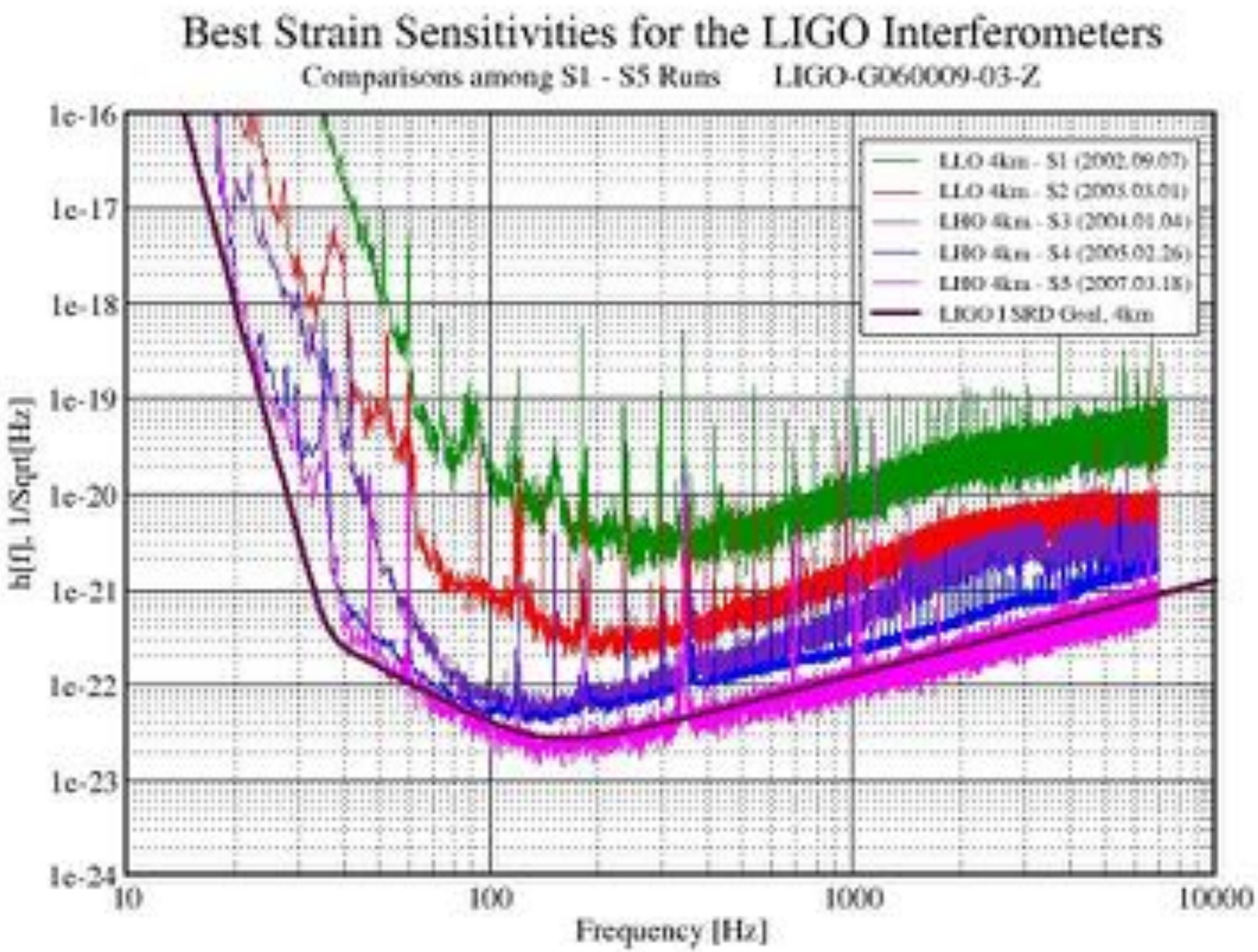
Detectores de Ondas Gravitatorias

- Últimos *Science Runs* de los Detectores Iniciales (LIGO y Virgo):



Detectores de Ondas Gravitatorias

- Últimos *Science Runs* de los Detectores Iniciales (LIGO y Virgo):

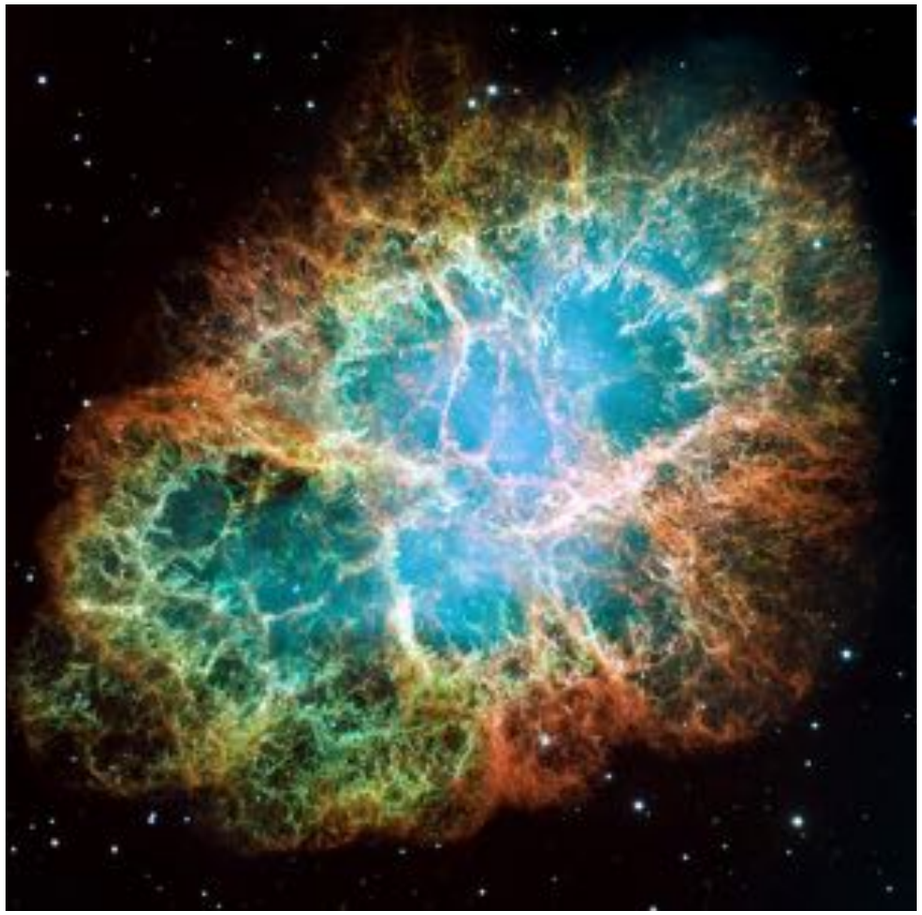


Detectores de Ondas Gravitatorias

- Aunque no han habido detecciones, se ha podido realizar ciencia (LIGO y Virgo) con los límites establecidos a la emisión de ondas gravitatorias.

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Aunque no han habido detecciones, se ha podido realizar ciencia (LIGO y Virgo) con los límites establecidos a la emisión de ondas gravitatorias.

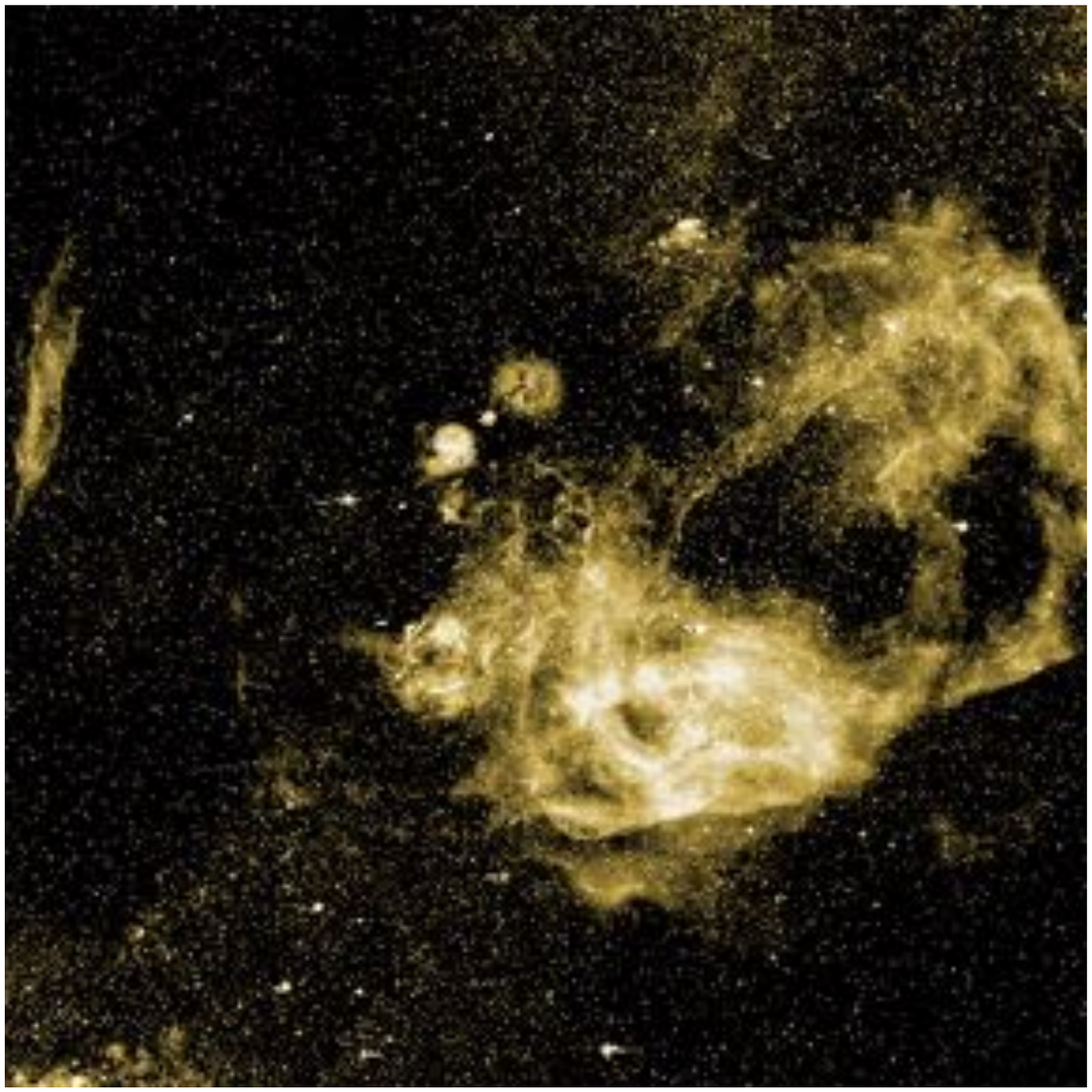


Crab Nebula -> Pulsar Spinning down

Crab Nebula: La rotación del púlsar disminuye. Las observaciones de LIGO demuestran que sólo 4% de la energía rotacional perdida puede ser debida a la emisión de OGs.
[Astrophys.J.**683**:L45-L50,2008]

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Aunque no han habido detecciones, se ha podido realizar ciencia (LIGO y Virgo) con los límites establecidos a la emisión de ondas gravitatorias.



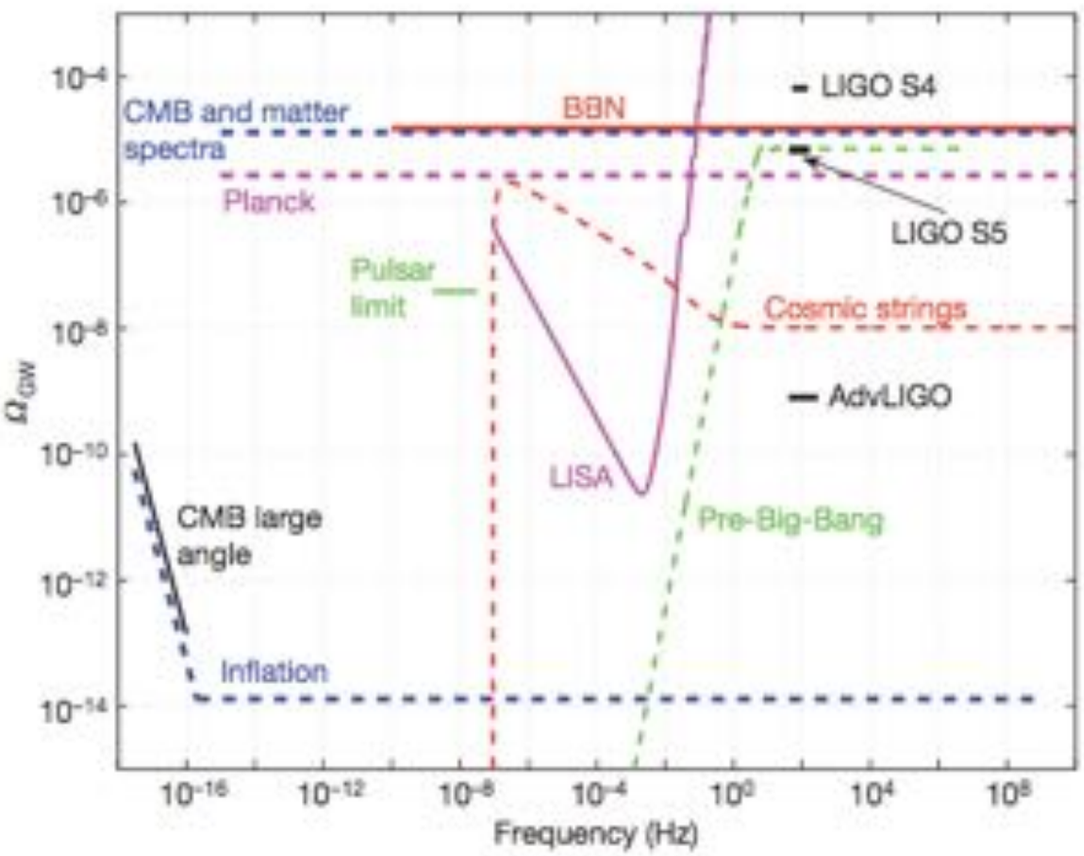
(Credit: NOAO/CTIO)

Vela Púlsar: Más recientemente (2011), Virgo ha superado el *spindown limit* de este púlsar. Se han puesto también límites a la elipticidad del púlsar (lo cual también limita la magnitud de la emisión de ondas continuas)

Astrophys.J.**737**:93,2011

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Aunque no han habido detecciones, se ha podido realizar ciencia (LIGO y Virgo) con los límites establecidos a la emisión de ondas gravitatorias.



nature

LETTERS

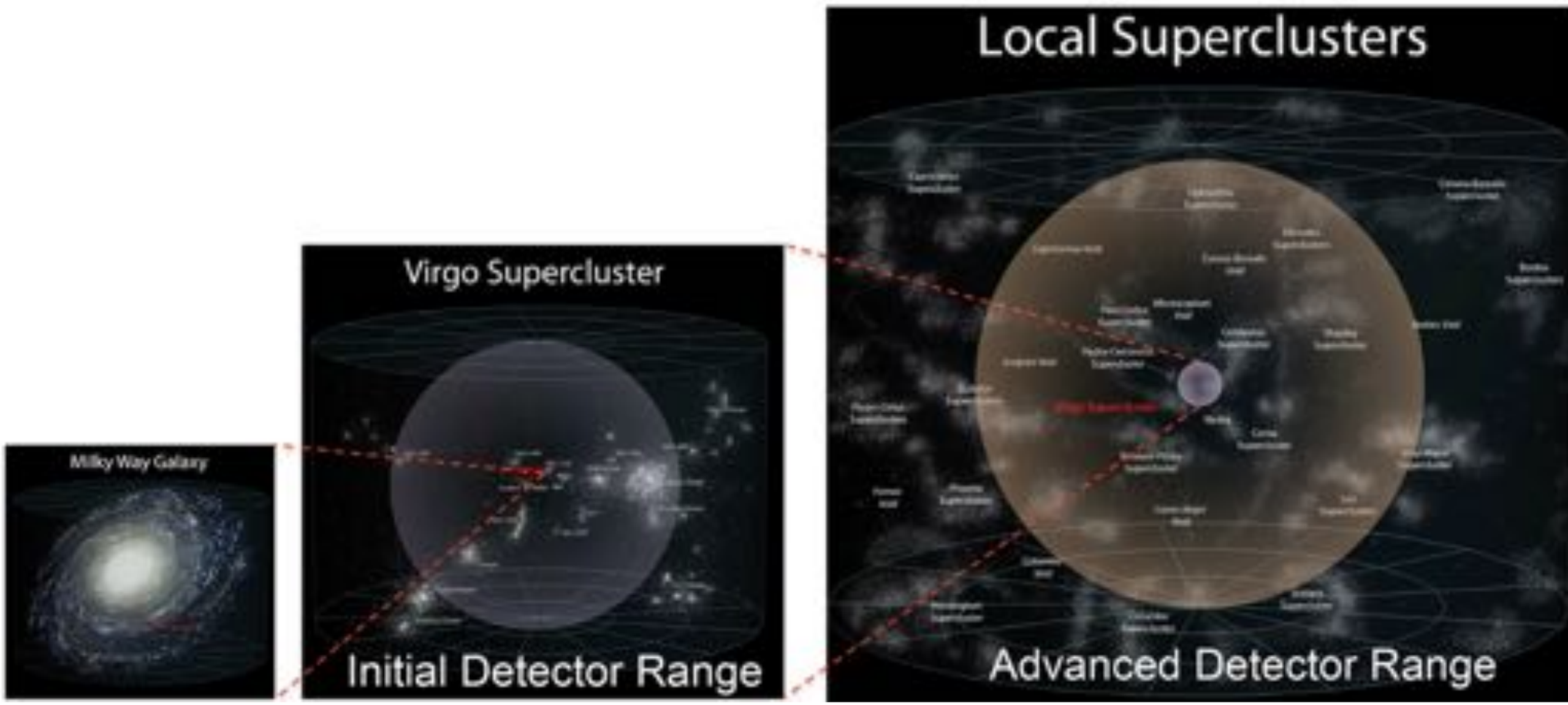
An upper limit on the stochastic gravitational-wave background of cosmological origin

The LIGO Scientific Collaboration* & The Virgo Collaboration*

Mejor Límite, durante un tiempo, a Fondos Estocásticos de Ondas Gravitatorias de origen primordial (cosmológico).

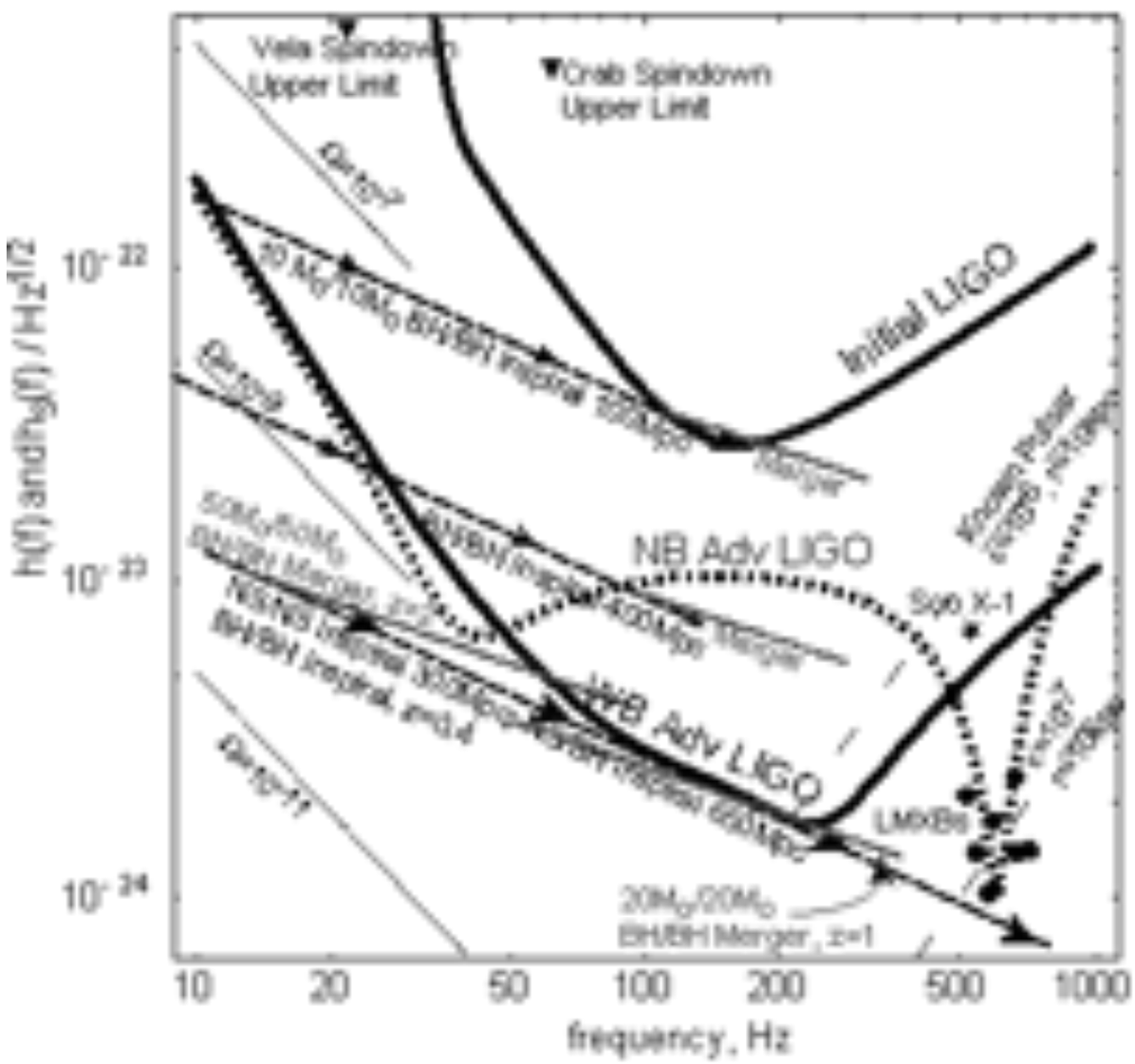
Detectores de Ondas Gravitatorias

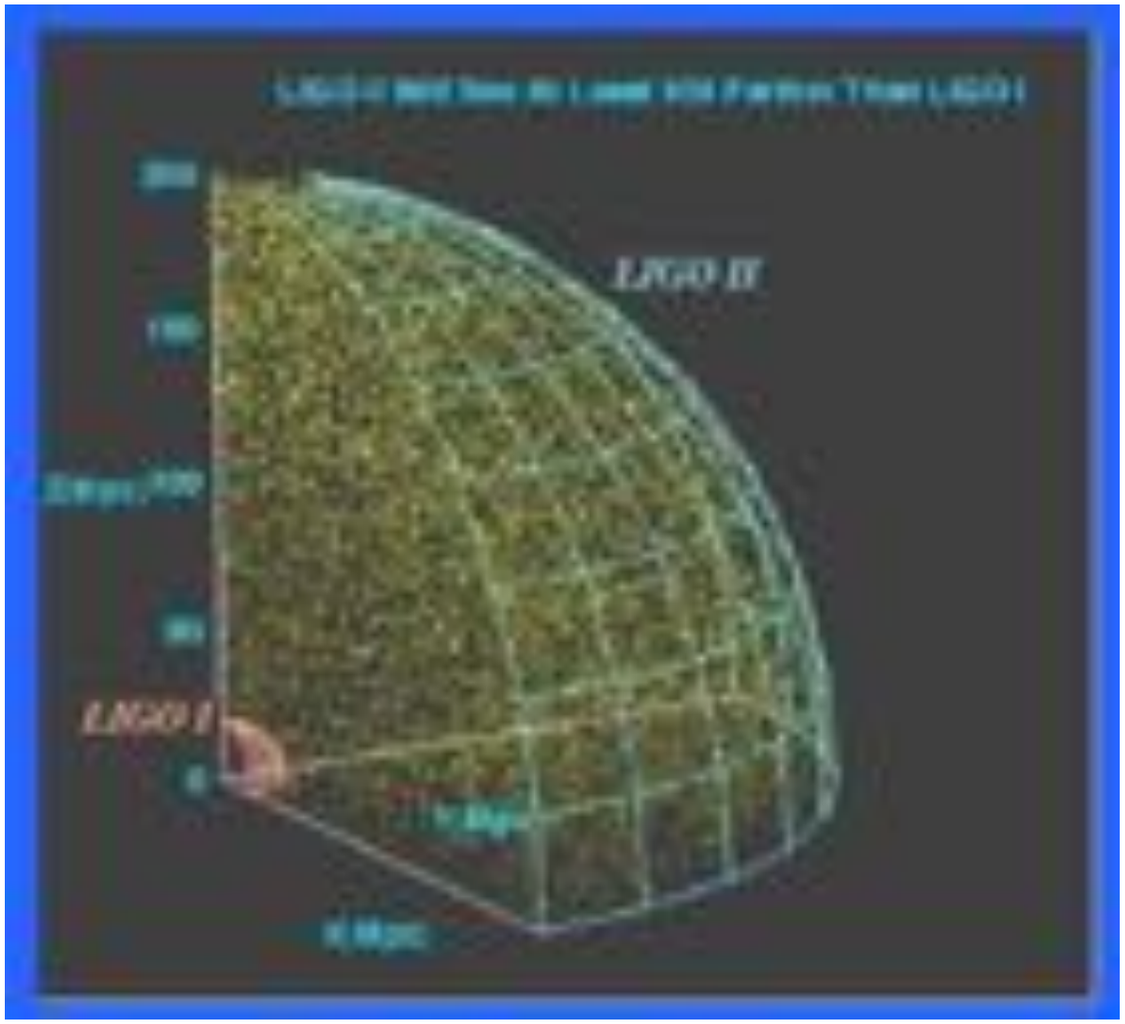
✳ Universo Observable para Detectores terrestres:



Detectores de Ondas Gravitatorias

✳ LIGO vs aLIGO:



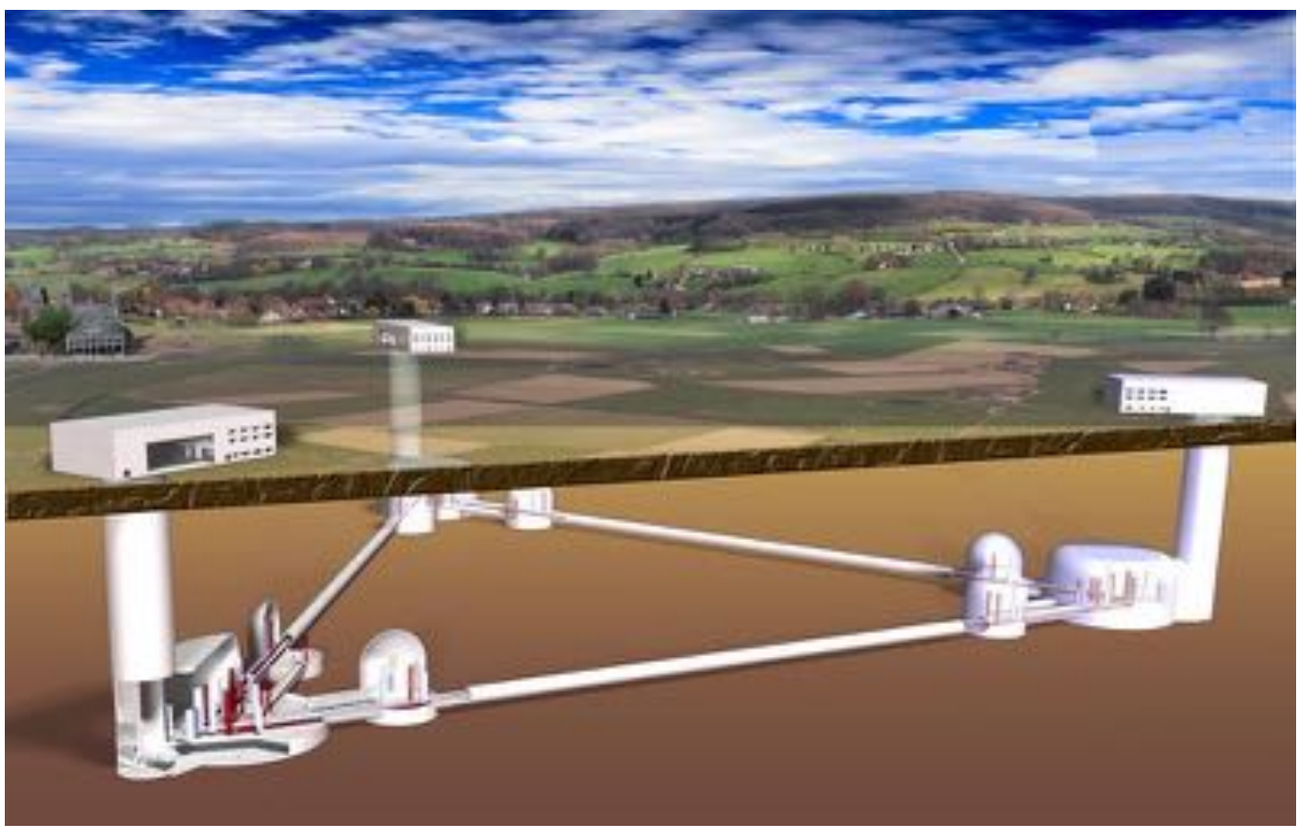


Detectores de Ondas Gravitatorias

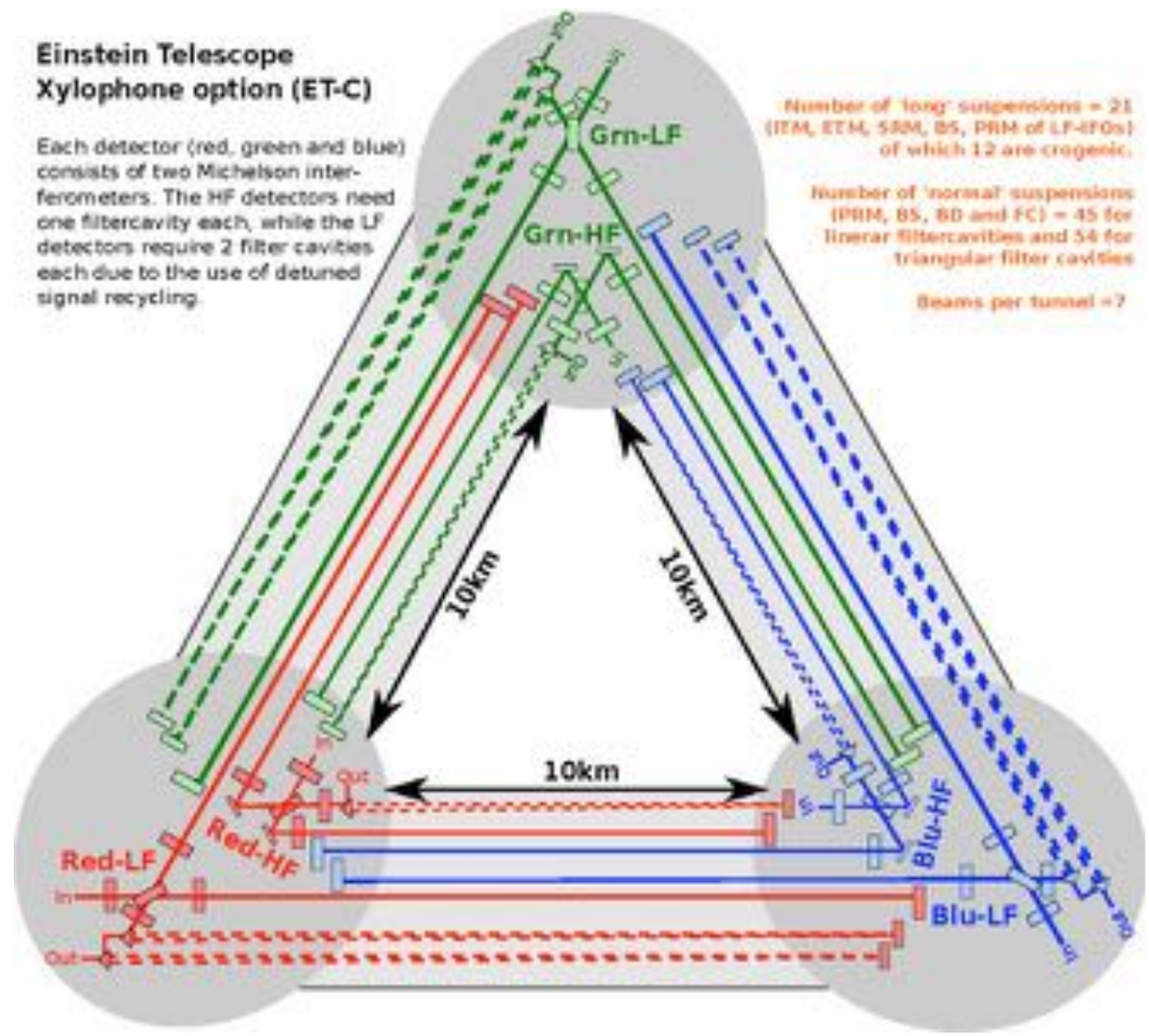
- Advanced LIGO (aLIGO) va según calendario (¡y dentro del presupuesto!) y comienza operaciones este mismo año (Run O1 en Septiembre, 3 meses y 2 detectores). Debería alcanzar la sensibilidad final de diseño en 2-4 años. Advanced Virgo va 1-2 años detrás de aLIGO. KAGRA va también 2-3 años por detrás. Las primeras detecciones se esperan antes del final de la presente década.

Detectores de Ondas Gravitatorias

✳Einstein Telescope (ET) [EGO]: Detector de tercera generación. Se ha realizado un estudio de diseño conceptual (dentro del FP7). Está en el ASPERA *roadmap*.



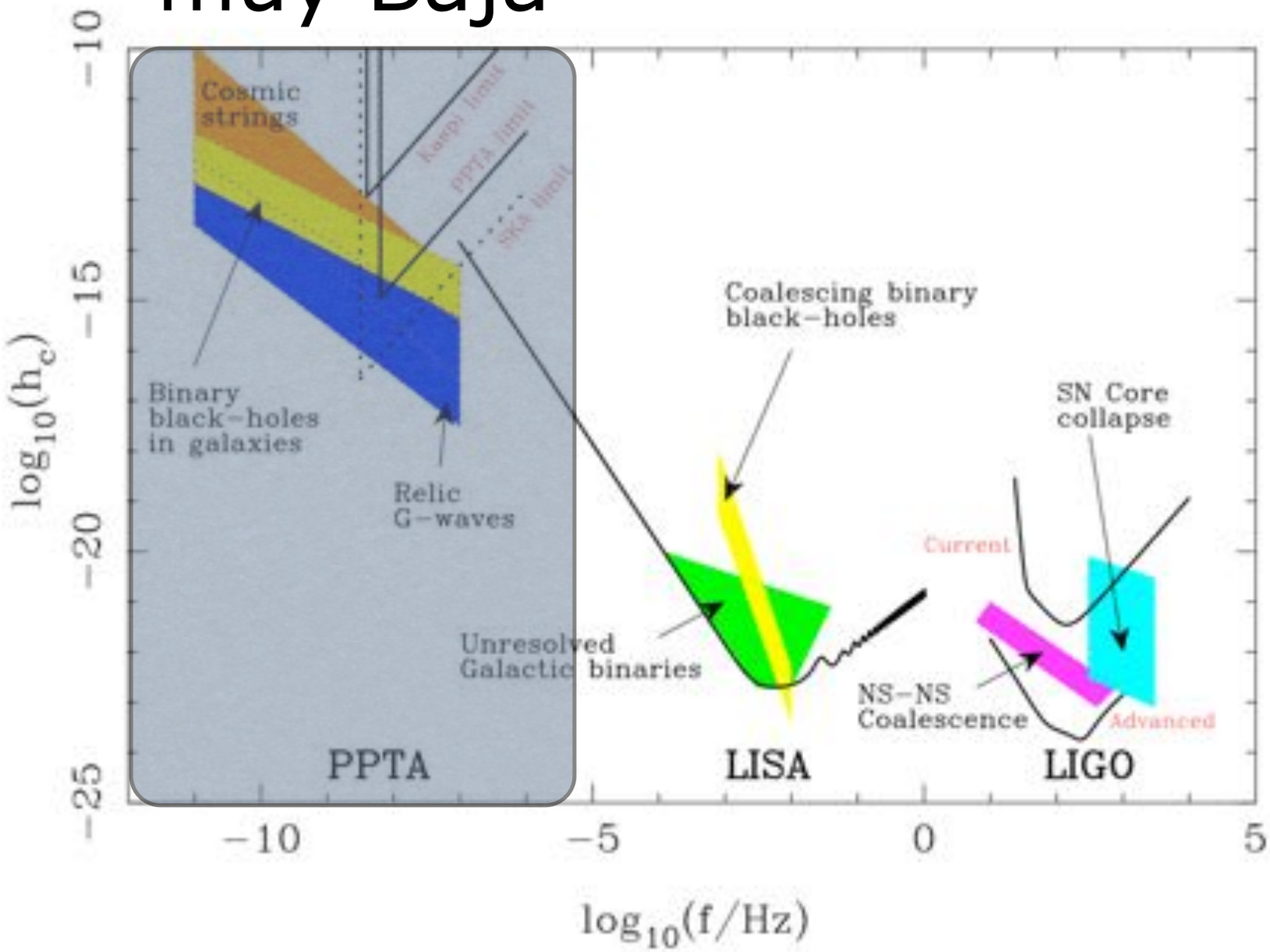
ET



Detectores de Ondas Gravitatorias

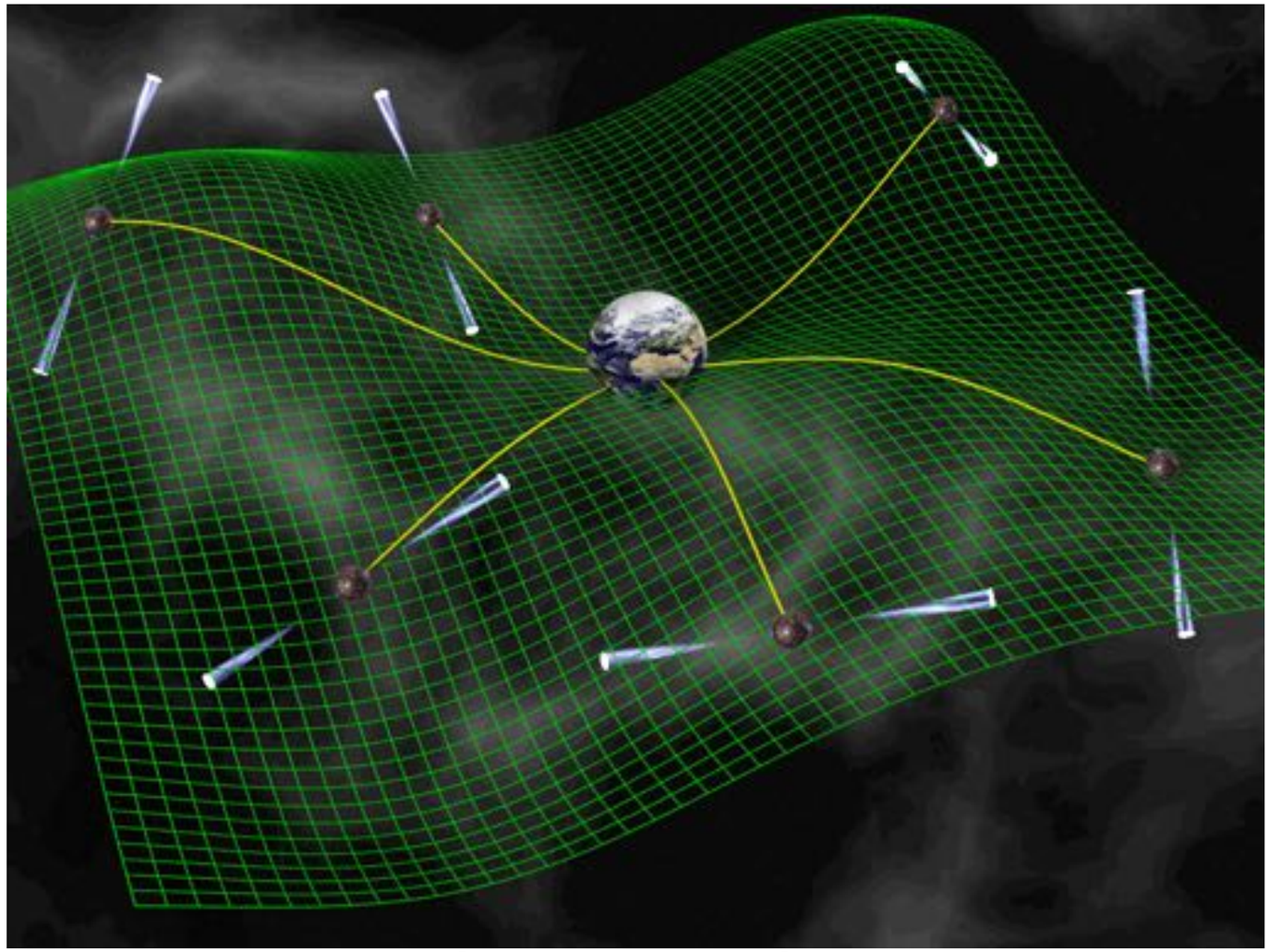
- Espectro de las Ondas Gravitatorias:

Banda
muy Baja



Detectores de Ondas Gravitatorias

- Pulsar Timing Arrays:

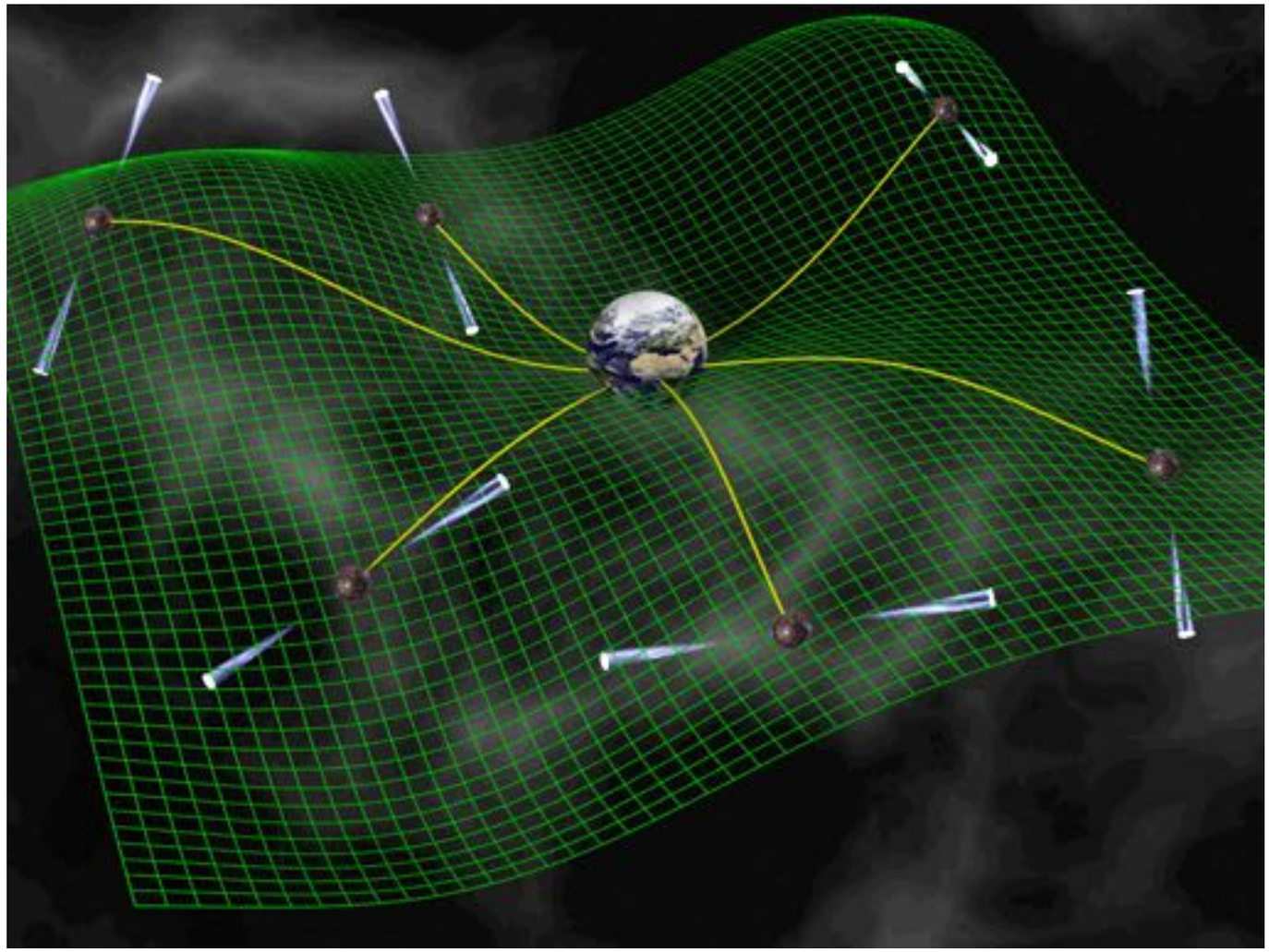


- OGs de frecuencia muy baja inducirán residuos en la cronometración de pulsares que pueden ser detectadas mediante medidas de muy alta precisión.

- Estudios recientes han producido estimaciones del número de púlsares, la precisión en la cronometración y duración de las medidas necesarias para hacer una detección estadísticamente significativa de un fondo de radiación gravitatoria producido por la coalescencia de sistemas binarios de agujeros negros supermasivos.
- Se ha concluido que se necesitan al menos 20 púlsares con periodos del orden de ~ms, observados durante 5-10 años con una precisión en la cronometración de 100 ns.

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Pulsar Timing Arrays:



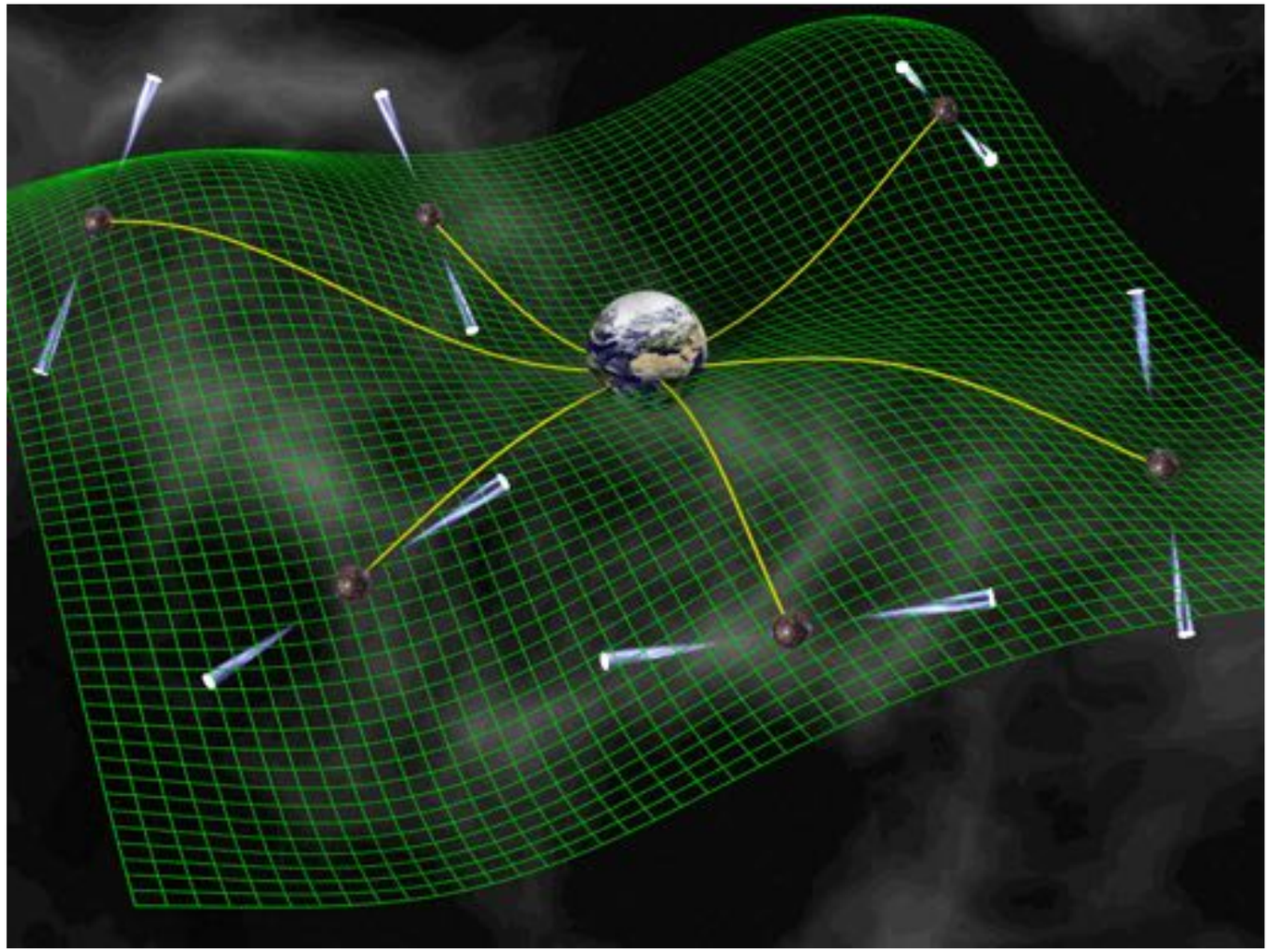
- OGs de frecuencia muy baja inducirán residuos en la cronometración de pulsares que pueden ser detectadas mediante medidas de muy alta precisión.

- Observatorios en operación: European Pulsar Timing Array (EPTA), el North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav) y el Parkes Pulsar Timing Array (PPTA). Recientemente, estas colaboraciones han creado un consorcio de colaboración llamado International Pulsar Timing Array (IPTA).

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Pulsar Timing Arrays:

  - OGs de frecuencia muy baja inducirán residuos en la cronometración de pulsares que pueden ser detectadas mediante medidas de muy alta precisión.

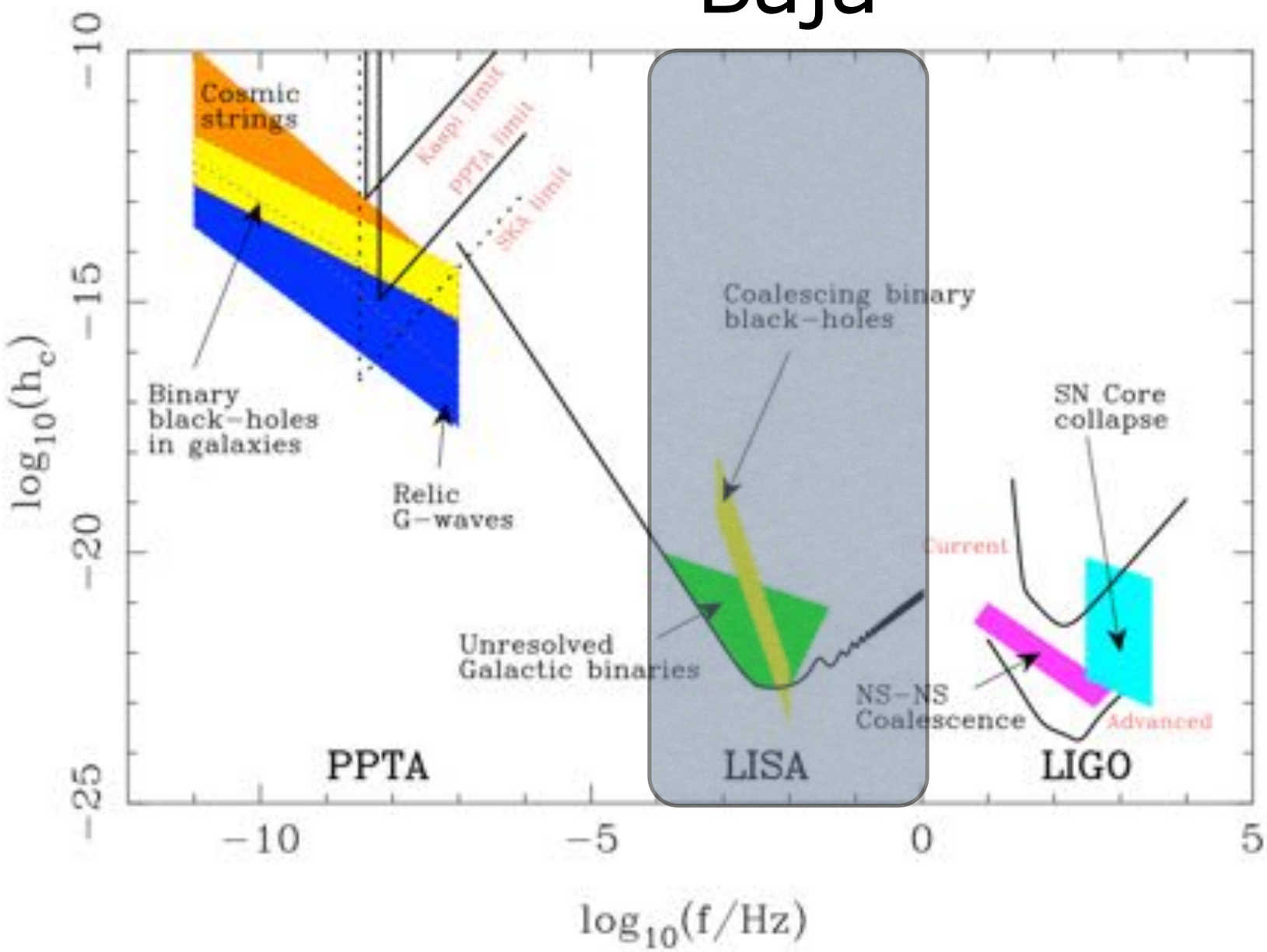


  - Futuro: *Square Kilometer Array* (SKA)

Detectores de Ondas Gravitatorias

- Espectro de las Ondas Gravitatorias:

Banda
Baja



THE GRAVITATIONAL UNIVERSE

A science theme addressed by the *eLISA* mission observing the entire Universe

Prof. Dr. Karsten Danzmann
Albert Einstein Institute Hannover

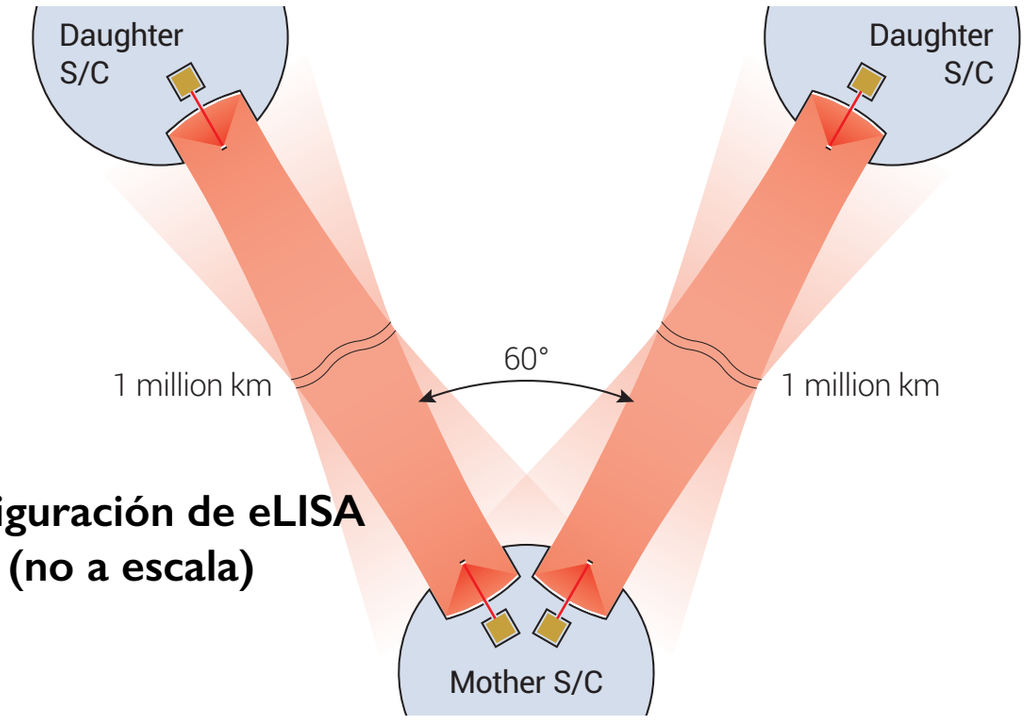
MPI for Gravitational Physics and
Leibniz Universität Hannover
Callinstr. 38
30167 Hannover
Germany

AUTHORS

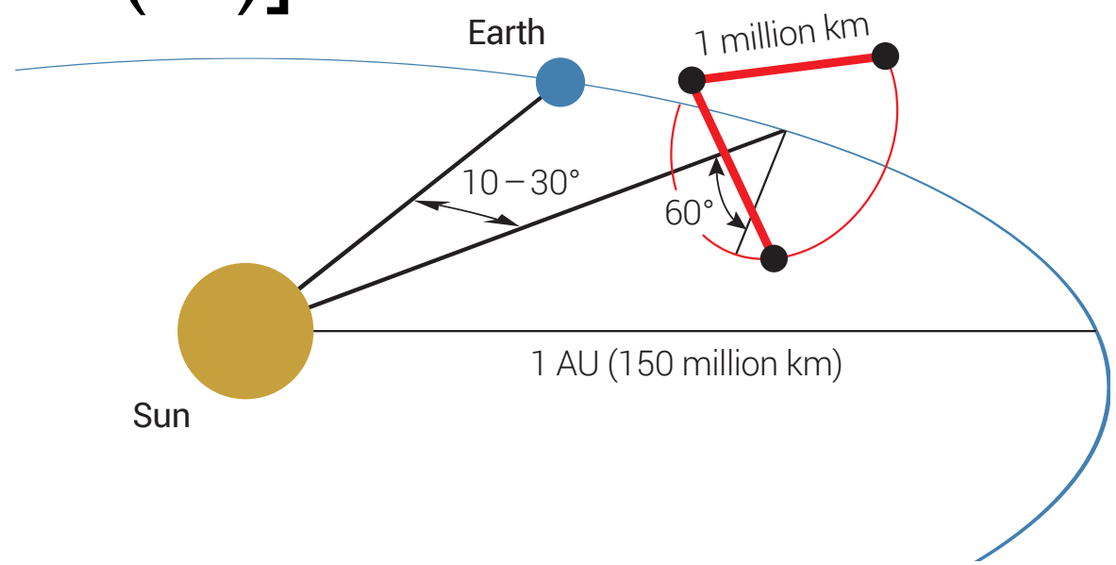
Pau Amaro Seoane, Sofiane Aoudia, Gerard Auger, Stanislav Babak, Enrico Barausse, Massimo Bassan, Volker Beckmann, Pierre Binétruy, Johanna Bogenstahl, Camille Bonvin, Daniele Bortoluzzi, Julien Brossard, Iouri Bykov, Chiara Caprini, Antonella Cavalleri, Monica Colpi, Giuseppe Congedo, Karsten Danzmann, Luciano Di Fiore, Marc Diaz Aguilo, Ingo Diepholz, Rita Dolesi, Massimo Dotti, Carlos F. Sopuerta, Luigi Ferraioli, Valerio Ferroni, Noemi Finetti, Ewan Fitzsimons, Jonathan Gair, Domenico Giardini, Ferran Gibert, Catia Grimani, Paul Groot, Hubert Halloin, Gerhard Heinzel, Martin Hewitson, Allan Hornstrup, David Hoyland, Mauro Hueller, Philippe Jetzer, Nikolaos Karnesis, Christian Killow, Andrzej Krolak, Ivan Lloro, Davor Mance, Thomas Marsh, Ignacio Mateos, Lucio Mayer, Joseph Moerschell, Gijs Nelemans, Miquel Nofrarias, Frank Ohme, Michael Perreur-Lloyd, Antoine Petiteau, Eric Plagnol, Edward Porter, Pierre Prat, Jens Reiche, David Robertson, Elena Maria Rossi, Stephan Rosswog, Ashley Ruiter, B.S. Sathyaprakash, Bernard Schutz, Alberto Sesana, Benjamin Sheard, Ruggero Stanga, Tim Sumner, Takamitsu Tanaka, Michael Tröbs, Hai-Bo Tu, Daniele Vetrugno, Stefano Vitale, Marta Volonteri, Gudrun Wanner, Henry Ward, Peter Wass, William Joseph Weber, Peter Zweifel

Detectores de Ondas Gravitatorias

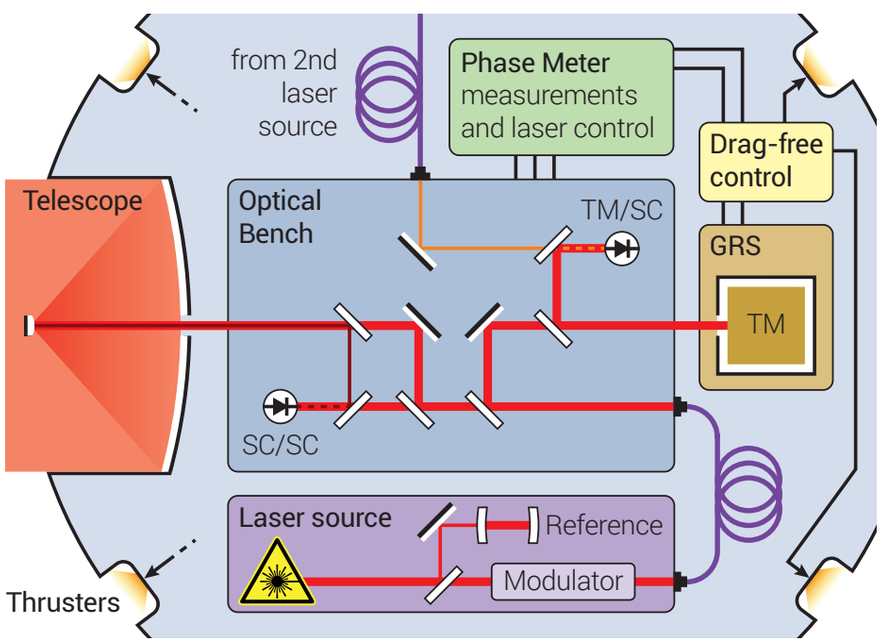
✳ El concepto de misión eLISA [NGO (L1)]:



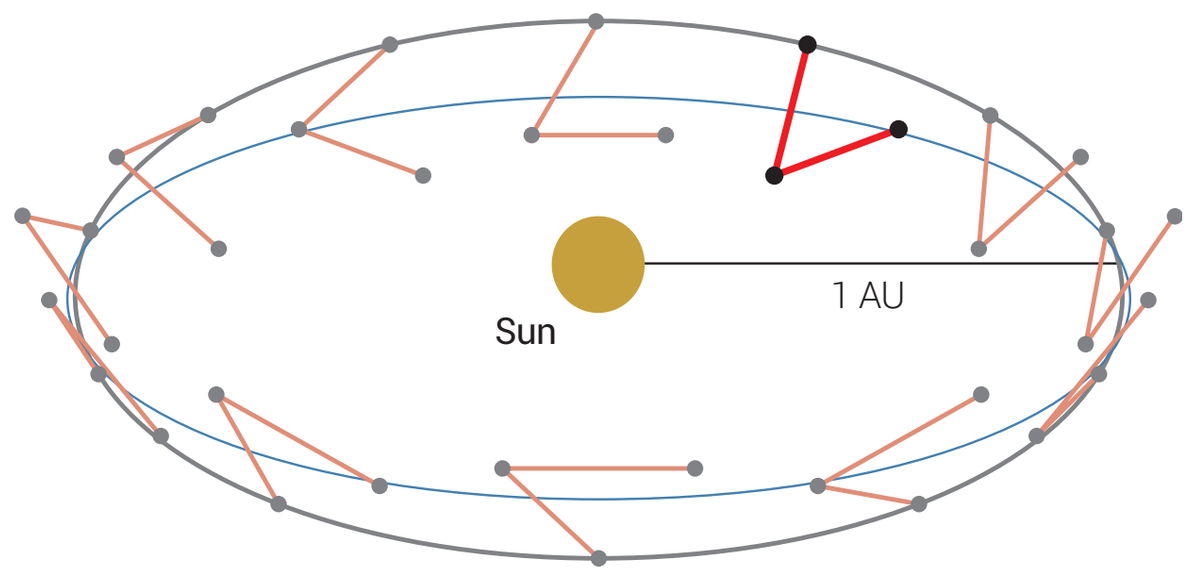
Configuración de eLISA (no a escala)



Órbita de eLISA

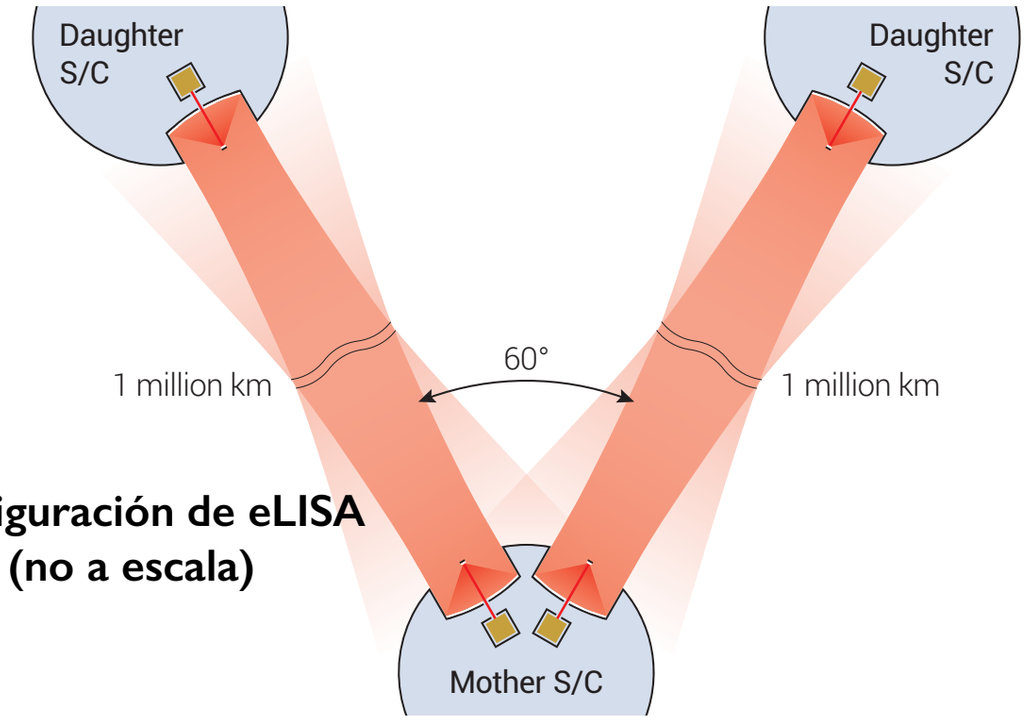


Carga útil de eLISA

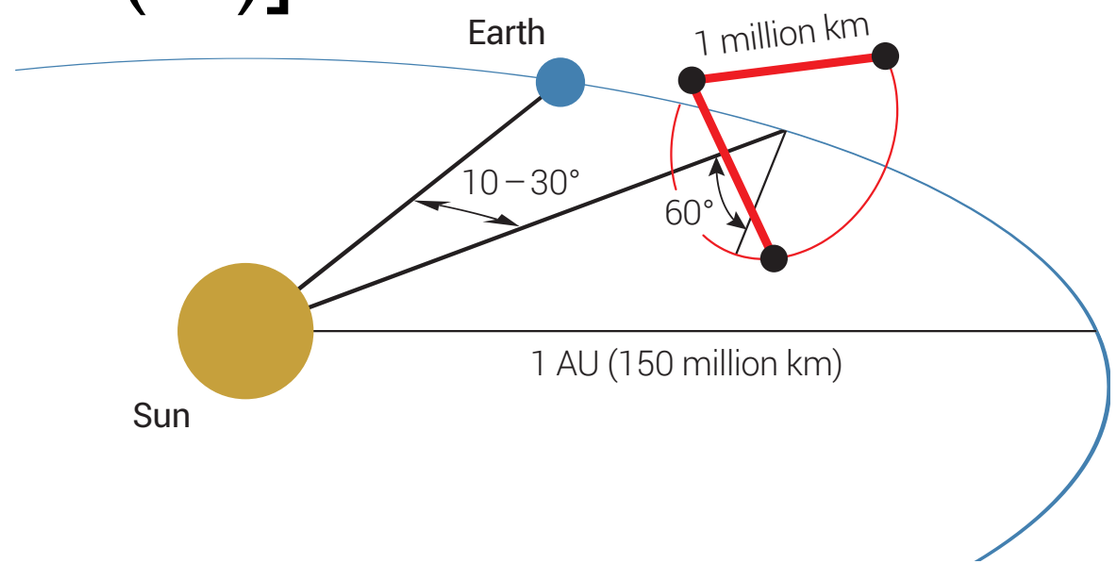


Detectores de Ondas Gravitatorias

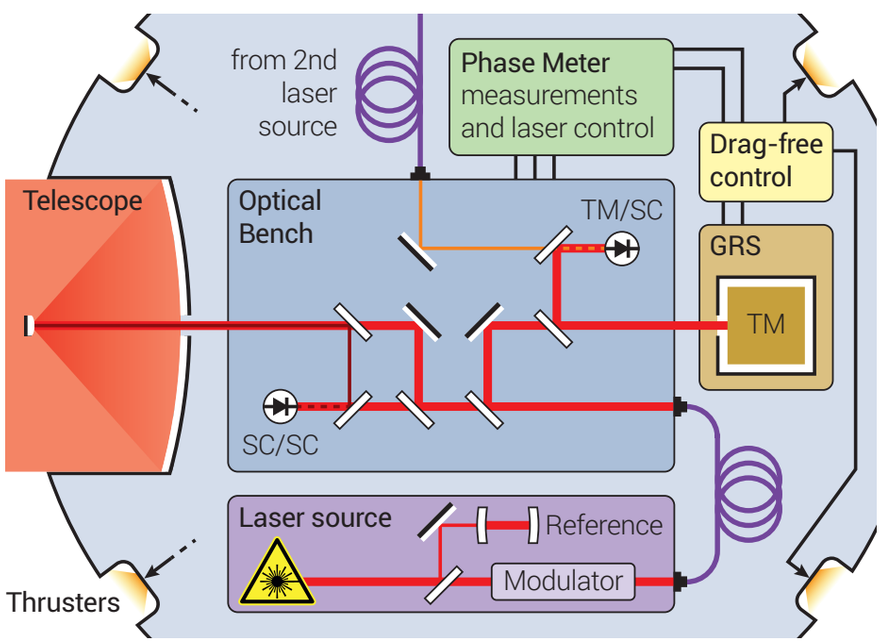
✳ El concepto de misión eLISA [NGO (L1)]:



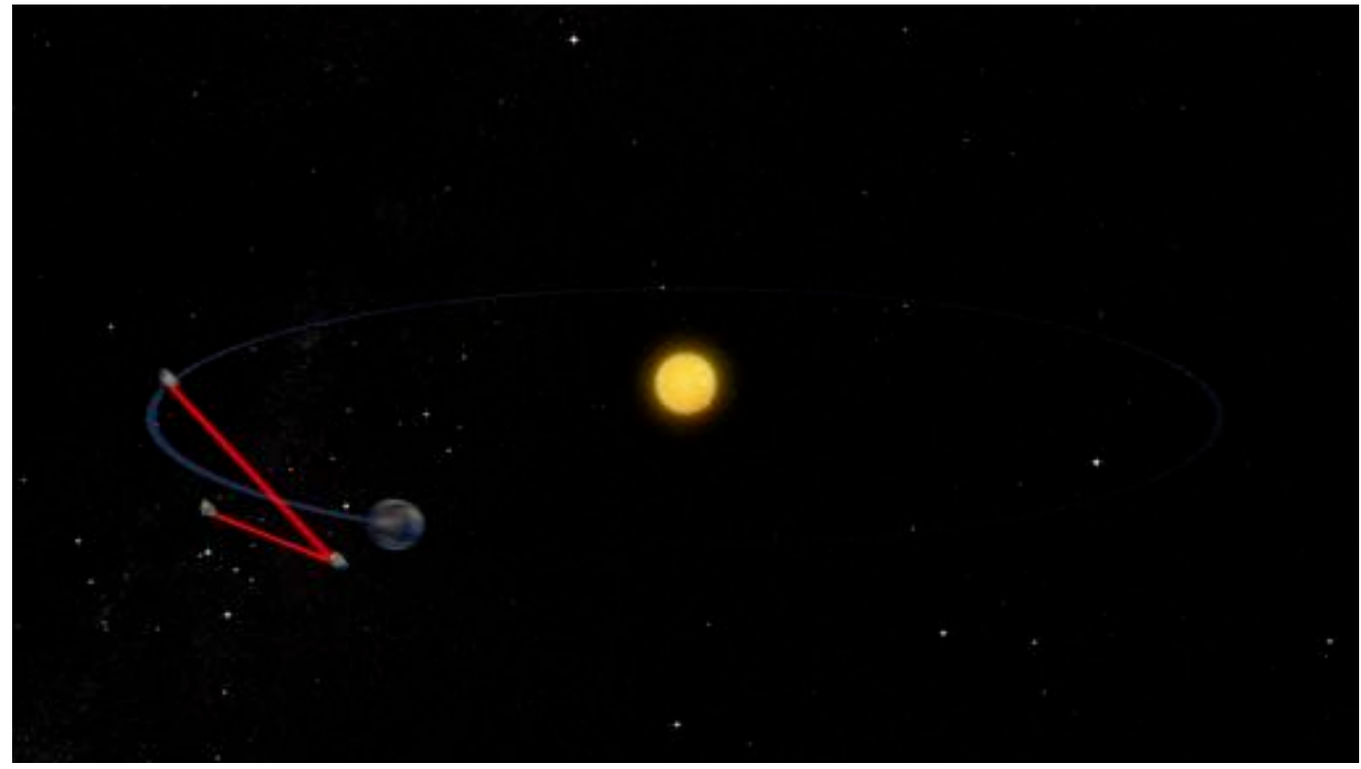
Configuración de eLISA (no a escala)



Órbita de eLISA

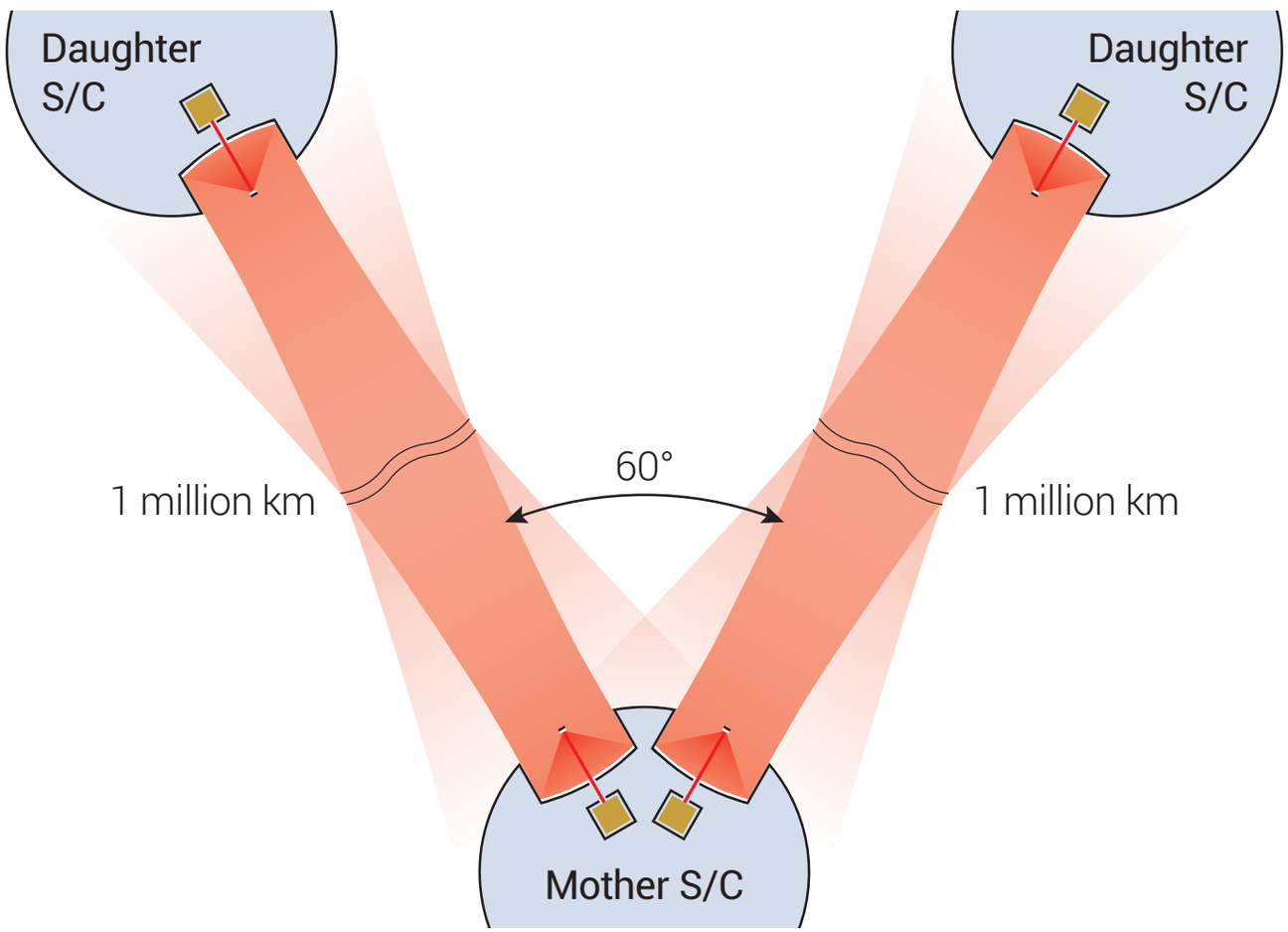


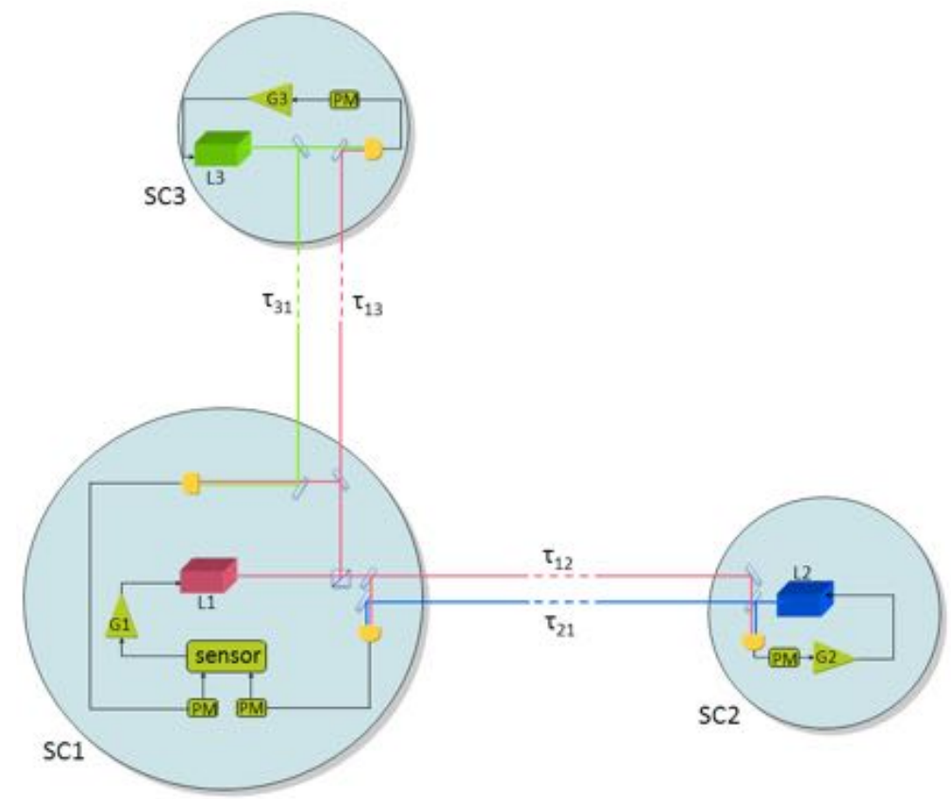
Carga útil de eLISA



Detectores de Ondas Gravitatorias

- Con este tamaño de detector no podemos usar espejos para reflejar los haces láser (eLISA ≠LIGO en el Espacio). Se utilizarán espejos activos y un sistema de copia de las fases del láser.





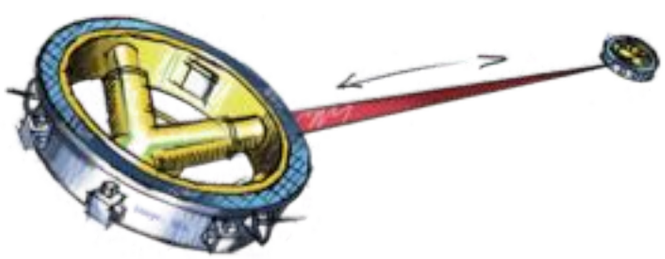
Detectores de Ondas Gravitatorias

- **LISA Pathfinder** es un demostrador tecnológico (ESA) para un observatorio de Ondas Gravitatorias como eLISA.

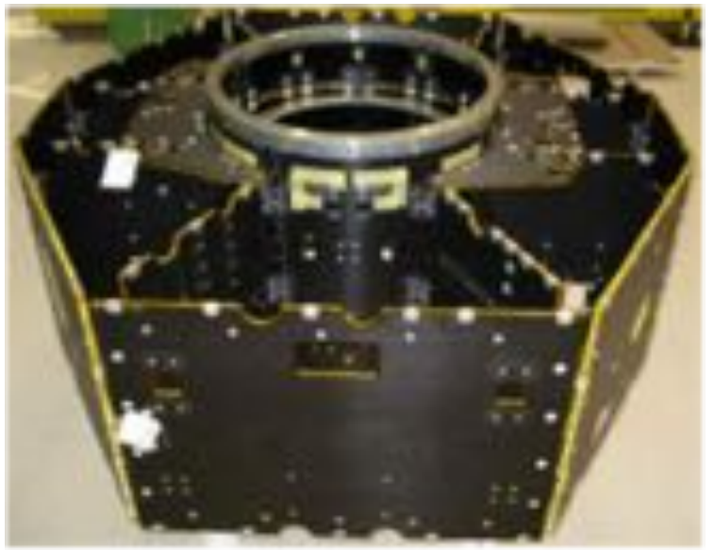
Detectores de Ondas Gravitatorias

✳ **LISA Pathfinder** es un demostrador tecnológico (ESA) para un observatorio de Ondas Gravitatorias como eLISA.

✳ Idea Básica: Reducir un brazo de eLISA y ponerlo en una única plataforma espacial.



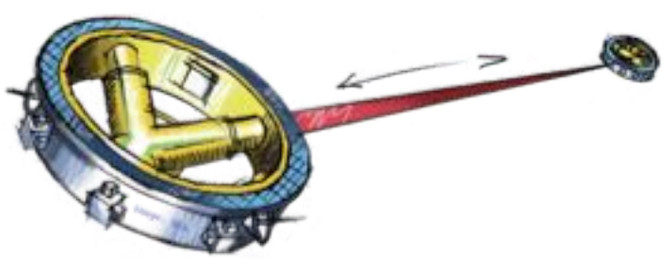
lisa pathfinder



Detectores de Ondas Gravitatorias

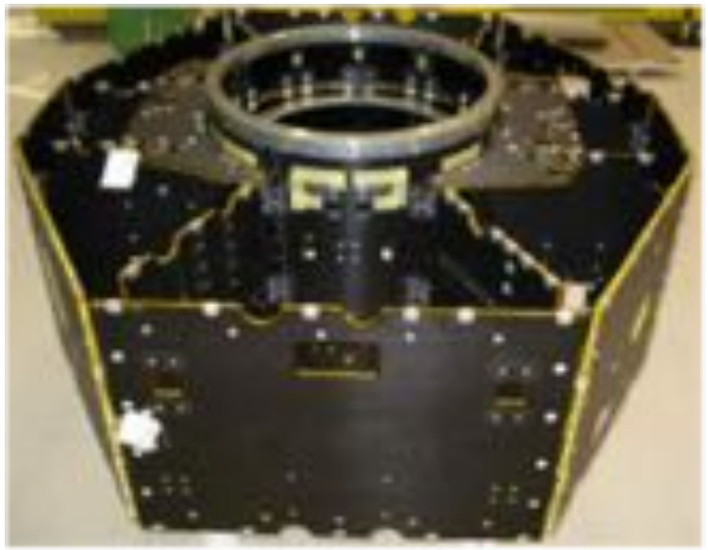
✳ **LISA Pathfinder** es un demostrador tecnológico (ESA) para un observatorio de Ondas Gravitatorias como eLISA.

✳ Idea Básica: Reducir un brazo de eLISA y ponerlo en una única plataforma espacial.



lisa pathfinder

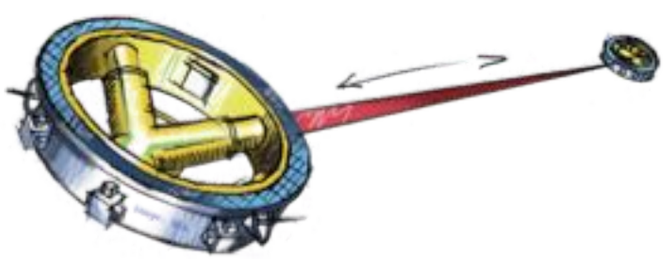
- El sistema de *Drag-free* no se puede testear completamente en tierra.



Detectores de Ondas Gravitatorias

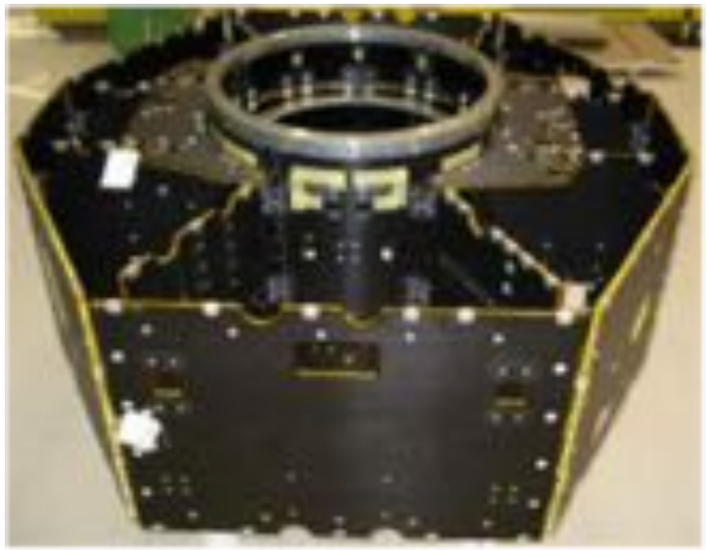
✳ **LISA Pathfinder** es un demostrador tecnológico (ESA) para un observatorio de Ondas Gravitatorias como eLISA.

✳ Idea Básica: Reducir un brazo de eLISA y ponerlo en una única plataforma espacial.



lisa pathfinder

- El sistema de *Drag-free* no se puede testear completamente en tierra.



- El LISA Technology Package (LTP) realizará tests de:
  - Tecnología *Drag-free*
  - Interferometría Láser al Picómetro
  - Otros subsistemas y software

Detectores de Ondas Gravitatorias

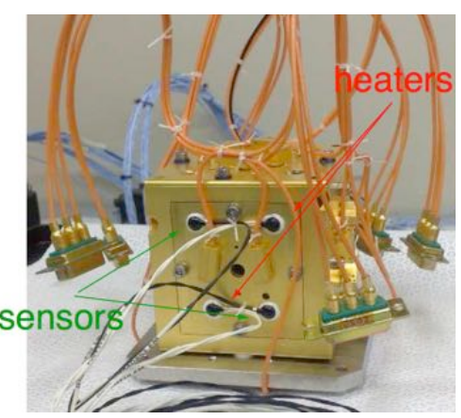
- LISA PathFinder. La contribución del ICE (CSIC-IEEC):

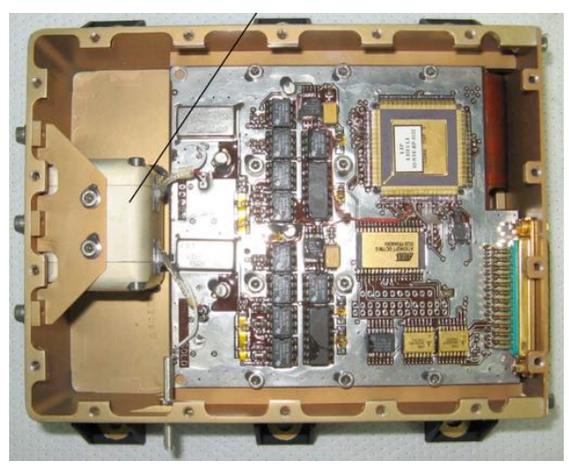
Diagnósticos

Objetivo:
Clasificación del Ruido

Sensores para:
Temperatura
Campos Magnéticos
Partículas Cargadas

Calibración:
Calentadores
Bobinas de inducción

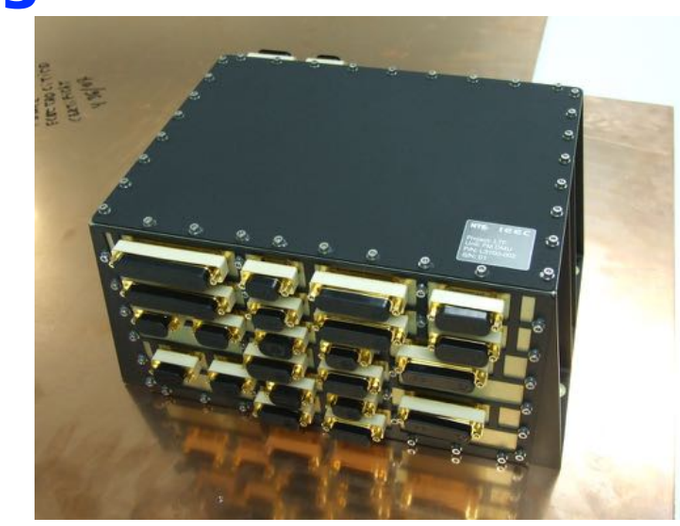




DMU: **Ordenador del LTP**

Hardware:
Data Processing Unit (*DPU*)
Power Distribution Unit (*PDU*)
Data Acquisition Unit (*DAU*)

Software:
Process phase-meter readout
Charge management control
UV light control
Caging mechanism drive



Detectores de Ondas Gravitatorias

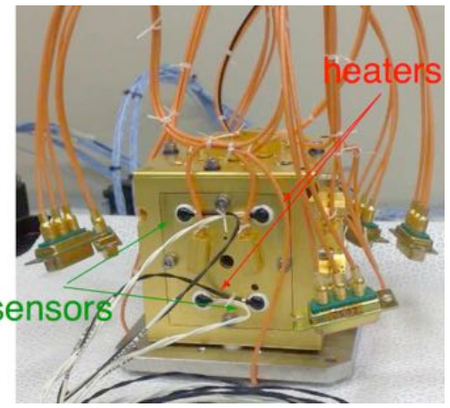
- LISA PathFinder. La contribución del ICE (CSIC-IEEC):

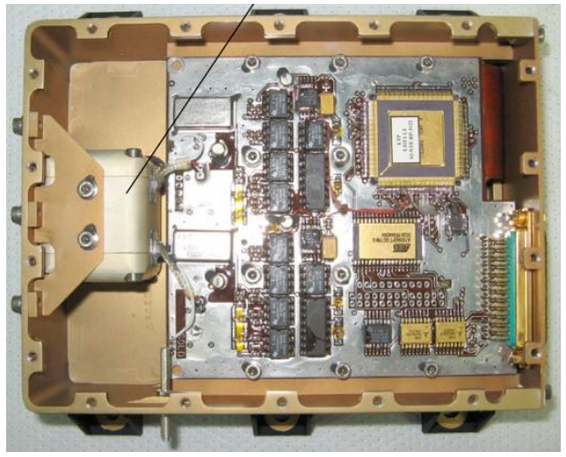
Diagnósticos

DMU: **Ordenador del LTP**

Caging mechanism drive

Bobinas de inducción





Detectores de Ondas Gravitatorias

✳ Status de **LISA Pathfinder**:

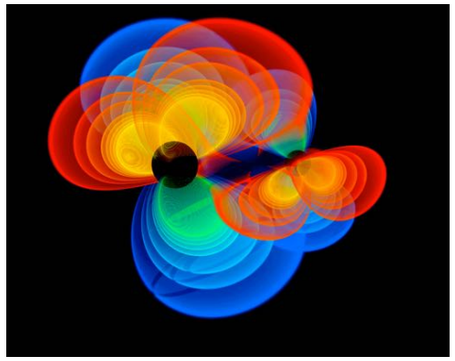
lisa pathfinder

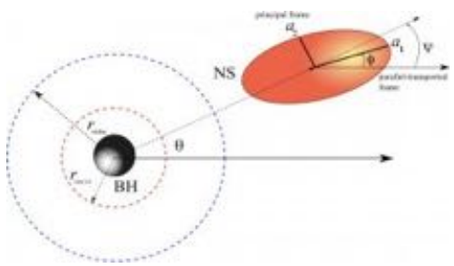
Fecha de Lanzamiento: 2 Octubre 2015

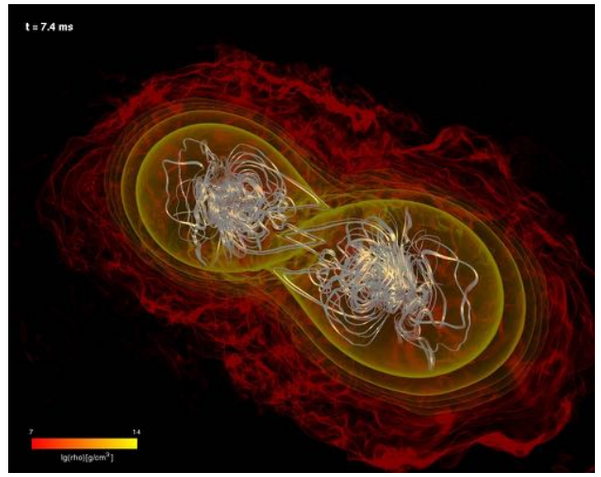
Fuentes de Ondas Gravitatorias

Fuentes de Ondas Gravitatorias (Banda Alta)

Coalescencia de Sistemas Binarios Compactos

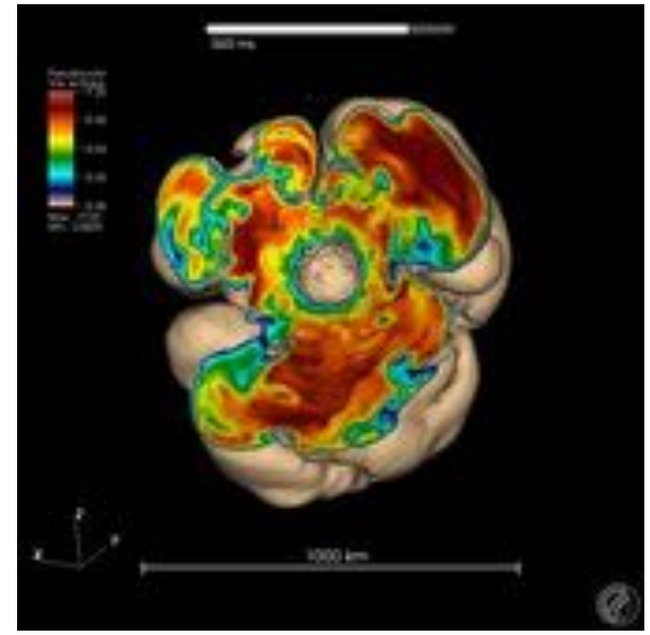




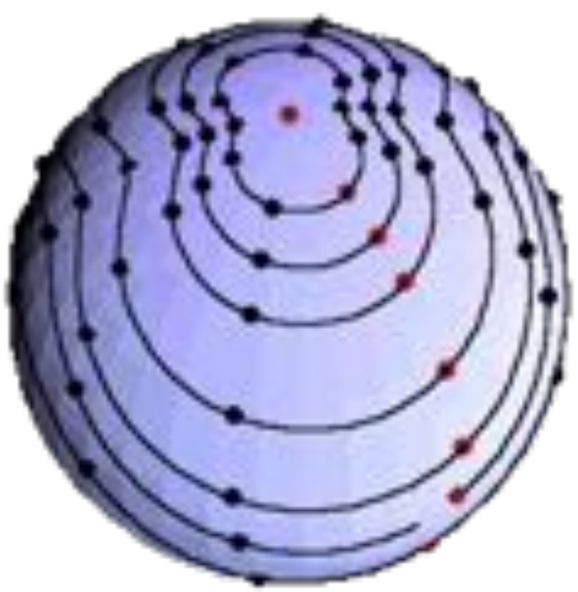


NS-NS, BH-BH, BH-NS

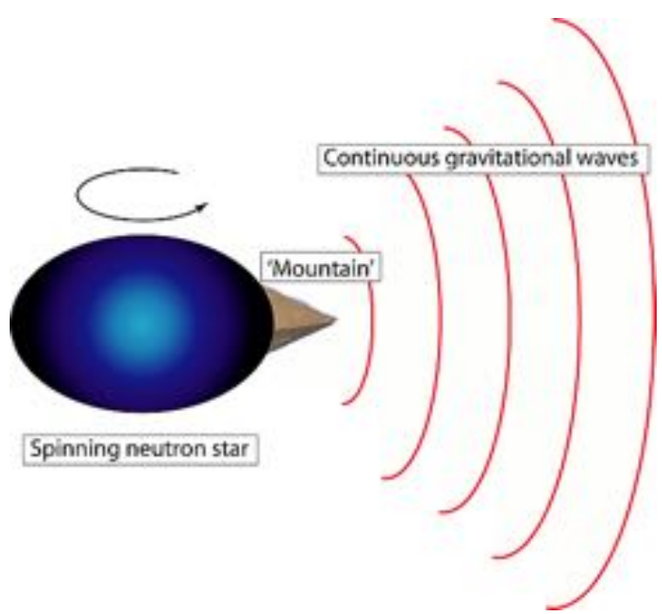
Core Collapse Supernovae



Oscilaciones de Estrellas Relativistas

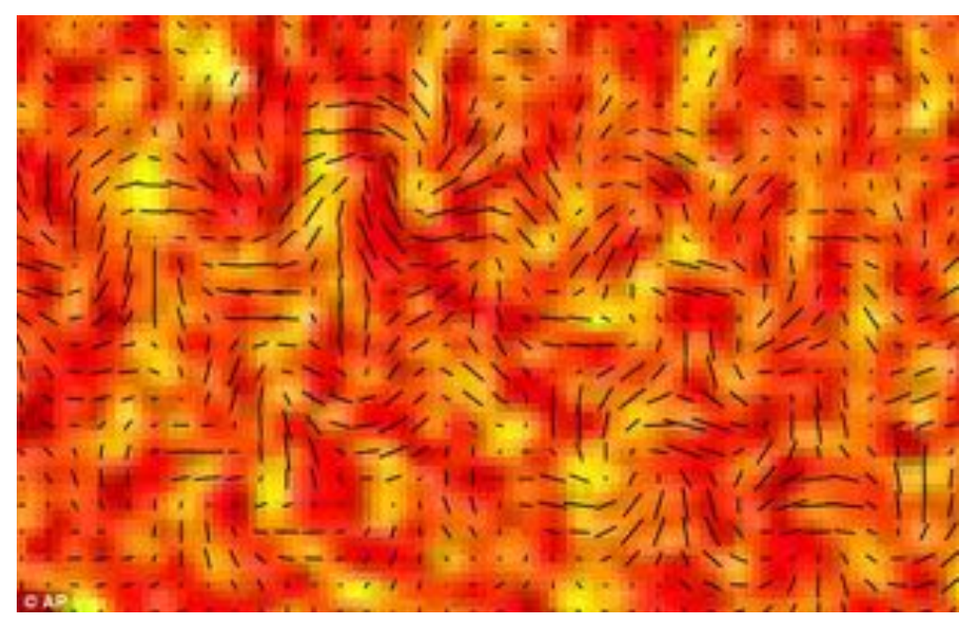


Modos R



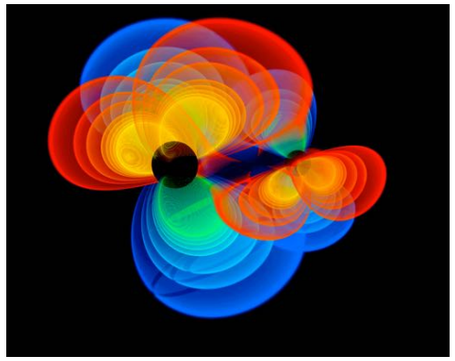
"montañas" en Estrellas de Neutrones

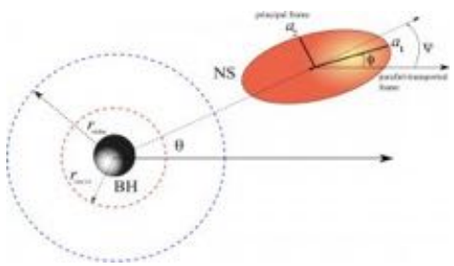
Señales Estocásticas/
Fondos de Ondas Gravitatorias

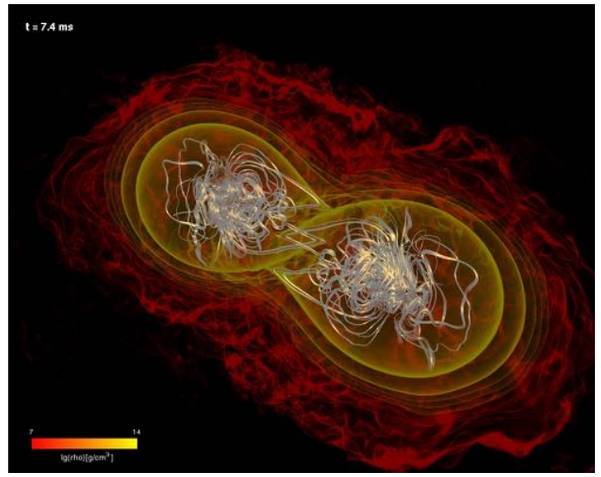


Fuentes de Ondas Gravitatorias (Banda Alta)

Coalescencia de Sistemas Binarios Compactos

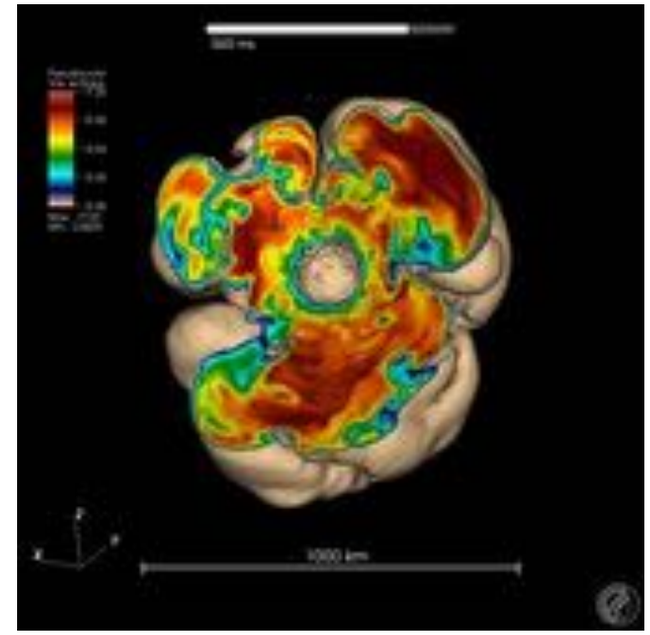




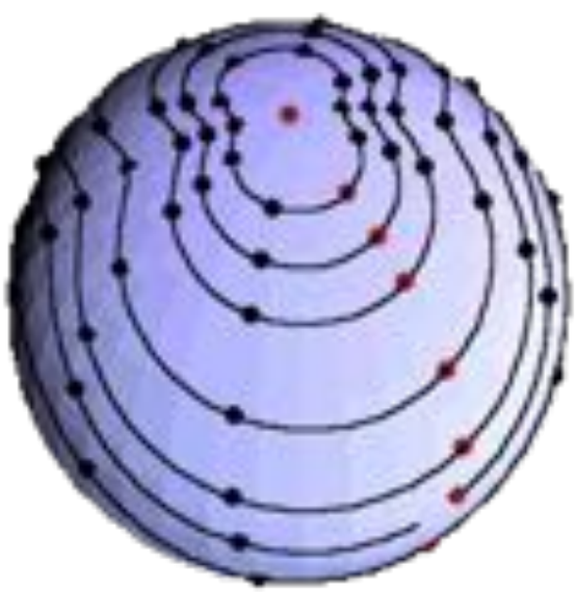


NS-NS, BH-BH, BH-NS

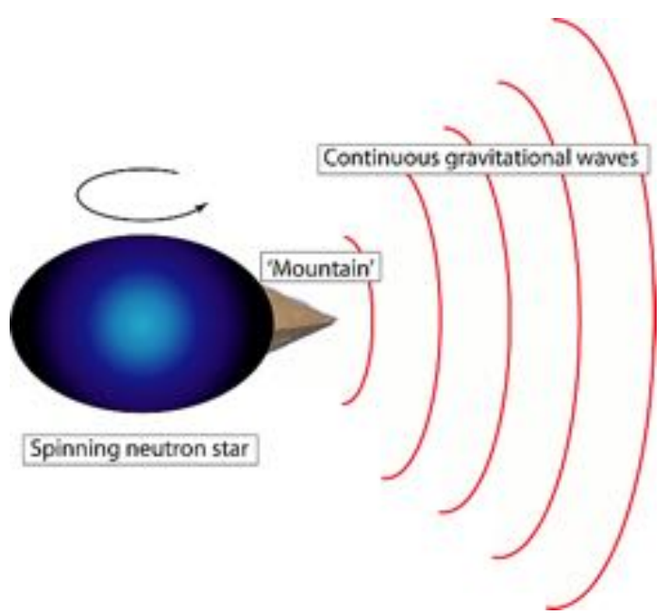
Core Collapse Supernovae



Oscilaciones de Estrellas Relativistas

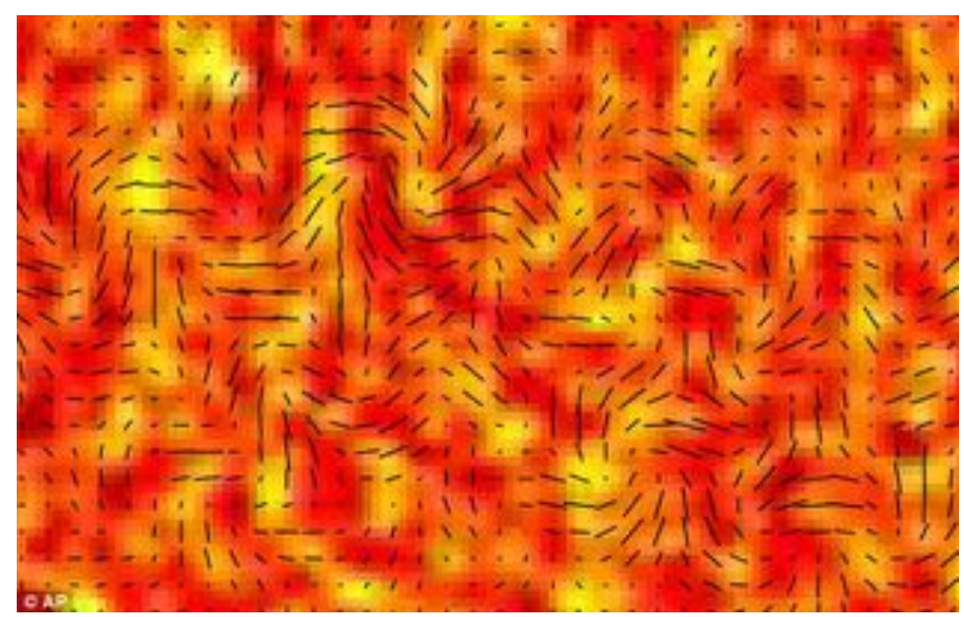


Modos R



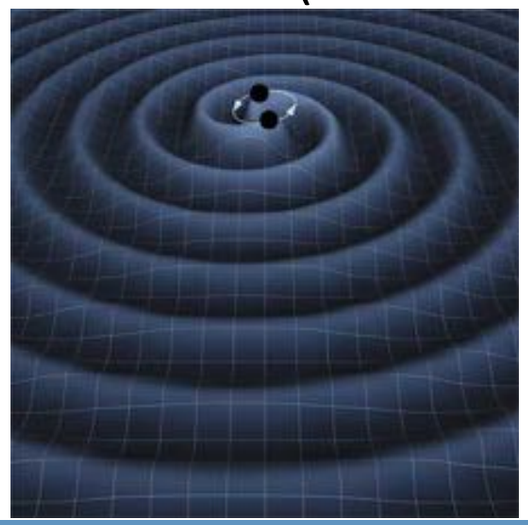
"montañas" en Estrellas de Neutrones

Señales Estocásticas/
Fondos de Ondas Gravitatorias

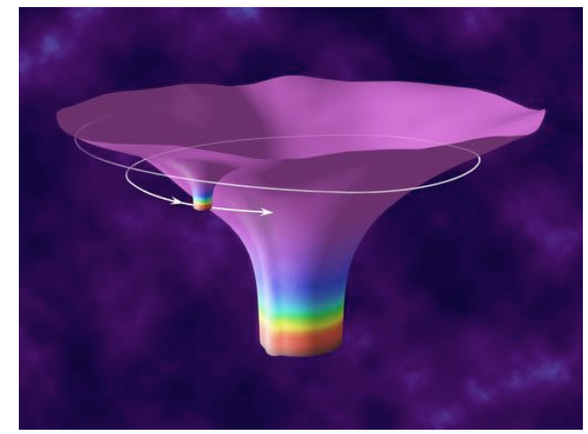


Fuentes de Ondas Gravitatorias (Banda Baja)

Massive Black Holes (10^4 to 10^8 $M_\odot$)

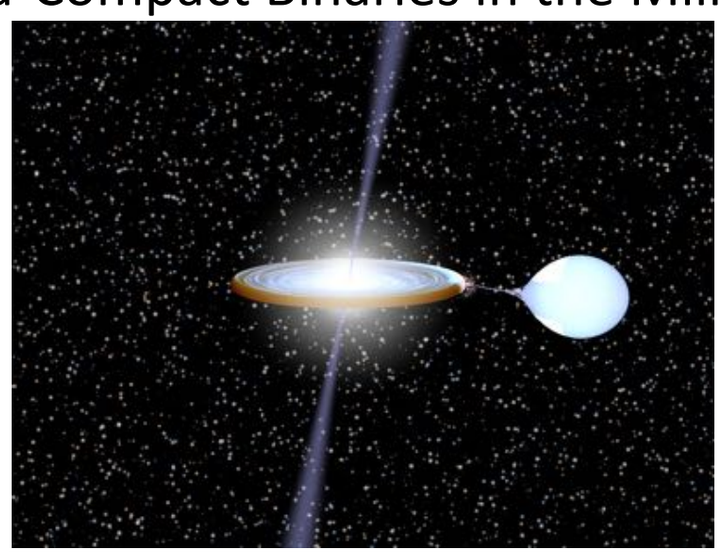


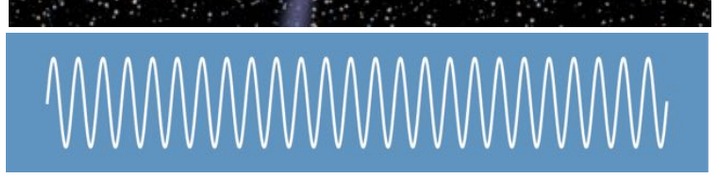
Extreme Mass Ratio Inspirals, EMRIs
(1 to 10 $M_\odot$ into 10^4 to 5 x 10^6 $M_\odot$)



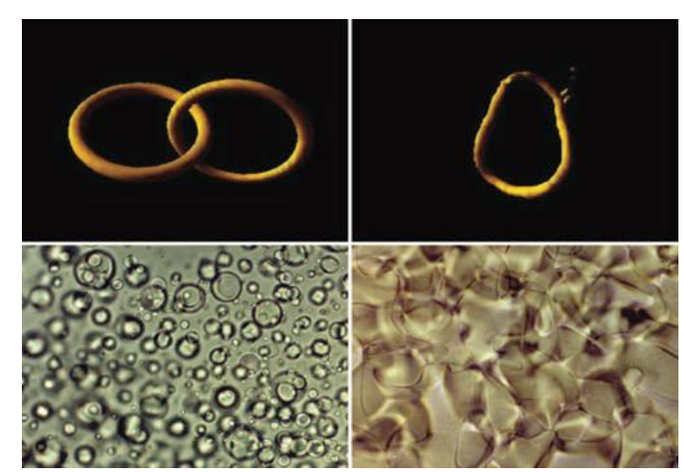
También para la banda muy baja

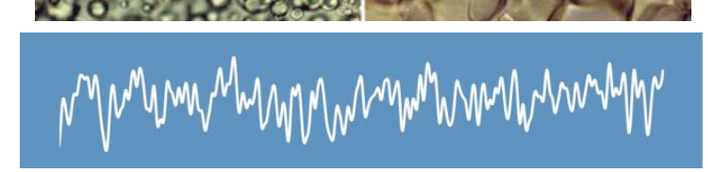
Ultra-Compact Binaries in the Milky Way





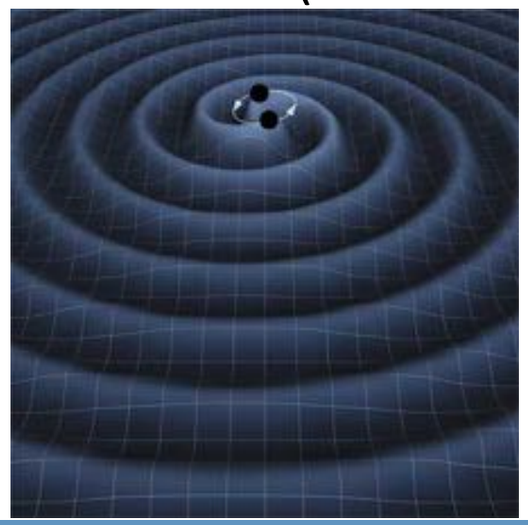
Stochastic Signals



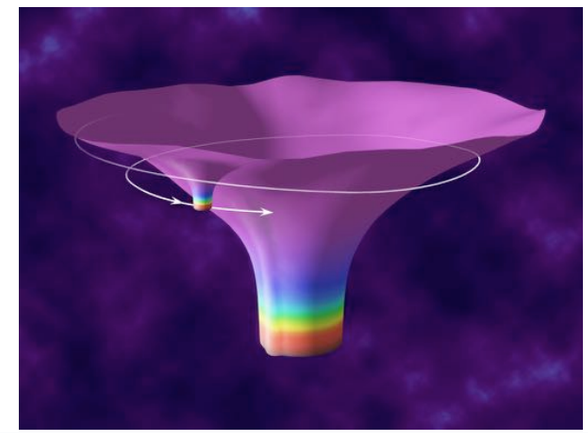


Fuentes de Ondas Gravitatorias (Banda Baja)

Massive Black Holes (10^4 to 10^8 $M_\odot$)

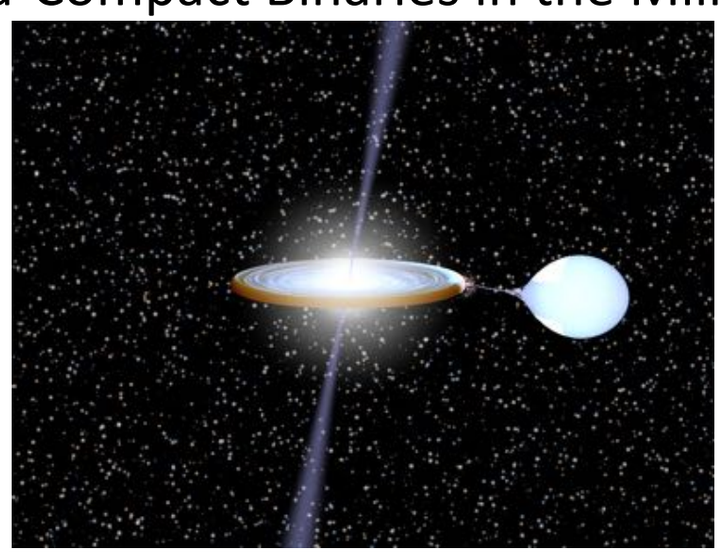


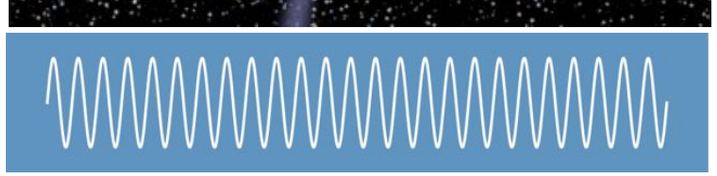
Extreme Mass Ratio Inspirals, EMRIs
(1 to 10 $M_\odot$ into 10^4 to 5 x 10^6 $M_\odot$)



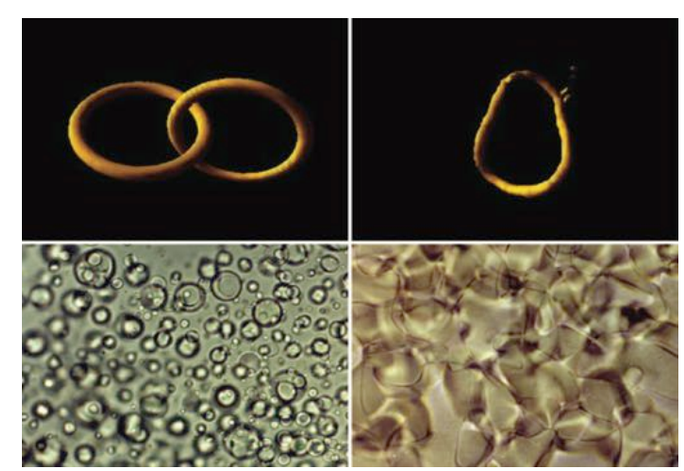
También para la banda muy baja

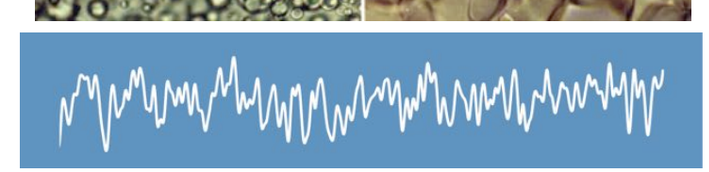
Ultra-Compact Binaries in the Milky Way





Stochastic Signals





Fuentes Garantizadas!

Conclusiones

Conclusiones

- Todos los tests experimentales y observaciones son compatibles con la Relatividad General de Einstein.

Conclusiones

- Todos los tests experimentales y observaciones son compatibles con la Relatividad General de Einstein.

- La universalidad en el acoplamiento entre la gravedad y la materia se ha comprobado al nivel de:

$$10^{-12}$$

Conclusiones

- Todos los tests experimentales y observaciones son compatibles con la Relatividad General de Einstein.

- La universalidad en el acoplamiento entre la gravedad y la materia se ha comprobado al nivel de:

$$10^{-12}$$

- Estudios en el Sistema Solar han comprobado las aproximaciones de campo gravitatorio débil a niveles de:

$$10^{-(3-5)}$$

Conclusiones

- A escalas más grandes, hay fenómenos físicos en el Universo, como la materia oscura y la energía oscura, cuya inclusión dentro de un marco teórico gobernado por la Relatividad General produce dificultades (se require la introducción de campos de materia no identificados aún, o resolver conflictos con la teoría cuántica), y para los cuales hay alternativas (no del todo viables de momento) en términos de modificaciones de la teoría gravitatoria: Modificaciones a grandes distancias e incluso modificaciones de la dinámica newtoniana (por ejemplo teorías tipo MOND).

Conclusiones

- Hay grandes expectativas para la detección directa de Ondas Gravitatorias en la presente década (detectores terrestres y PTAs). Además, la misión L3 de la ESA se dedicará a la Astronomía de Ondas Gravitatorias en la banda de bajas frecuencias.

Conclusiones

- Hay grandes expectativas para la detección directa de Ondas Gravitatorias en la presente década (detectores terrestres y PTAs). Además, la misión L3 de la ESA se dedicará a la Astronomía de Ondas Gravitatorias en la banda de bajas frecuencias.

- La detección y el análisis de ondas gravitatorias de fuentes astrofísicas abrirá una nueva ventana a la exploración del Universo que promete descubrimientos revolucionarios con impacto en Astrofísica, Cosmología y Física Fundamental.

Conclusiones

- Hay grandes expectativas para la detección directa de Ondas Gravitatorias en la presente década (detectores terrestres y PTAs). Además, la misión L3 de la ESA se dedicará a la Astronomía de Ondas Gravitatorias en la banda de bajas frecuencias.

- La detección y el análisis de ondas gravitatorias de fuentes astrofísicas abrirá una nueva ventana a la exploración del Universo que promete descubrimientos revolucionarios con impacto en Astrofísica, Cosmología y Física Fundamental.

- En este sentido, la combinación con medidas provinientes de otros mensajeros cósmicos (luz, neutrinos, …) puede ser crucial para realizar grandes avances.

¡Gracias por la atención!