

Ondas Gravitacionais

Odylio Denys Aguiar odylio.aguiar@inpe.br

Divisão de Astrofísica

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
pelas Colorações LIGO (GWINPE- LSC) e Virgo*

César A. Costa
Marcos A. Okada
Tábata A. Ferreira
Juliédson A. Malaquias Reis
Ana Luiza B. B. Guimarães S..
Arthur Pereira dos Reis
Julio C. Martins

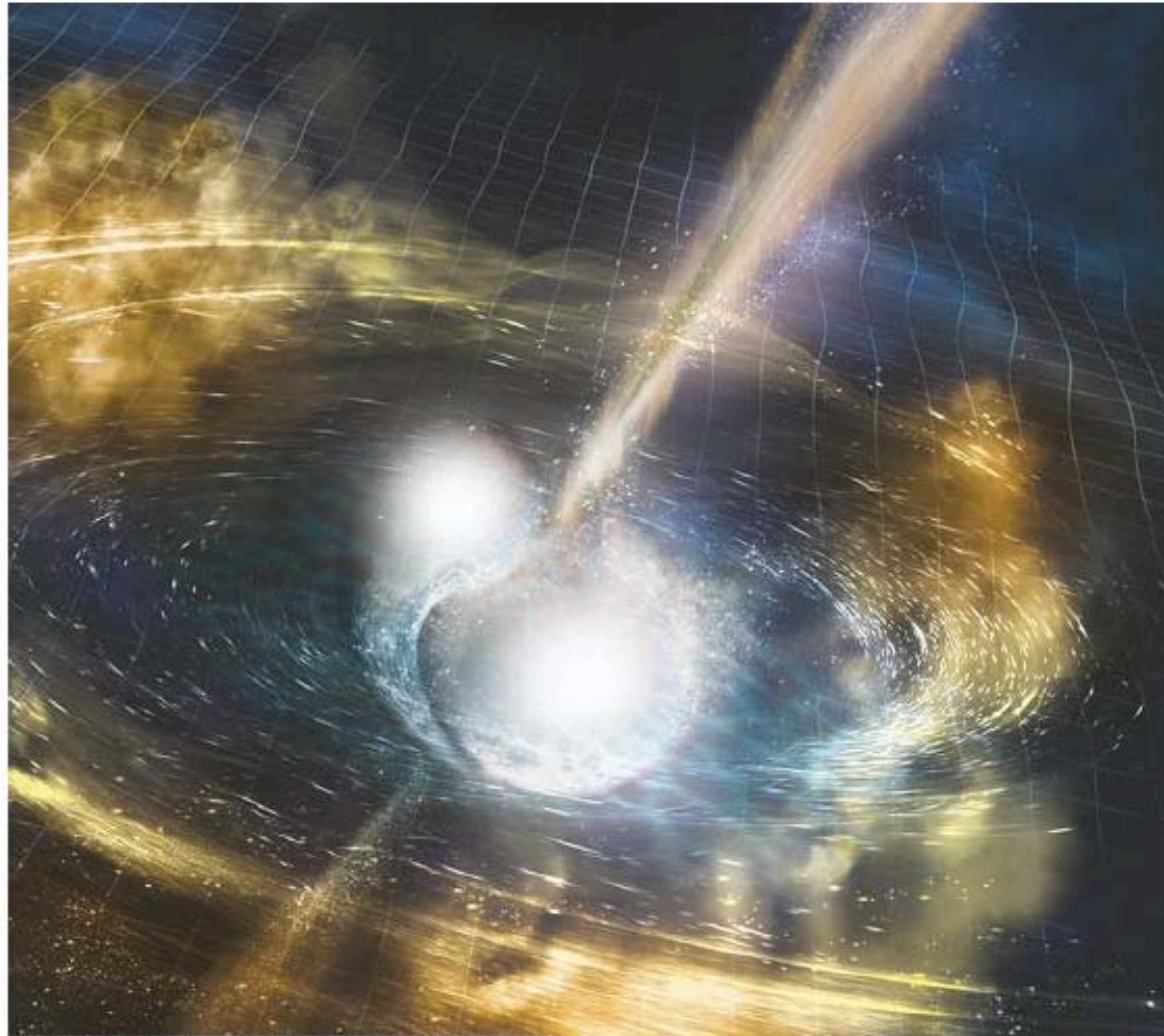


LIGO
Scientific
Collaboration



Ondas Gravitacionais

Ondas gravitacionais foram detectadas pela primeira vez em 14 de setembro de 2015, às 6h51 (horário de Brasília) pelos detectores gêmeos do Observatório Interferométrico de Ondas Gravitacionais LIGO (do inglês Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory), localizados em Livingston, Louisiana, e Hanford, estado de Washington, nos Estados Unidos, cerca de 100 anos após terem sua existência prevista por Albert Einstein, em sua teoria da Relatividade Geral. O sinal detectado era o de um par de buracos negros espiralando um em direção ao outro, seguido do ressoar do buraco negro resultante da fusão dos dois. Esta fusão ocorreu a uma distância de ~ 1.3 bilhões de anos-luz. As massas dos buracos negros iniciais eram de $29 M_{\odot}$ (massas do Sol) e $36 M_{\odot}$, e a massa do buraco negro resultante foi de $62 M_{\odot}$. Cerca de $3.0 M_{\odot}c^2$ de energia foi irradiada na forma de ondas gravitacionais. Este evento inaugurou a Astronomia de Ondas Gravitacionais, uma nova janela para observar o Universo. Outros quatro eventos envolvendo também pares de buracos negros foram detectados: em 26 de dezembro de 2015, 04 de janeiro, 8 de junho e 14 de agosto de 2017, este último também detectado pelo interferômetro Virgo, consolidando esta astronomia. Porém, um evento ainda mais impressionante foi observado no dia 17 de agosto de 2017, às 09:41:04 (do horário de Brasília). Tratava-se do sinal em ondas gravitacionais de um par de estrelas de nêutrons, que ao se fundirem, diferentemente dos pares de buracos negros, emitiram uma gama enorme de ondas eletromagnéticas, que cobriram boa parte de todo o espectro, inaugurando um novo tipo de astronomia, chamada de multimessageira, envolvendo observação conjunta de ondas gravitacionais e eletromagnéticas. Nesta apresentação daremos maiores detalhes sobre estas ondas gravitacionais, os detectores, o que já aprendemos com todas estas detecções e as consequências desta fenomenal conquista da ciência contemporânea, ganhadora do prêmio Nobel de Física de 2017. Também traçaremos as perspectivas para o futuro da recém-inaugurada Astronomia de Ondas Gravitacionais, que vai revolucionar o nosso conhecimento da física e astrofísica e, provavelmente, nos ajudar a responder às suas principais questões da atualidade: a matéria escura, a energia escura e como o Universo teve início.



Credit: NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

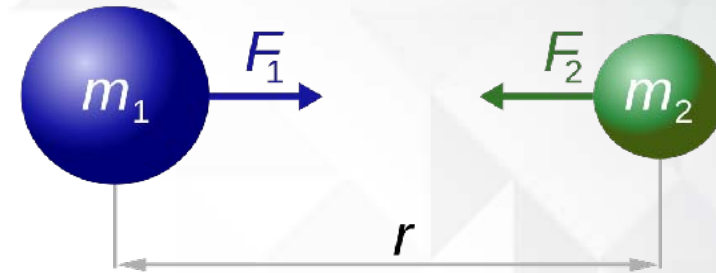
O que são ONDAS GRAVITACIONAIS?

A Gravidade:

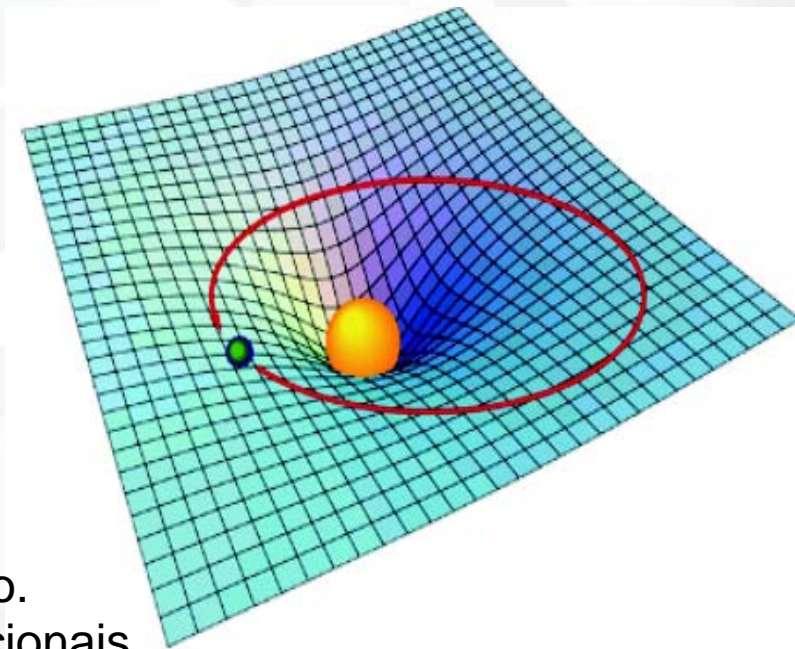
Para Newton a Gravidade era uma força que agia à distância.

Se uma massa mudasse a sua posição todo o Universo receberia esta informação instantaneamente. O espaço era infinitamente rígido.

Já Einstein afirmava que nenhuma informação poderia viajar à velocidade maior que a da luz. O espaço, para Einstein, formava com o tempo uma entidade chamada *espaço-tempo*, que apesar de muito rígida, não era infinitamente rígida. As massas, principalmente as grandes, causariam deformação nesse *espaço-tempo*, e este *espaço-tempo* deformado produziria os efeitos atrativos. Se uma massa mudasse a sua posição, esta informação seria transmitida por ondulações nesse *espaço-tempo* que viajariam à velocidade da luz no próprio tecido do espaço-tempo. Einstein chamou estas ondulações de Ondas Gravitacionais.



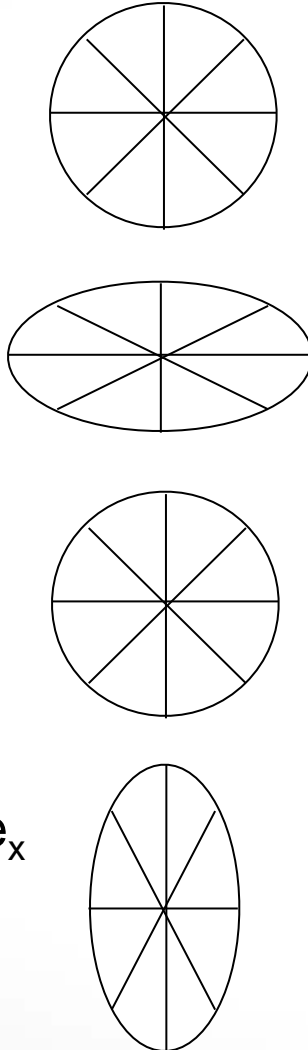
$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$



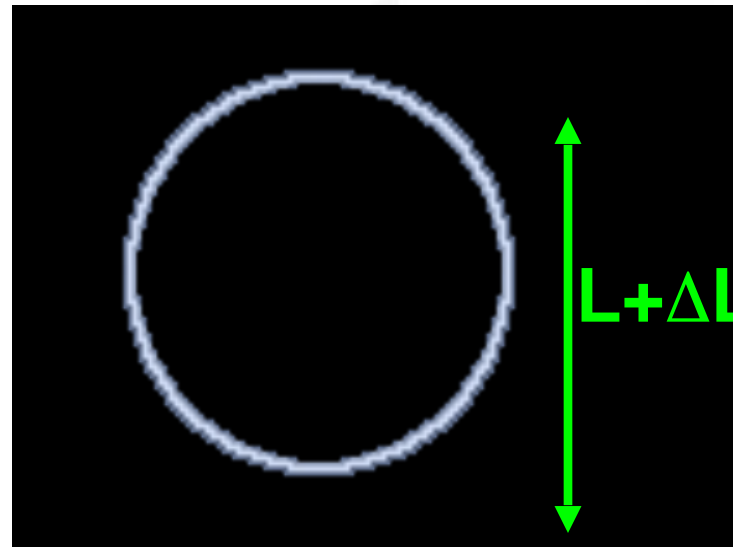
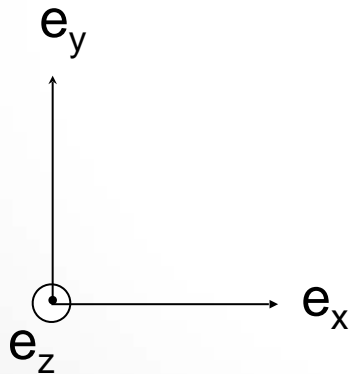
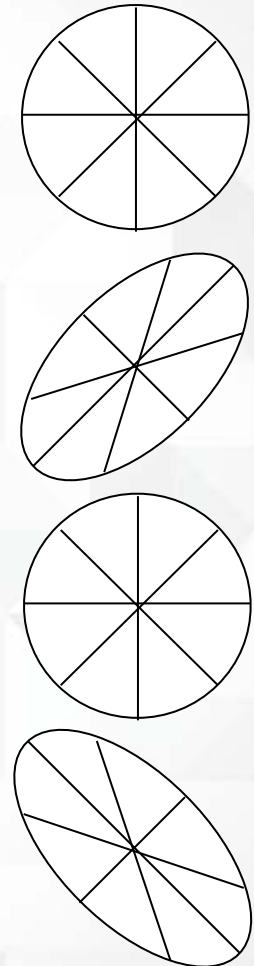
Como podemos detectar/observar ONDAS GRAVITACIONAIS?

Duas polarizações “+” e “x”

h_+

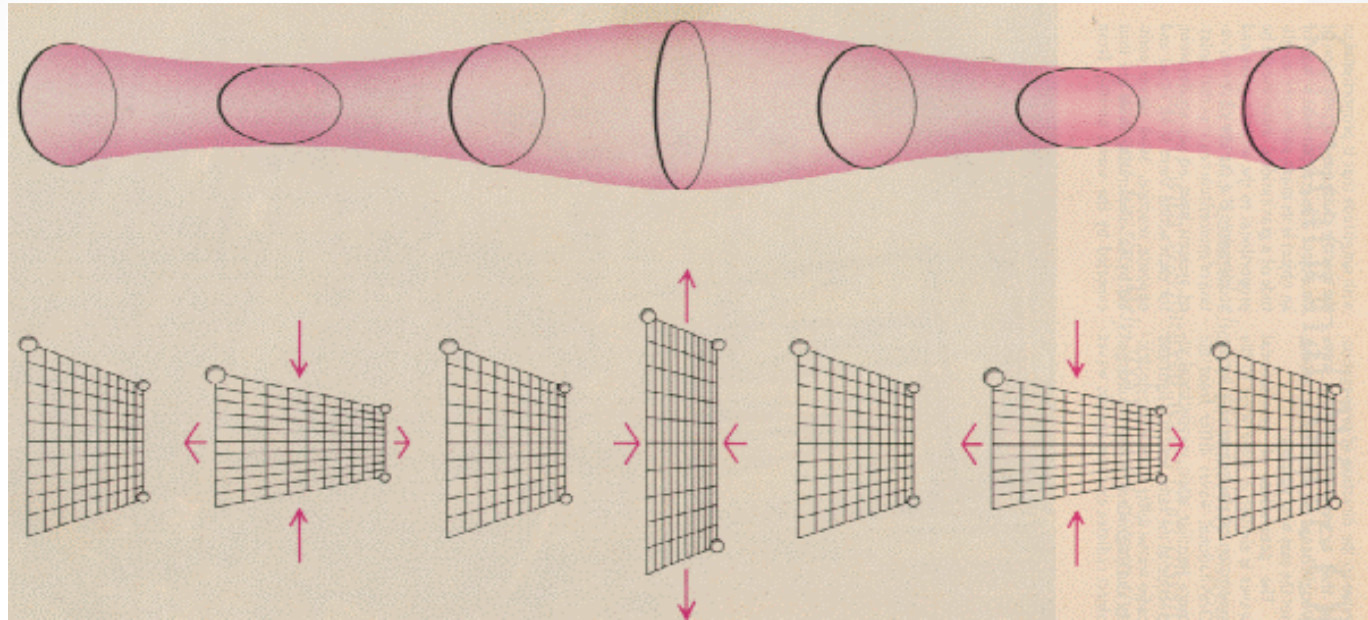


h_x



Deformação sobre um anel

$$h = \Delta L/L = ((h_+)^2 + (h_x)^2)^{1/2}$$

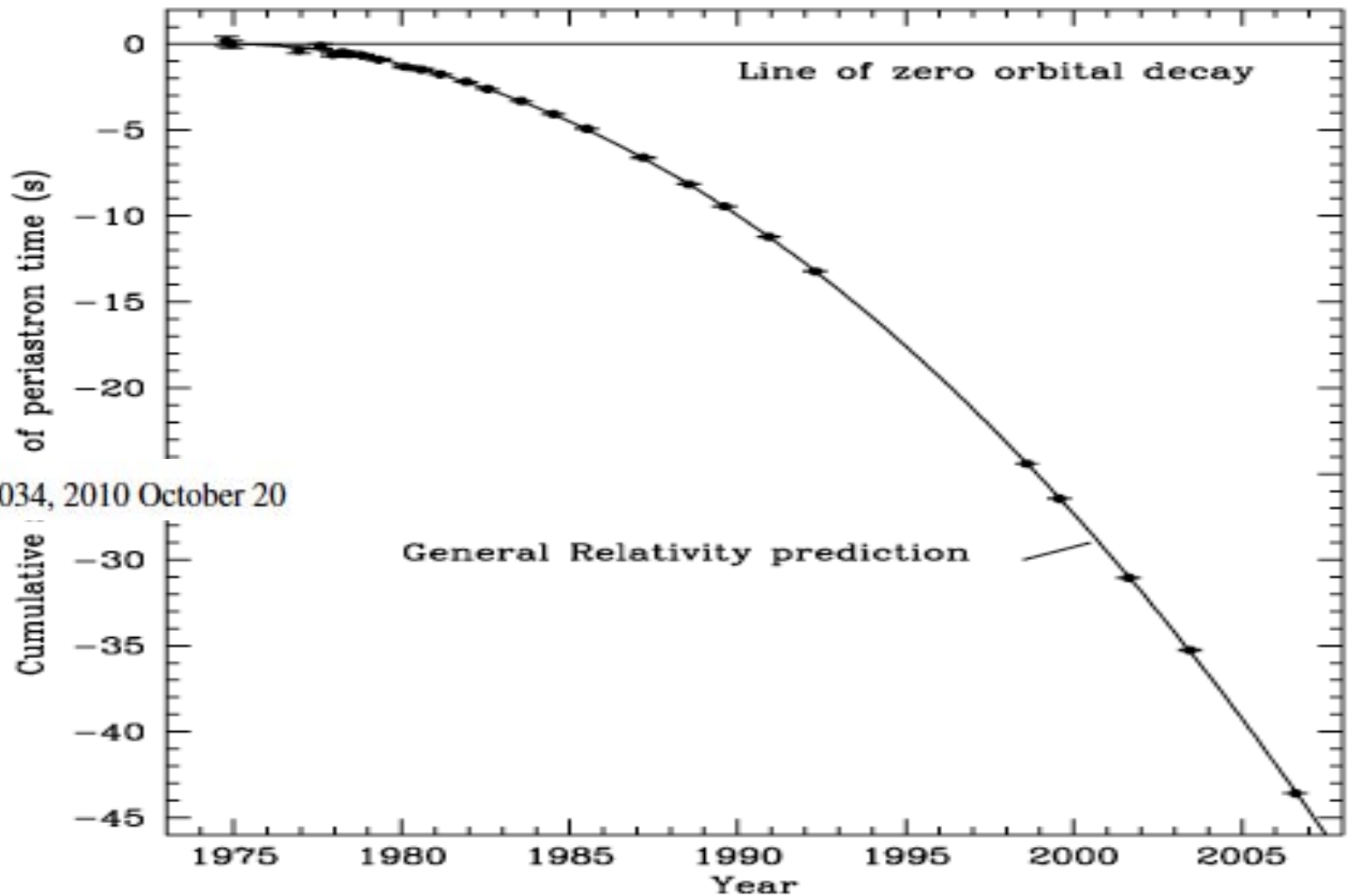




Prova de que elas existem

Ondas Gravitacionais (OGs) realmente existem?

- Após meio século de debate teórico e outro meio século de busca observacional, ainda não havia ocorrido a confirmação de uma detecção direta.
- Uma boa evidência (observação indireta):
PSR 1913+16 (Taylor & Hulse 1974)
(Sistema de duas estrelas de nêutrons com período de 7h45min, em que uma delas é um Pulsar)

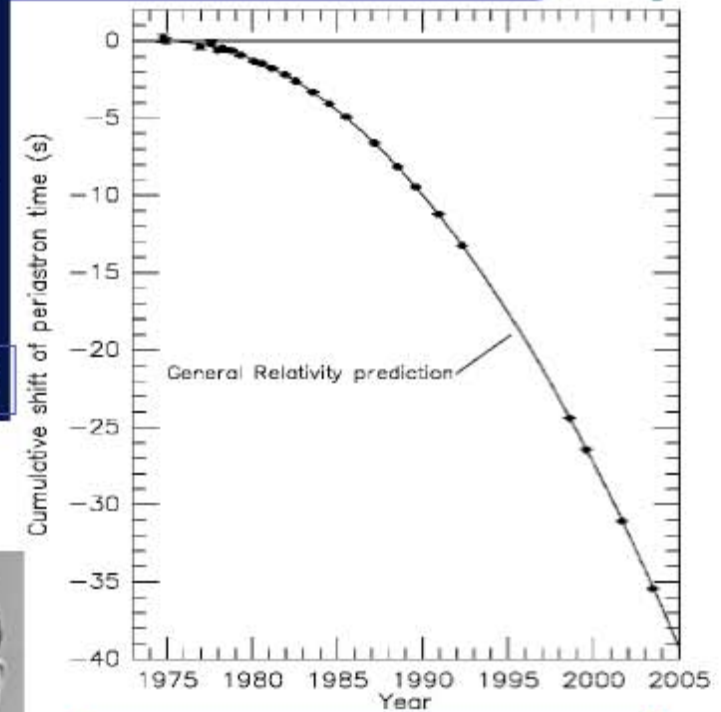
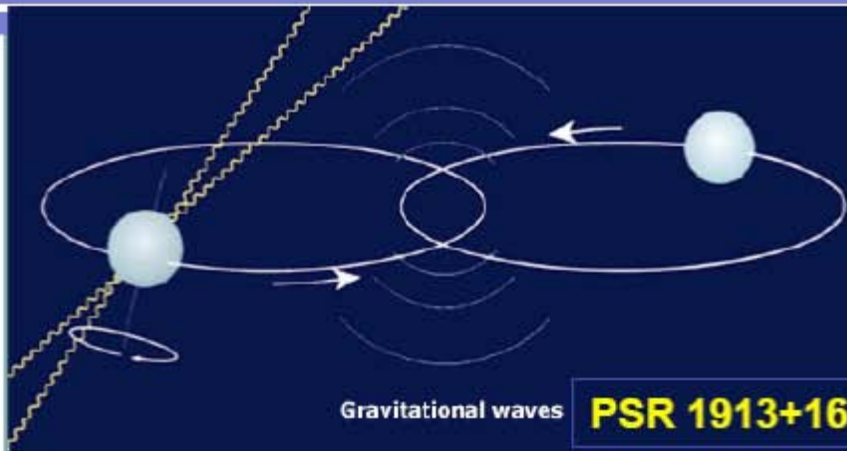


AL JOURNAL, 722:1030–1034, 2010 October 20

Figure 2. Orbital decay caused by the loss of energy by gravitational radiation. The parabola depicts the expected shift of periastron time relative to an unchanging orbit, according to general relativity. Data points represent our measurements, with error bars mostly too small to see.

crédito: Kostas Kokkotas

First verification of GWs



Nobel 1993



Hulse & Taylor

$$\frac{\dot{P}_{b,corrected}}{\dot{P}_{b,GR}} = 1.0013 \pm 0.0021$$

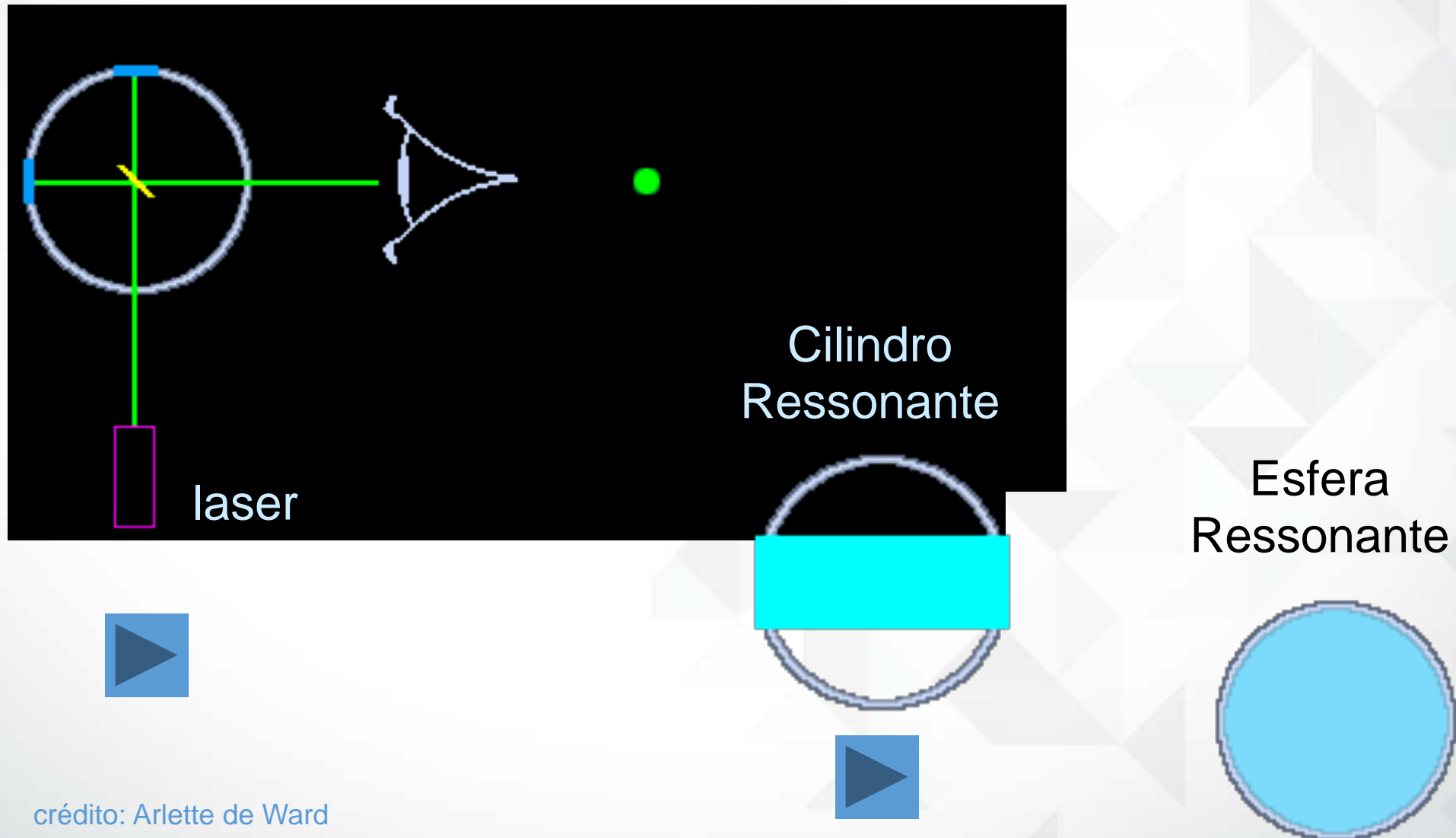


⇒ OGs deveriam existir, pois seriam as responsáveis pela perda de energia desse sistema.



Métodos de detecção e detectores de ONDAS GRAVITACIONAIS

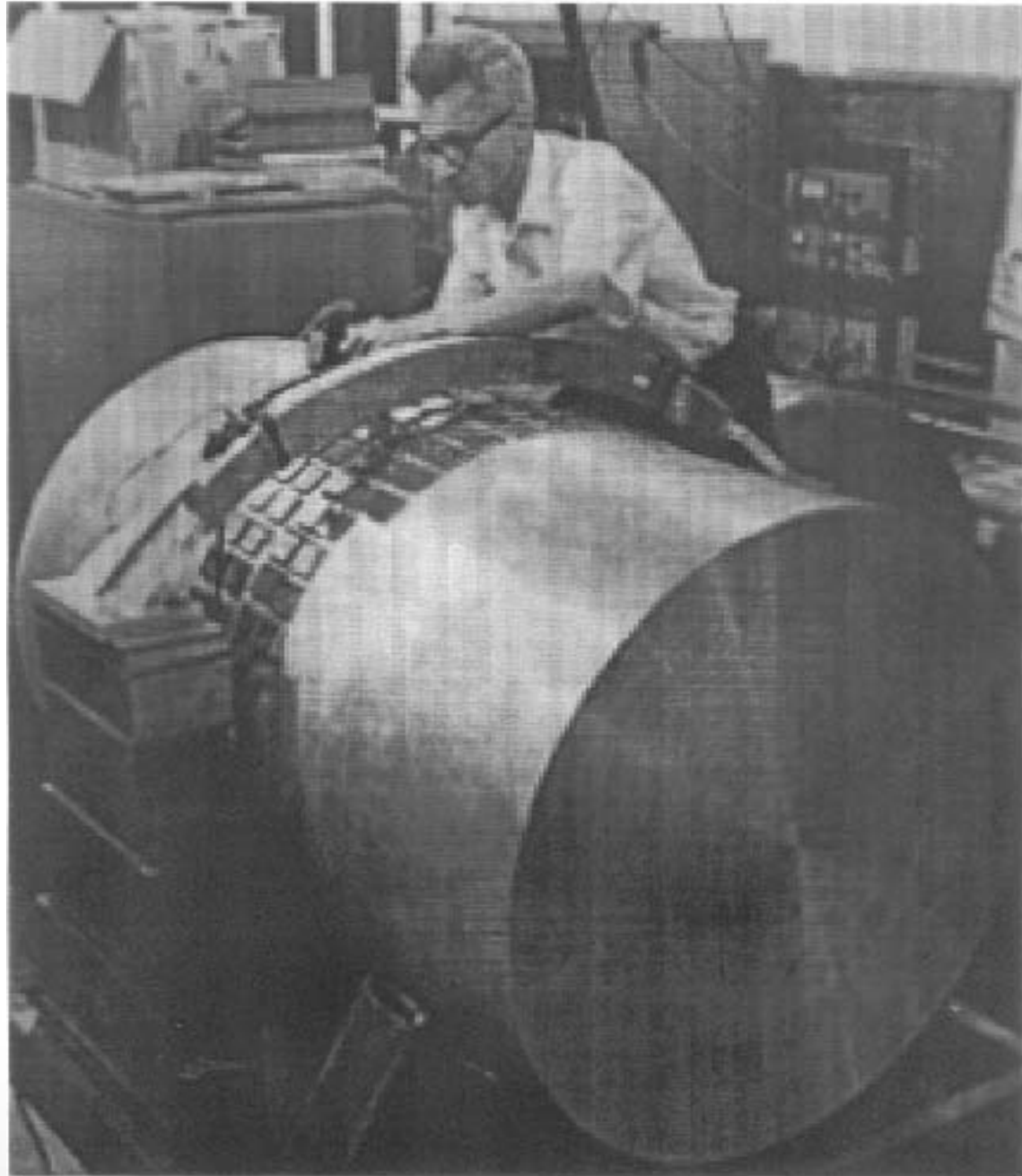
Alguns tipos de detectores de Ondas Gravitacionais



Joseph Weber

1ª geração

Cilíndrico
~ temp.
ambiente
 $h \sim 10^{-15}$

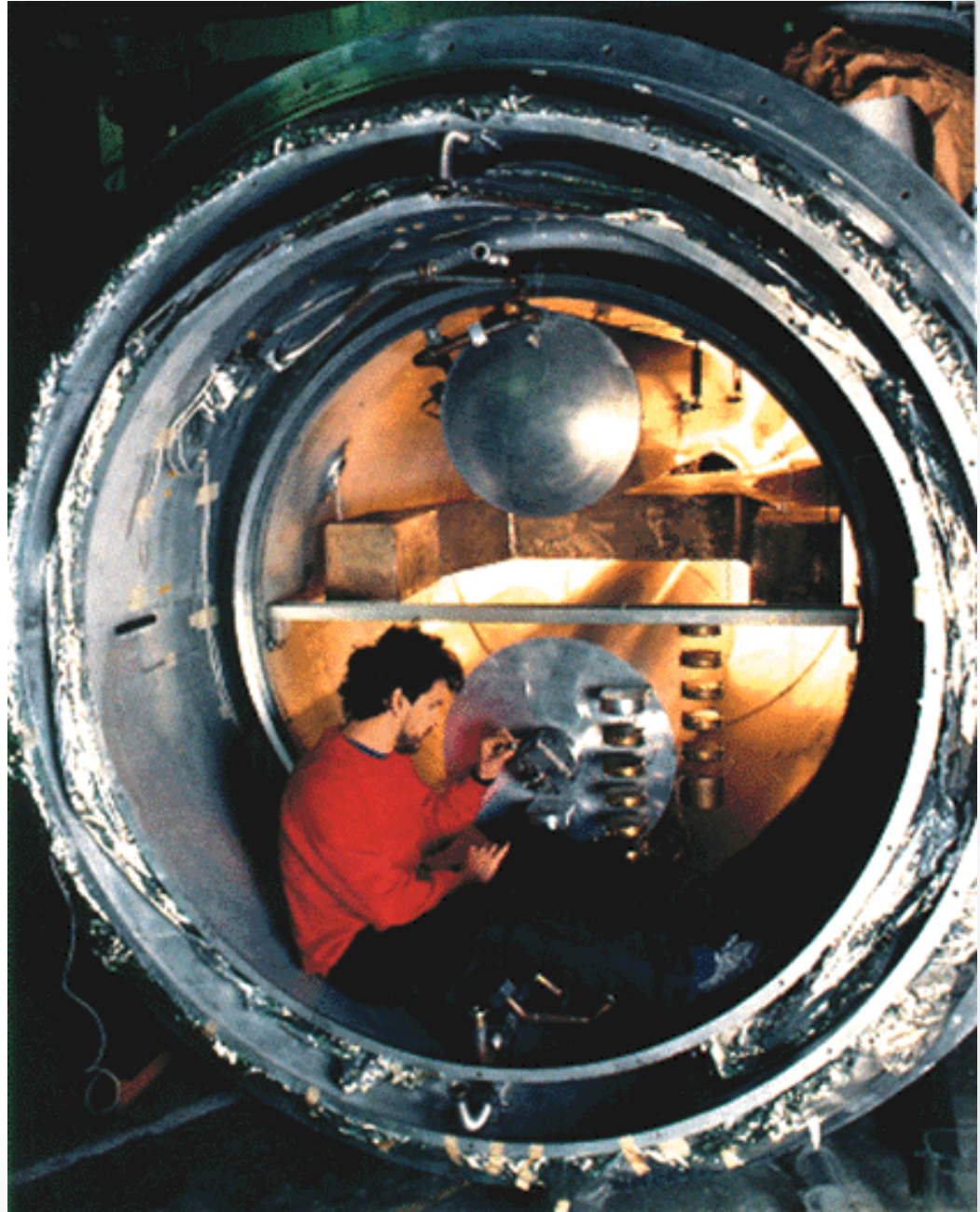


LSU (ALLEGRO)

2ª geração

Cilíndrico
- 269 °C

$h \sim 5 \times 10^{-19}$



Gravitational Wave Detectors

- Interferometric
- Resonant-Mass



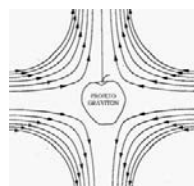
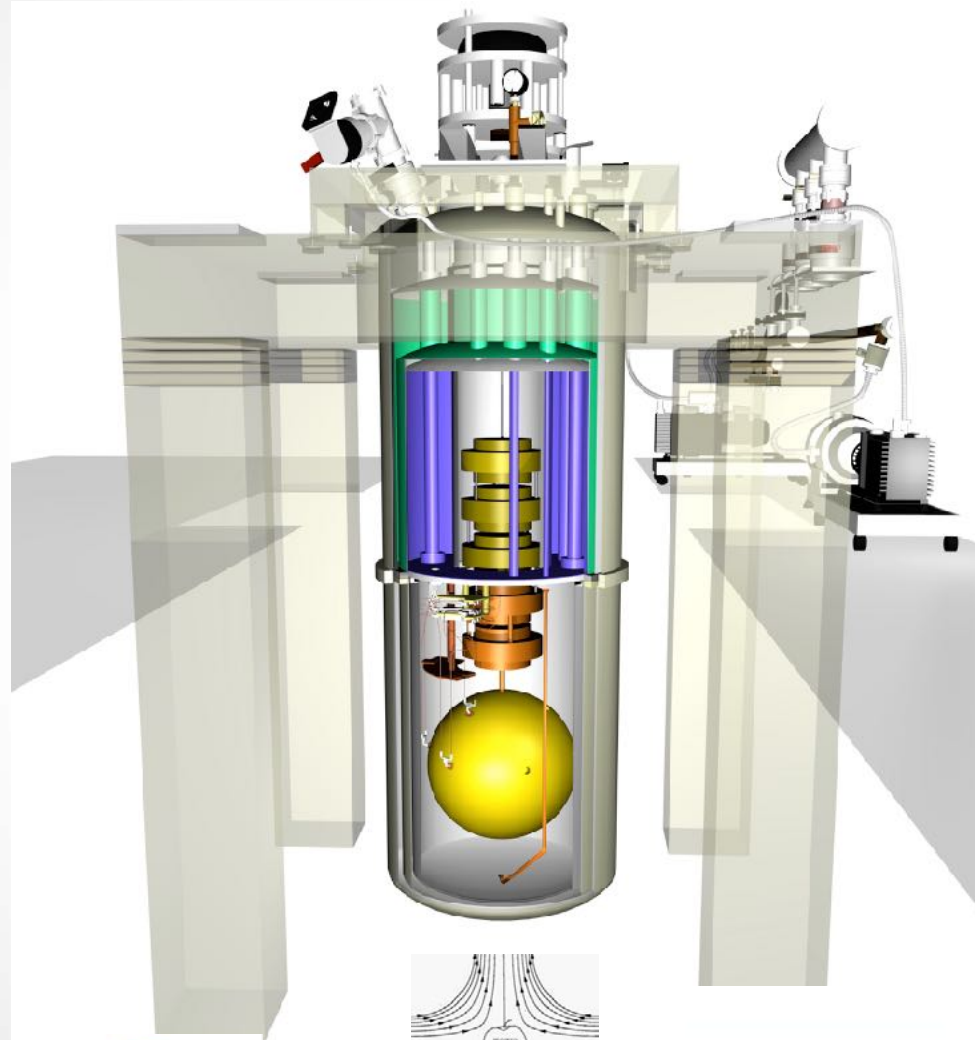
Mario Schenberg,
Brazil
(FAPESP)



MiniGRAIL
Netherlands



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



GRAVITON GROUP



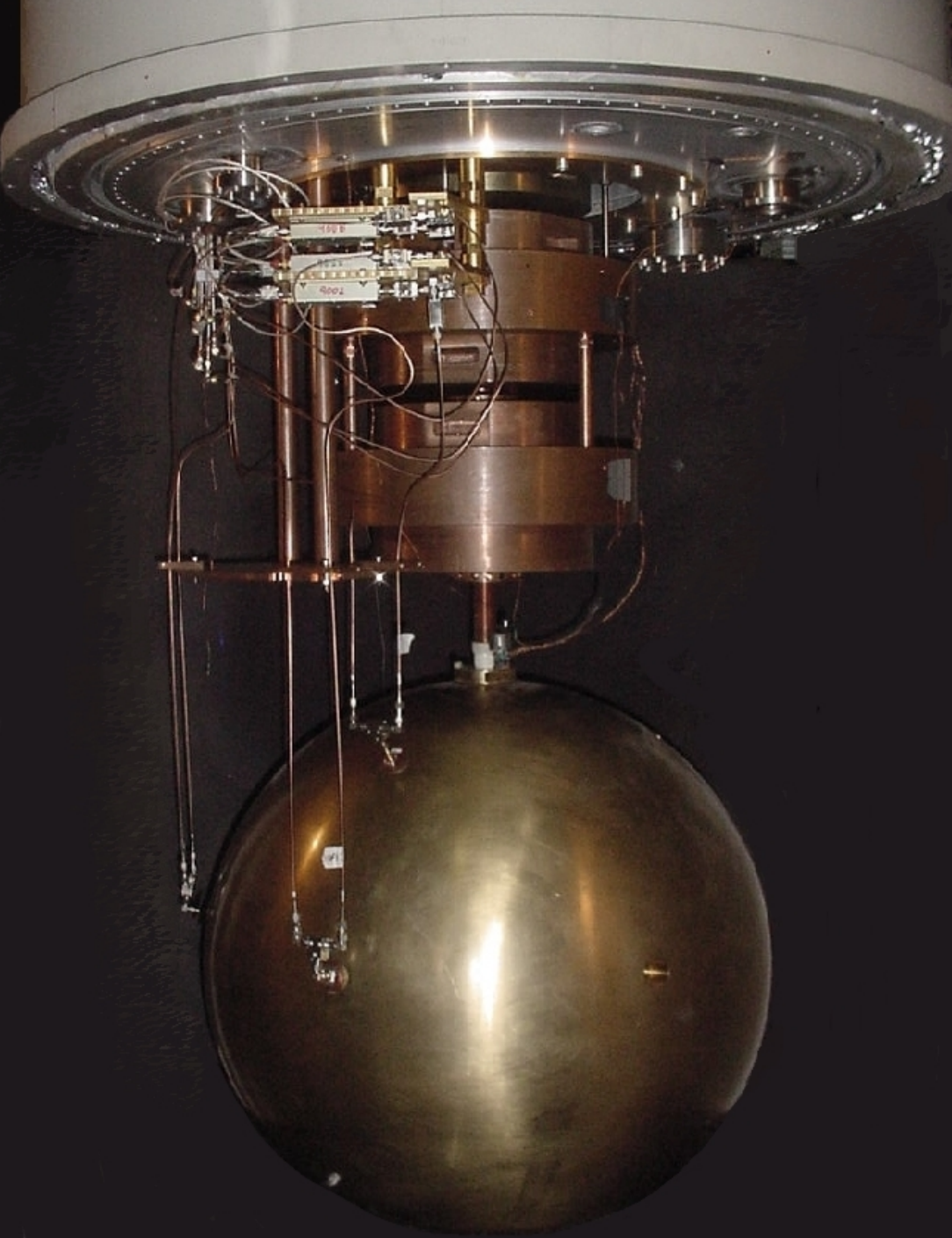
O Detector do Ondas
Gravitationais

Mario SCHENBERG

iniciou operação comissionada
em 8 de Setembro de 2006.

Ele envolve uma colaboração
entre o

**INPE, USP, ITA, IFSP,
UNIFESP, UNESP,
UNICAMP, UESC, IAE,
UFABC, PUC-Rio,
UNIPAMPA, CBPF
Leiden Cryogenics,
UWA, LSU, OCA,
e vem sendo apoiado pela**

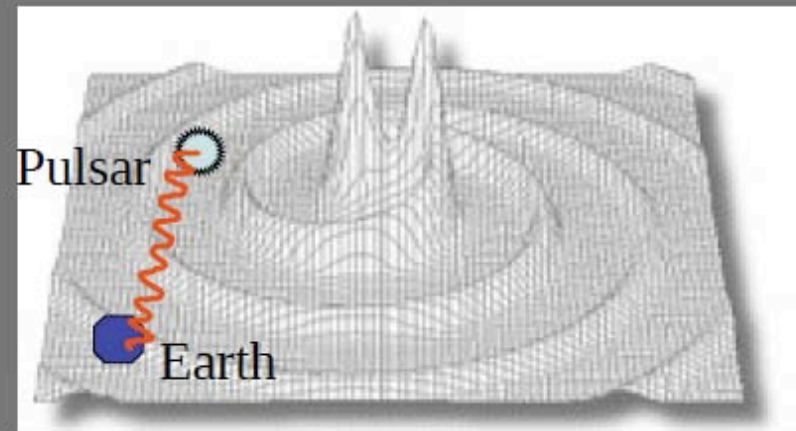
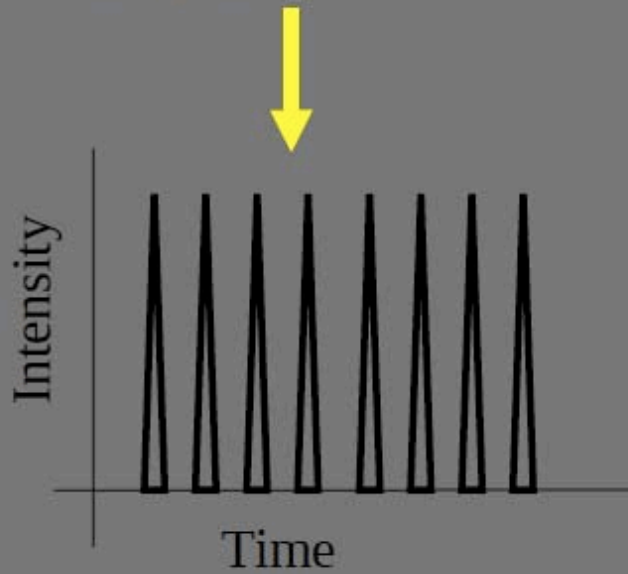
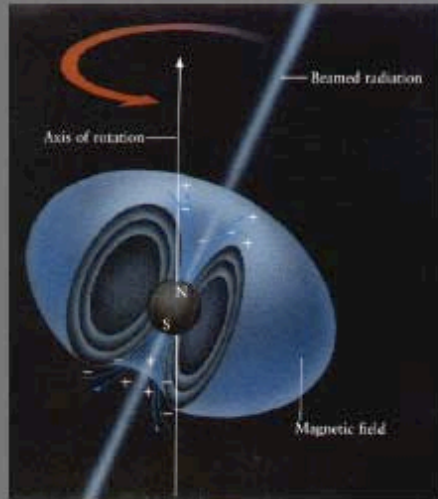


The antenna at its Sao Paulo city site
for the 2015 runs

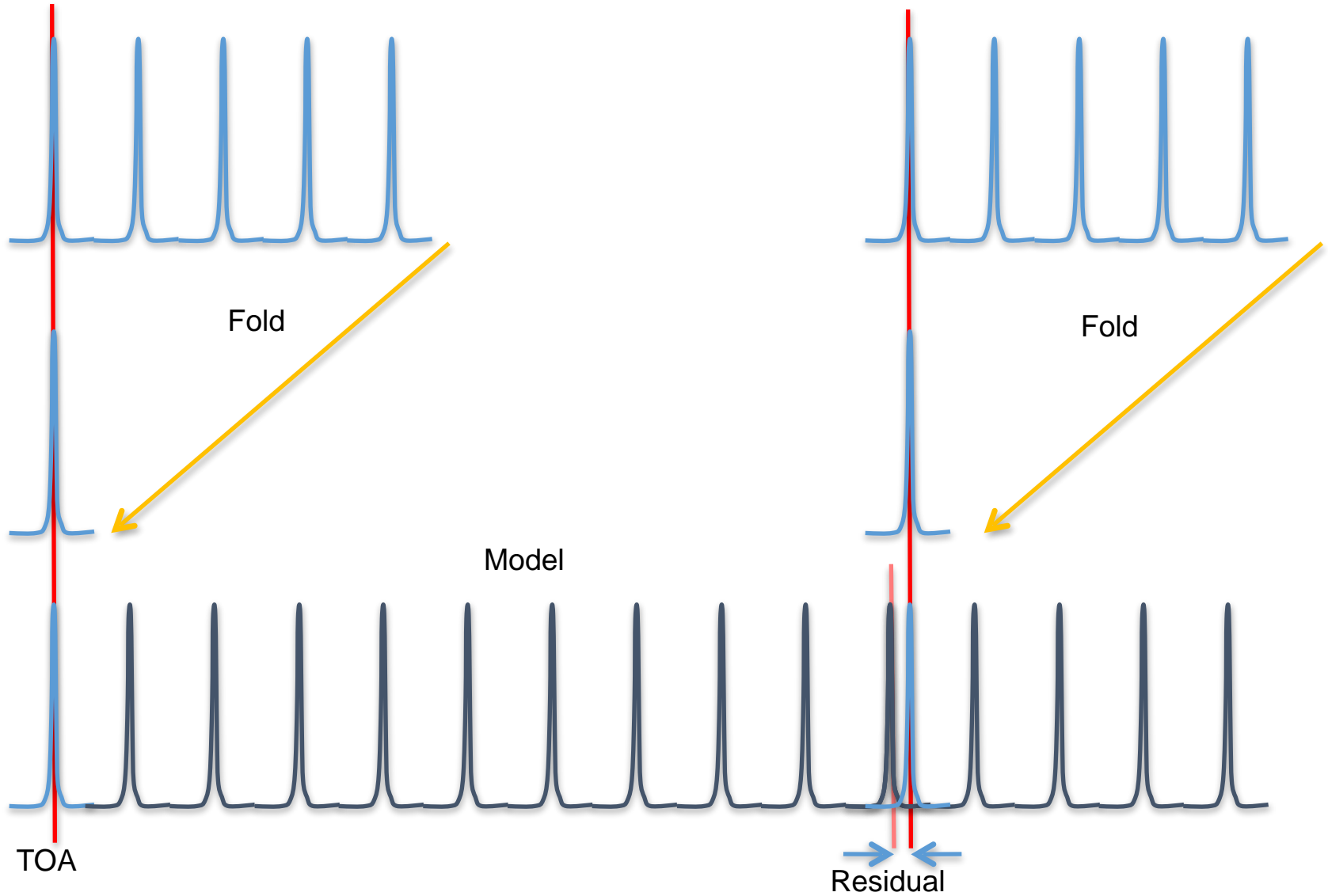
$h \sim 10^{-20} \text{ Hz}^{-1/2}$



Pulsar Timing Arrays

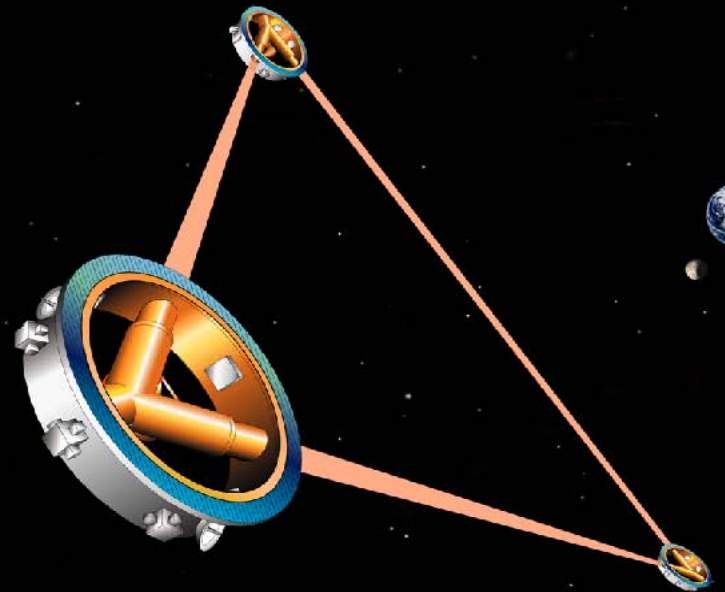


Pulsar timing

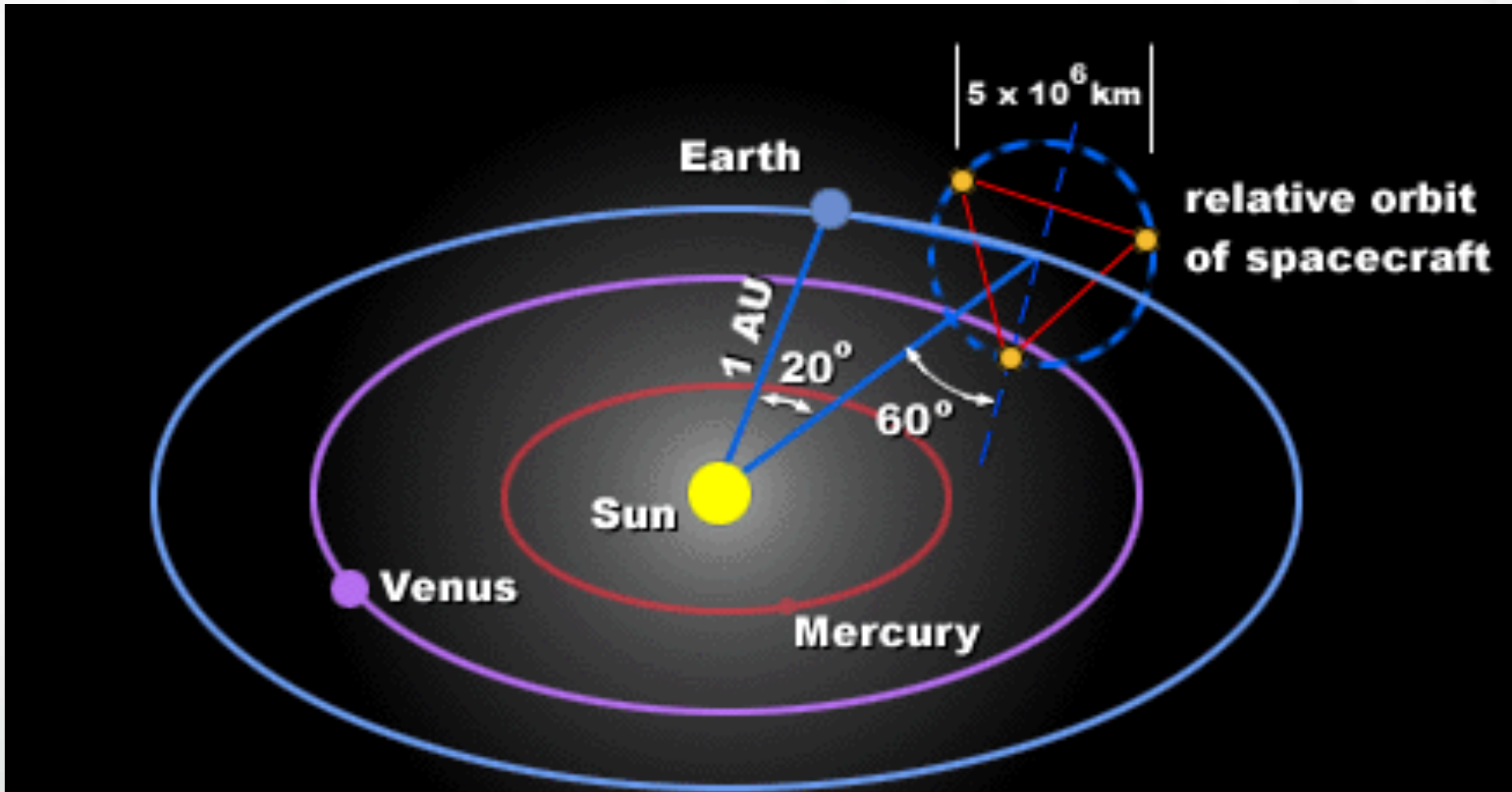


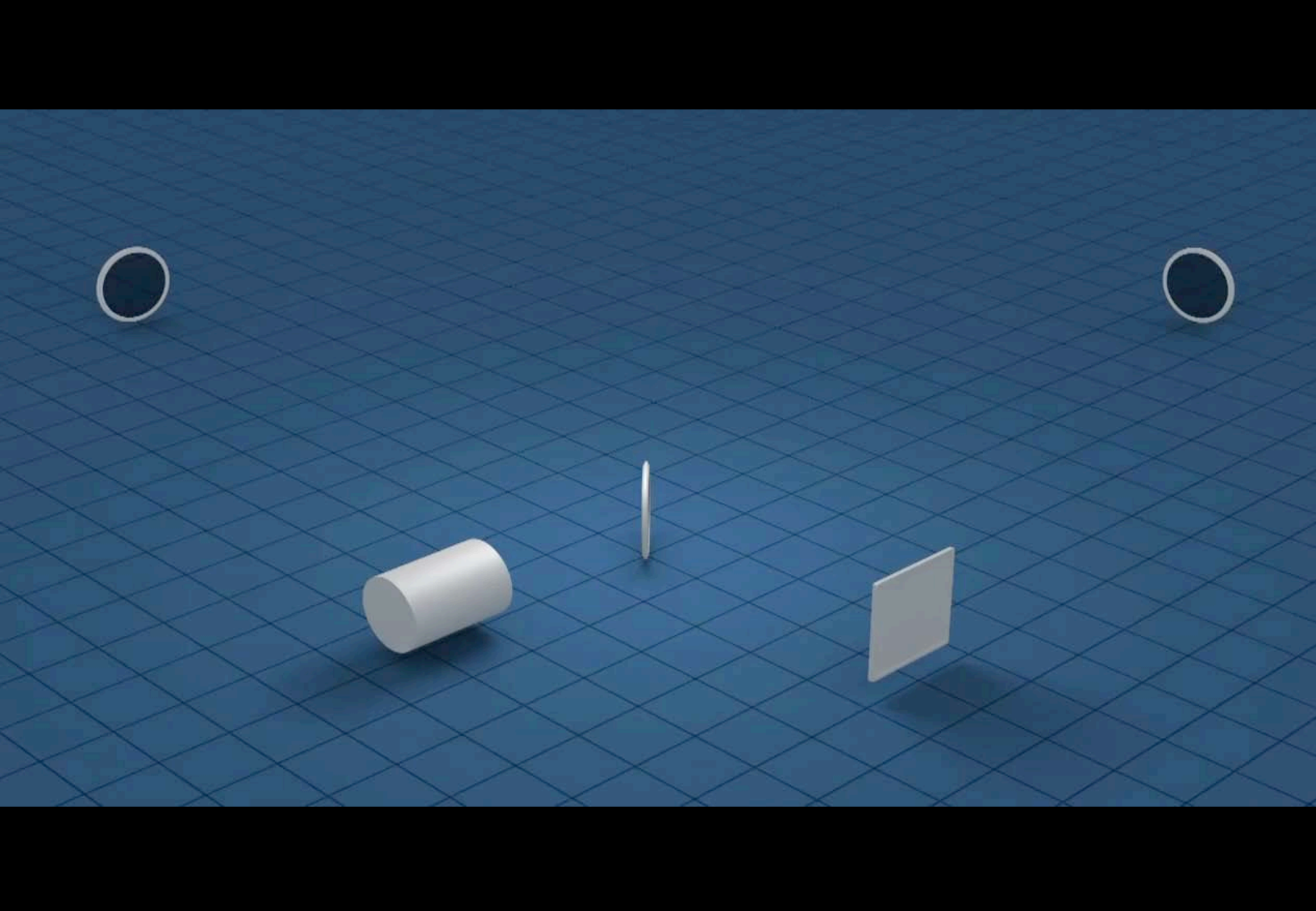
Interferometers in Space:

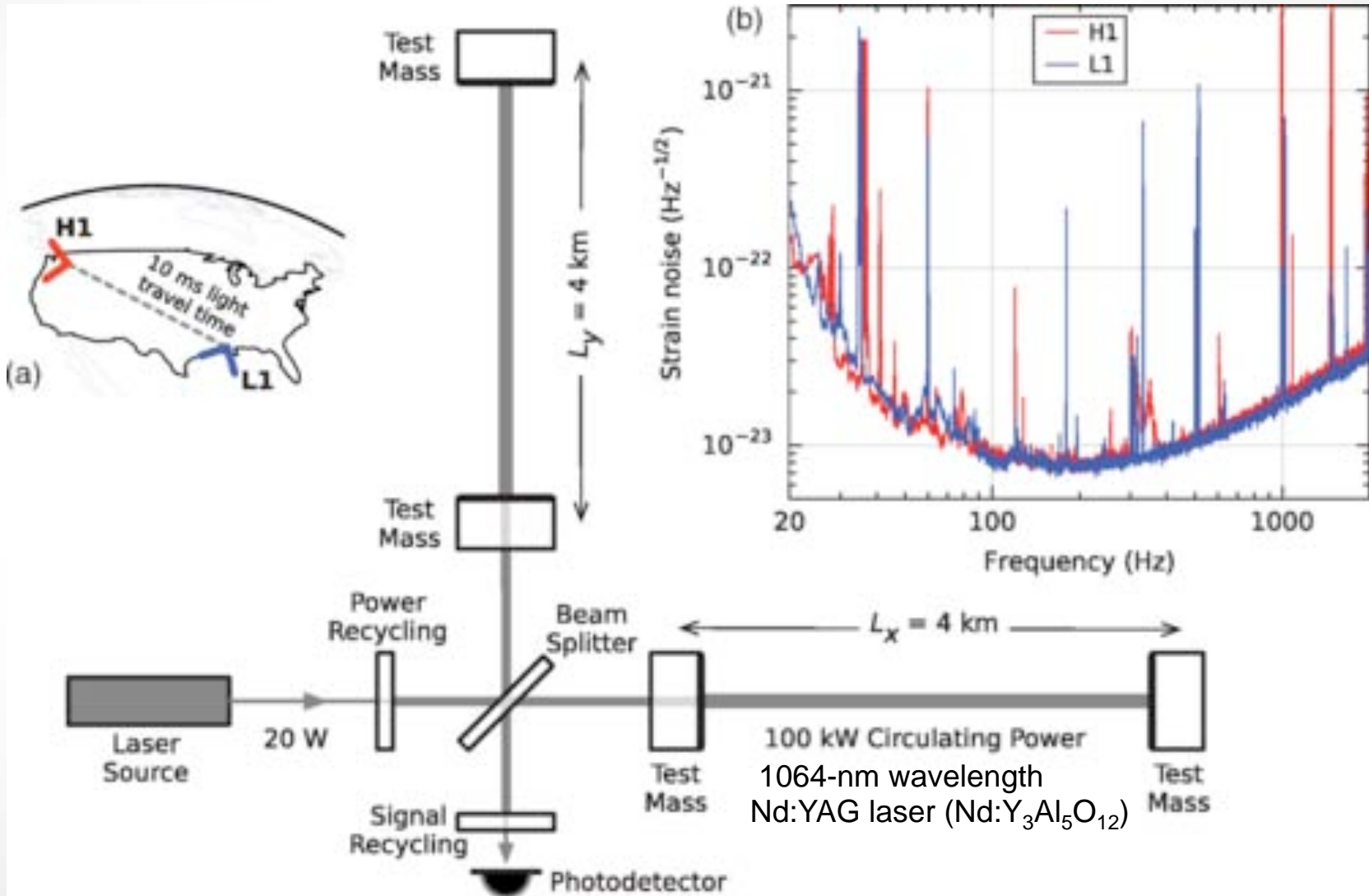
LISA, DECIGO and BBO



LISA: Interferometers in Space



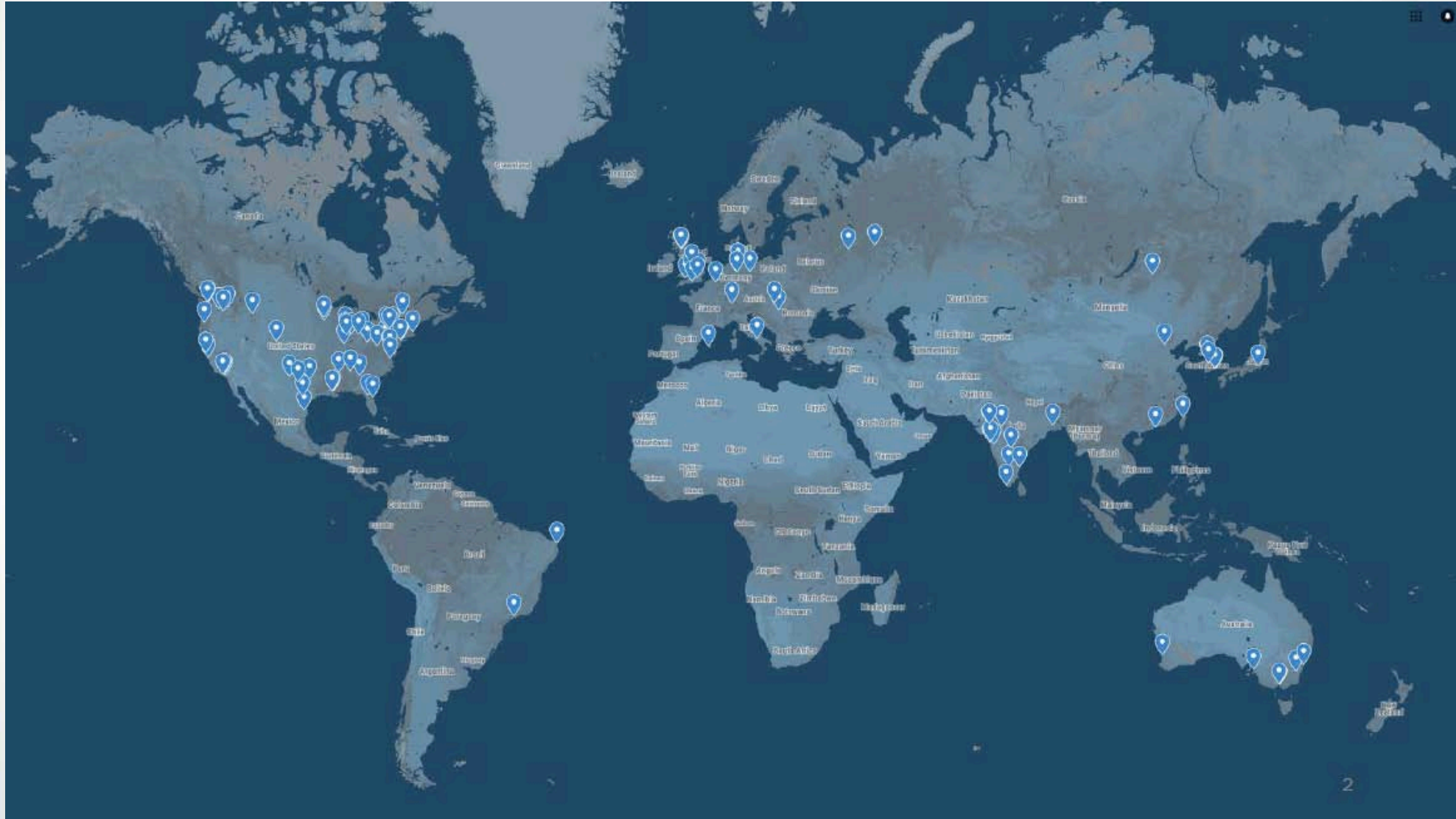




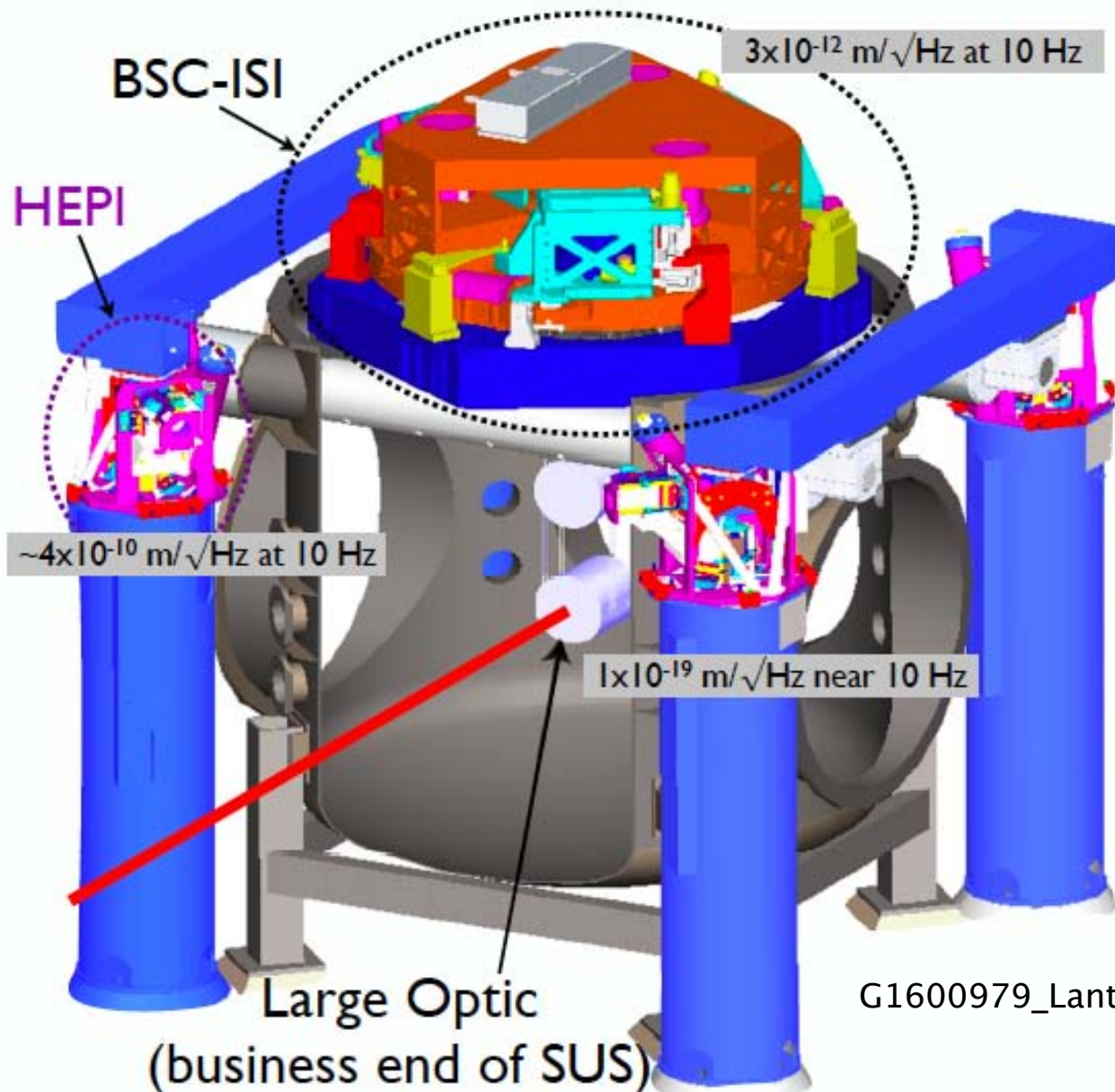
LIGO

LIGO Scientific Collaboration



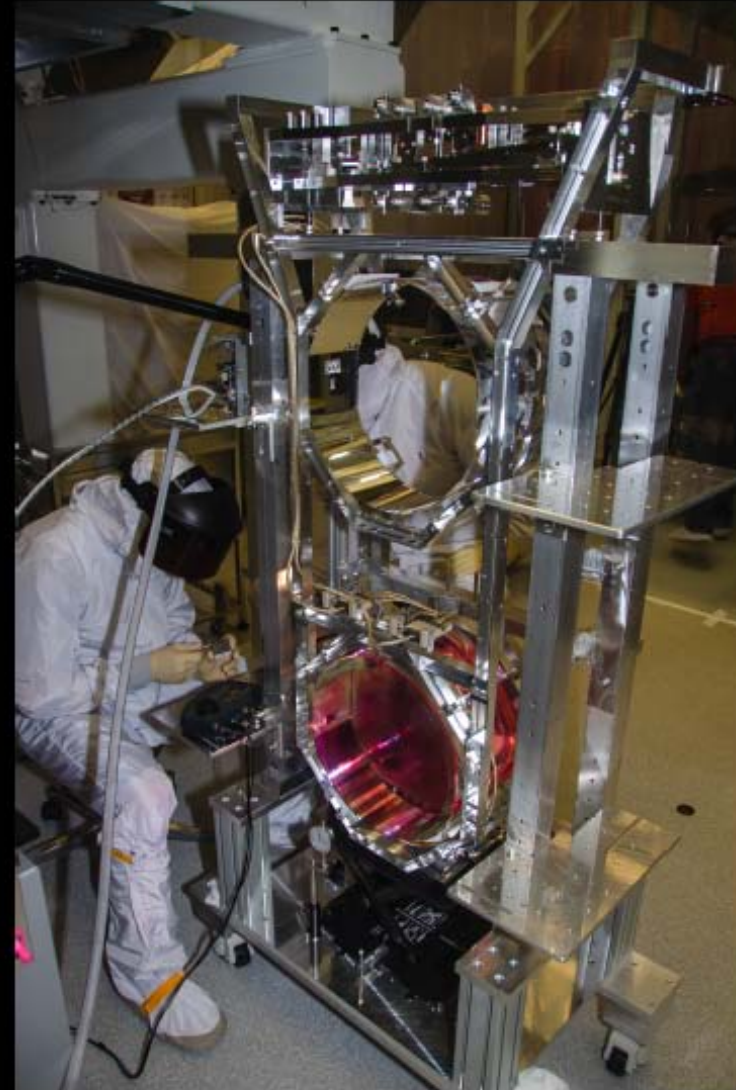


Overall Isolation of Test Masses



G1600979_Lantz_SLACv3

Quadruple Pendulum test mass suspension



LIGO

LIGO Beam Tube



- LIGO beam tube under construction in January 1998
- 16 m spiral welded sections
- girth welded in portable clean room in the field

1.2 m diameter - 3mm stainless
50 km of weld

NO LEAKS !!

 **LIGO**

LIGO Vacuum Equipment





Fontes astrofísicas de ONDAS GRAVITACIONAIS

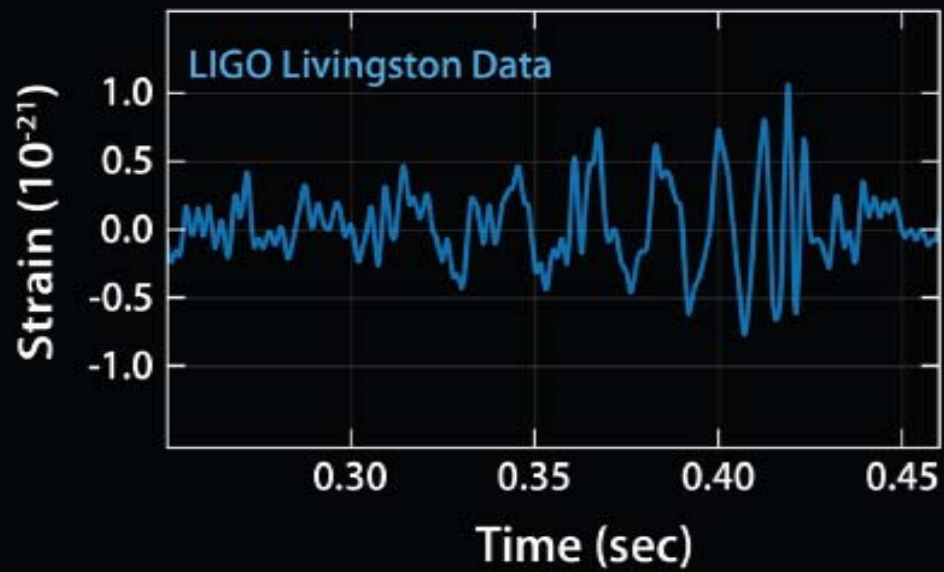
Existem várias fontes astrofísicas de ondas gravitacionais:

- **sistemas binários compactos**, tais como pares de buracos negros (estelares ou supermassivos), pares de estrelas de nêutrons ou pares envolvendo um buraco negro e uma estrela de nêutrons, tanto na sua fase orbital, como na coalescência e *ring-down*;
- **sistemas binários de outras estrelas** (anãs-brancas e/ou estrelas comuns);
- **supernovas**;
- **buracos negros em oscilação**, por causa de algo que caiu neles;
- **estrelas de nêutrons em oscilação**, por causa de algo que caiu nelas;
- **estrelas de nêutrons em rotação** não axialmente simétrica (presença de uma “montanha”, por exemplo);
- **o Big Bang e o período inflacionário**;
- **objetos astrofísicos exóticos**, cuja existência ainda não foi confirmada, tais como: cordas cósmicas, buracos negros primordiais, bolhas cósmicas, estrelas de bósons e estrelas estranhas;
- **fundo cosmológico** produzido por um conjunto muito grande de fontes astrofísicas (sistemas binários e supernovas, principalmente).

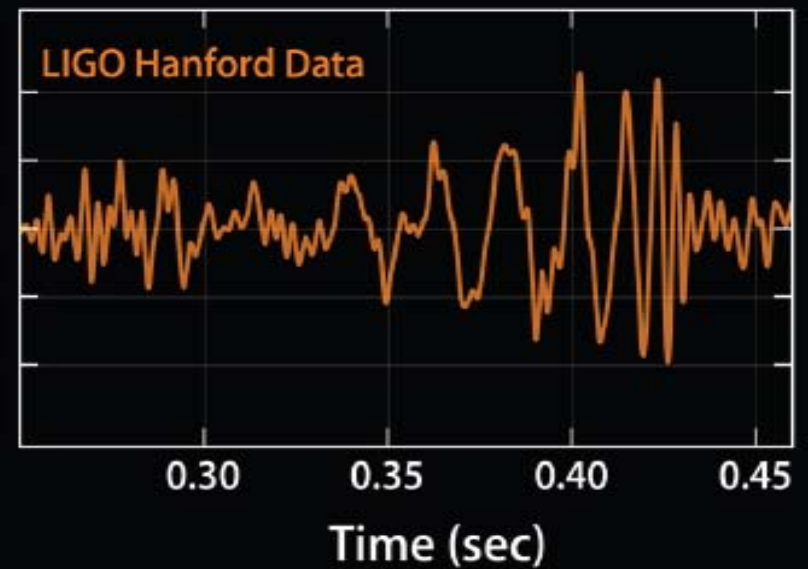
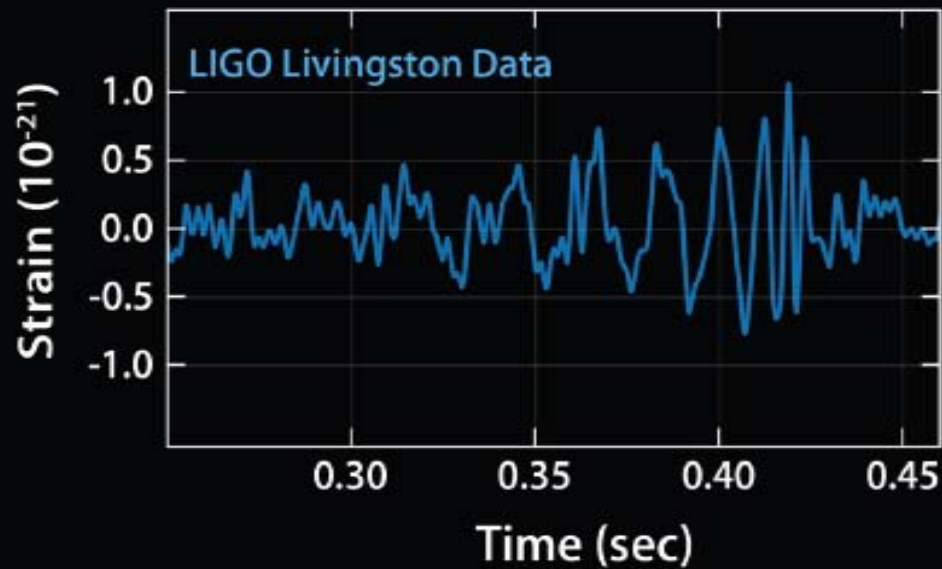
De todas estas fontes, as primeiras a serem detectadas foram sistemas binários de buracos negros estelares, como vamos ver na próxima seção.

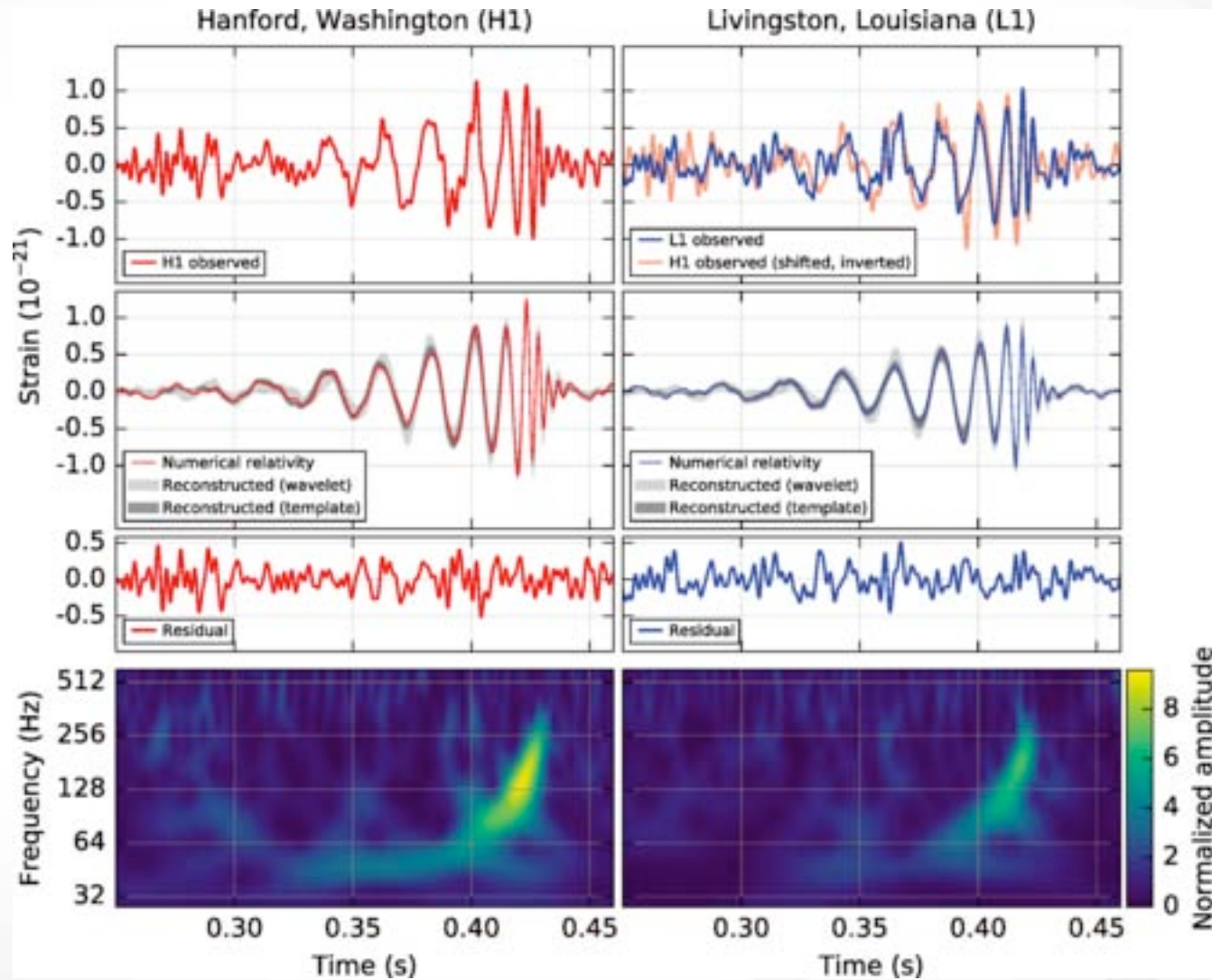


A Astrofísica de ONDAS GRAVITACIONAIS foi inaugurada!

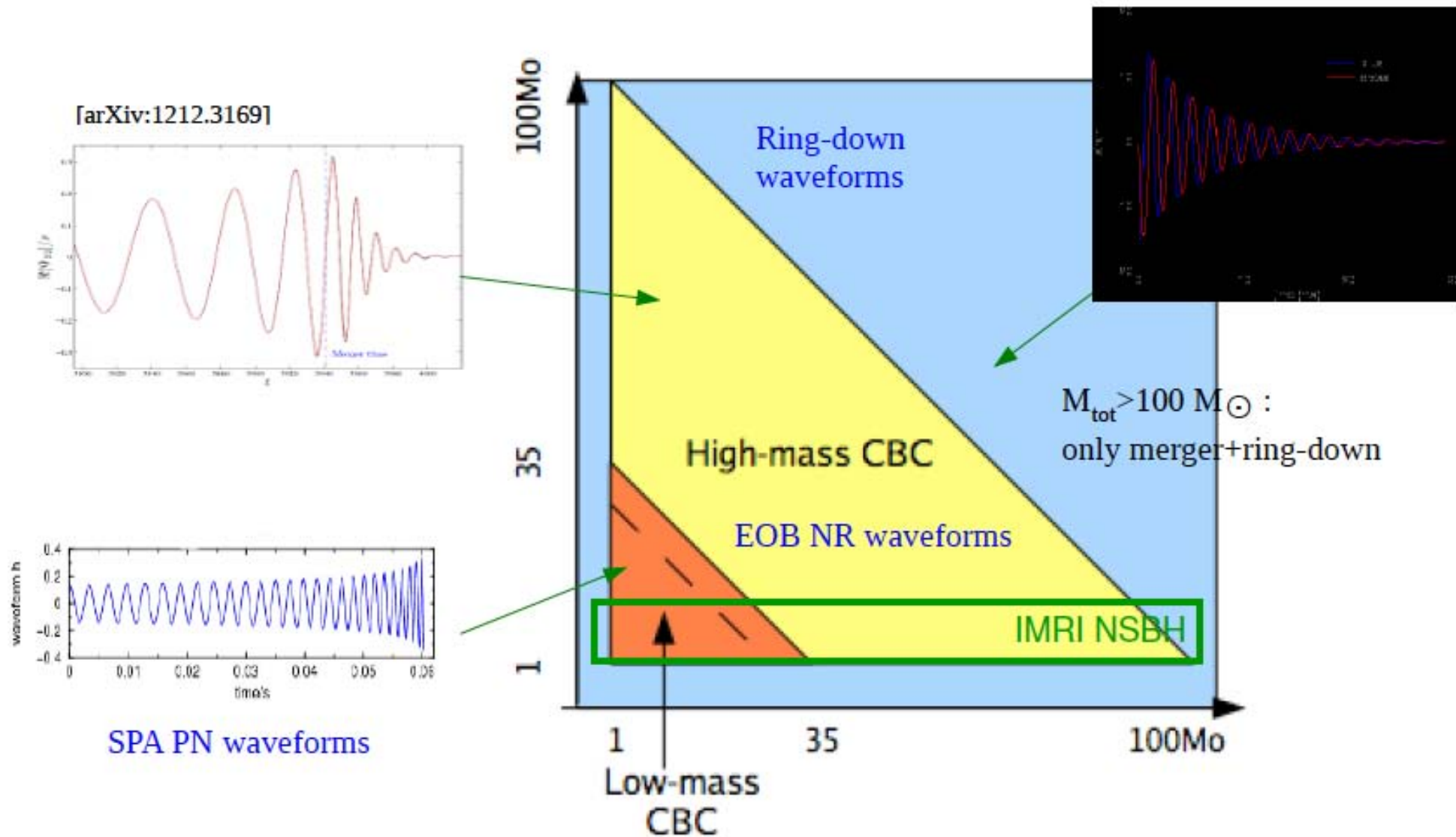


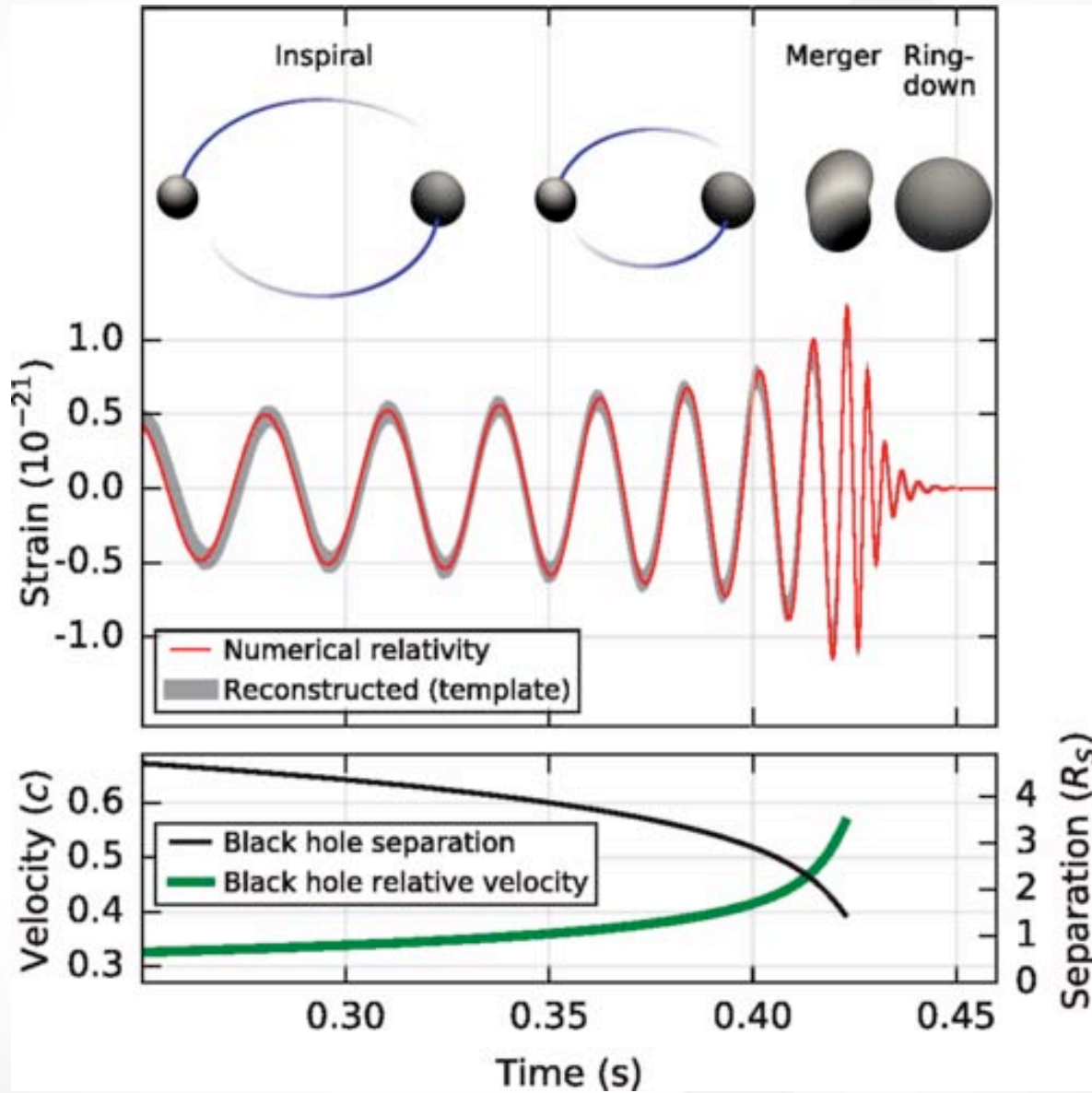
e 7 milissegundos depois ...





Template banks for detection











Barry C. Barish (Caltech)



Kip S. Thorne (Caltech)



Rainer Weiss (MIT)

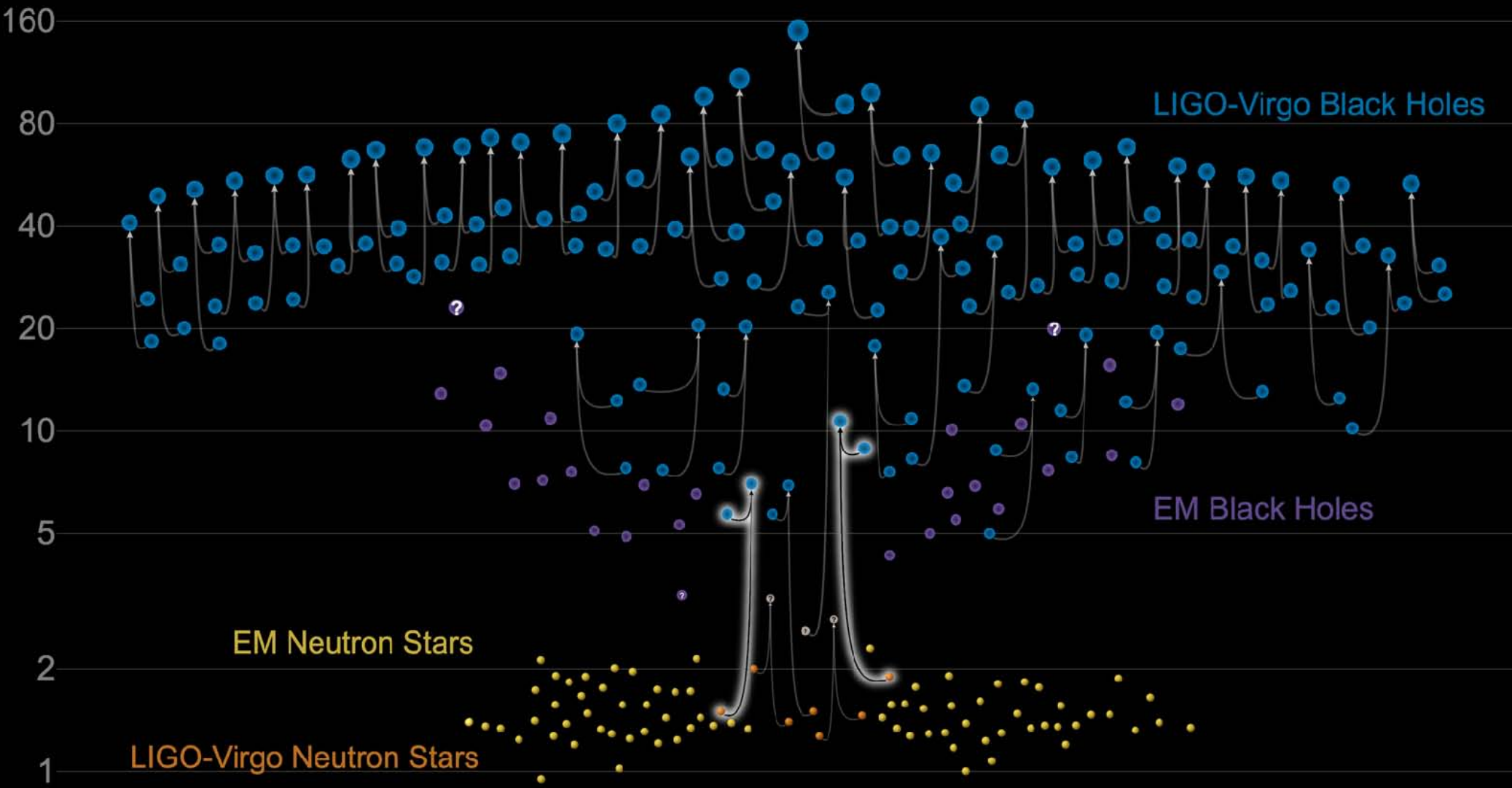


2017 Nobel Prize in Physics

O que aprendemos com as primeiras
ONDAS GRAVITACIONAIS observadas?

Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses



GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>

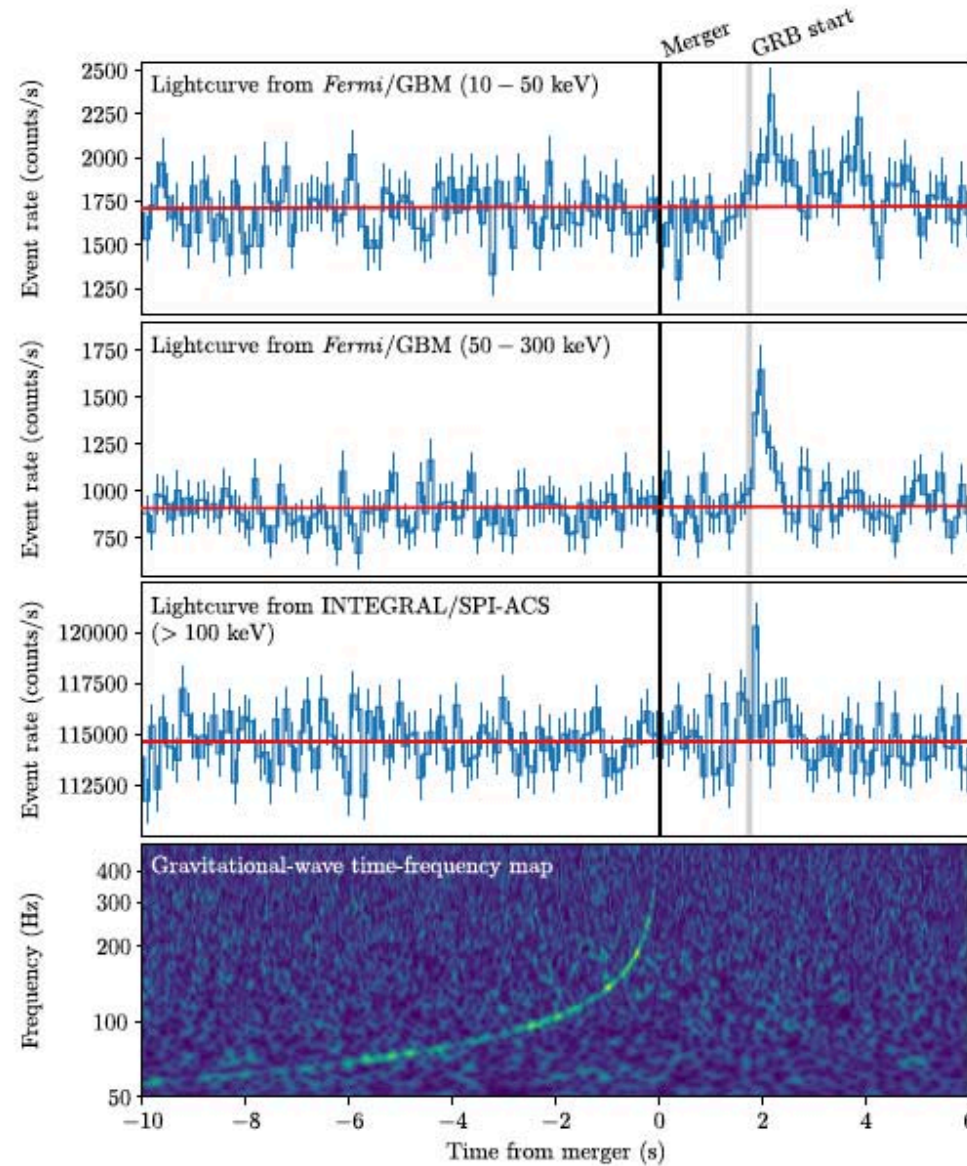


Figure 2. Joint, multi-messenger detection of GW170817 and GRB 170817A. Top: the summed GBM lightcurve for sodium iodide (NaI) detectors 1, 2, and 5 for GRB 170817A between 10 and 50 keV, matching the 100 ms time bins of the SPI-ACS data. The background estimate from Goldstein et al. (2016) is overlaid in red. Second: the same as the top panel but in the 50–300 keV energy range. Third: the SPI-ACS lightcurve with the energy range starting approximately at 100 keV and with a high energy limit of at least 80 MeV. Bottom: the time-frequency map of GW170817 was obtained by coherently combining LIGO-Hanford and LIGO-Livingston data. All times here are referenced to the GW170817 trigger time T_0^{GW} .

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20

Abbott et al.

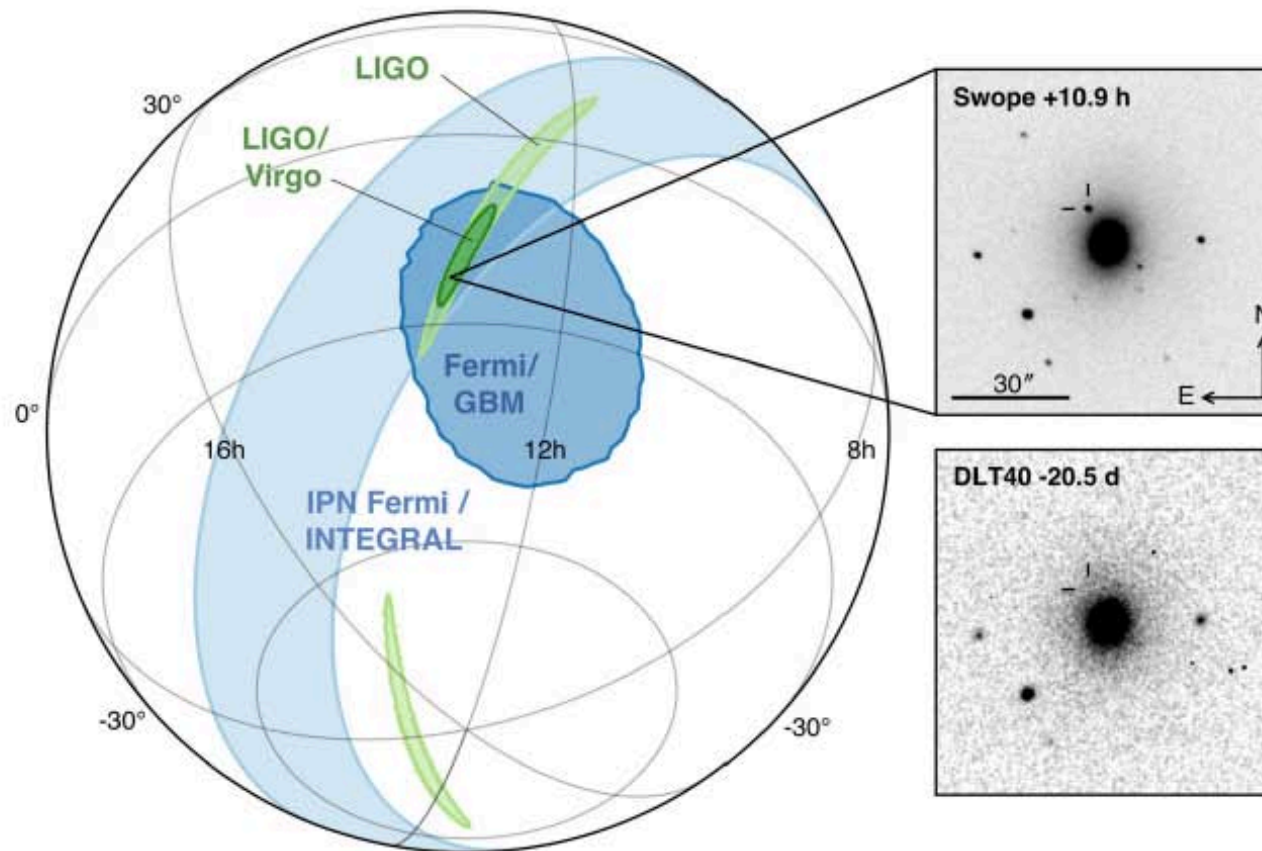
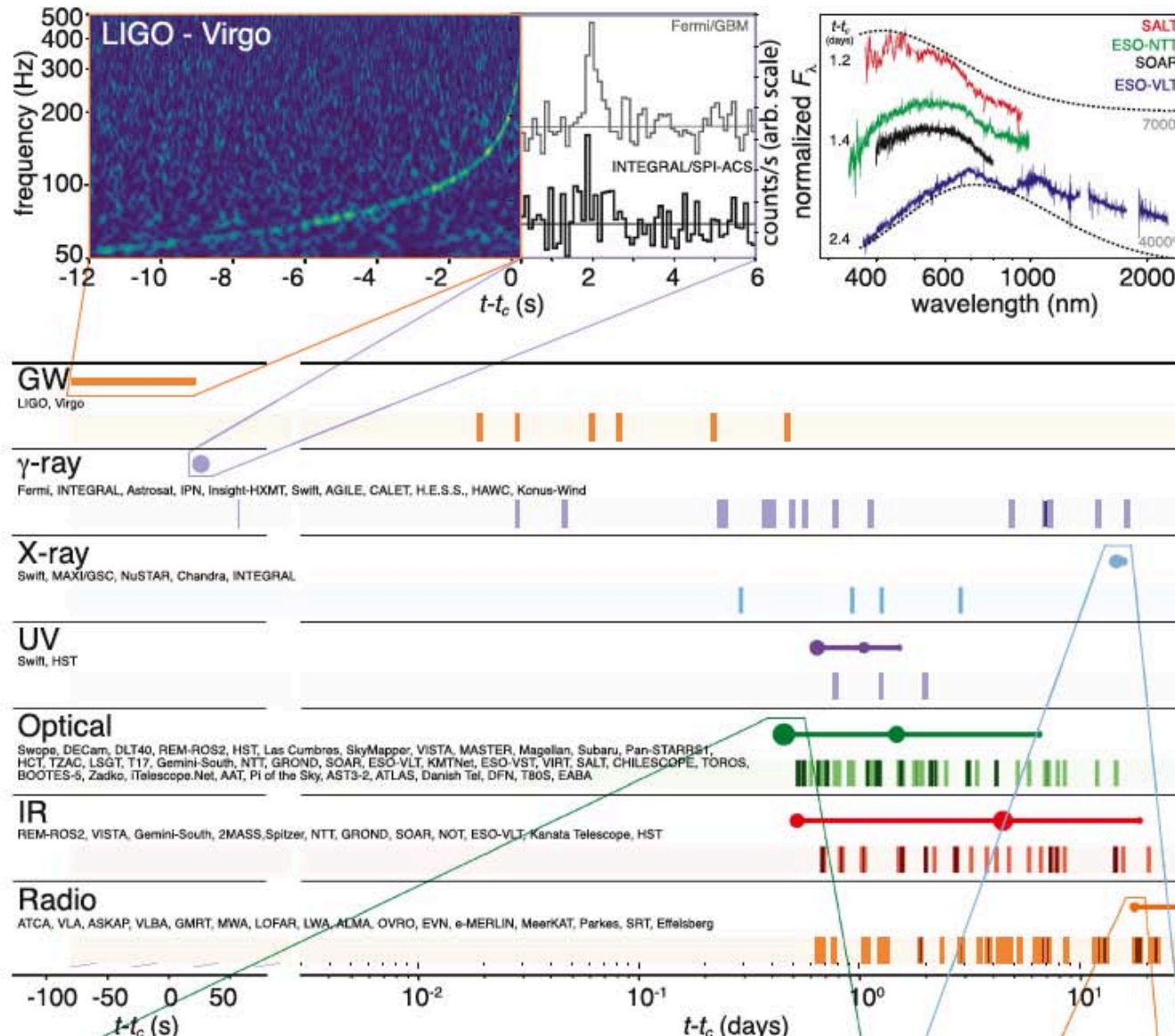


Figure 1. Localization of the gravitational-wave, gamma-ray, and optical signals. The left panel shows an orthographic projection of the 90% credible regions from LIGO (190 deg^2 ; light green), the initial LIGO-Virgo localization (31 deg^2 ; dark green), IPN triangulation from the time delay between *Fermi* and *INTEGRAL* (light blue), and *Fermi*-GBM (dark blue). The inset shows the location of the apparent host galaxy NGC 4993 in the Swope optical discovery image at 10.9 hr after the merger (top right) and the DLT40 pre-discovery image from 20.5 days prior to merger (bottom right). The reticle marks the position of the transient in both images.



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20

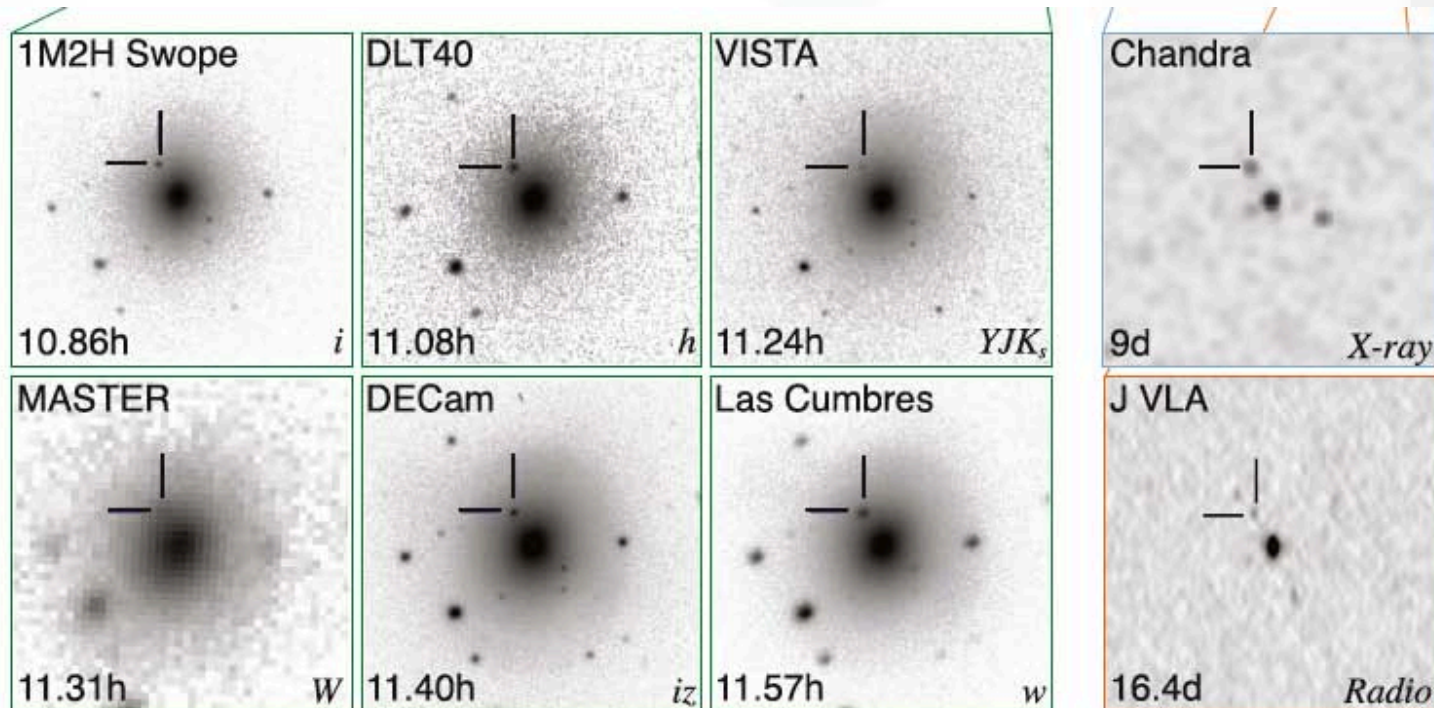
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9>


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent the times when information was reported in a GCN Circular. The names of the relevant instruments, facilities, or observing teams are collected at the beginning of the row. Second, representative observations (see Table 1) in each band are shown as solid circles with their areas approximately scaled by brightness; the solid lines indicate when the source was detectable by at least one telescope. Magnification insets give a picture of the first detections in the gravitational-wave, gamma-ray, optical, X-ray, and radio bands. They are respectively illustrated by the combined spectrogram of the signals received by LIGO-Hanford and LIGO-Livingston (see Section 2.1), the *Fermi*-GBM and *INTEGRAL*/SPI-ACS lightcurves matched in time resolution and phase (see Section 2.2), $1'.5 \times 1'.5$ postage stamps extracted from the initial six observations of SSS17a/AT 2017gfo and four early spectra taken with the SALT (at $t_c + 1.2$ days; Buckley et al. 2017; McCully et al. 2017b), ESO-NTT (at $t_c + 1.4$ days; Smartt et al. 2017), the SOAR 4 m telescope (at $t_c + 1.4$ days; Nicholl et al. 2017d), and ESO-VLT-XShooter (at $t_c + 2.4$ days; Smartt et al. 2017) as described in Section 2.3, and the first X-ray and radio detections of the same source by *Chandra* (see Section 3.3) and JVLA (see Section 3.4). In order to show representative spectral energy distributions, each spectrum is normalized to its maximum and shifted arbitrarily along the linear y-axis (no absolute scale). The high background in the SALT spectrum below 4500 \AA prevents the identification of spectral features in this band (for details McCully et al. 2017b).

Com o T80 South

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L29 (5pp), 2017 October 20

Díaz et al.

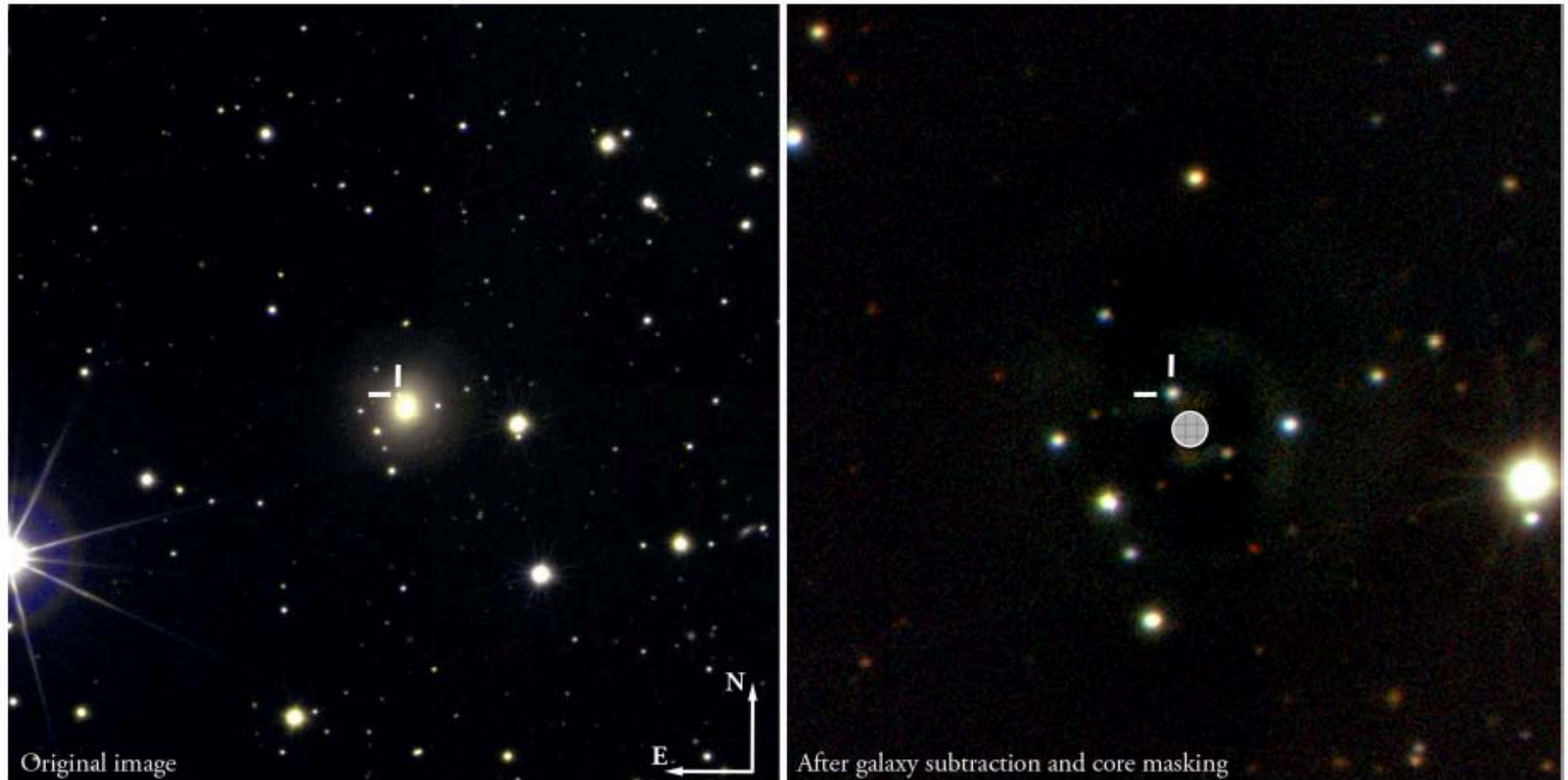


Figure 1. Left: pseudo-color image of a small subsection ($9'5$ on a side) of the FoV of T80S, centered on the transient. Intensity scaling is logarithmic in order to better display the light distribution of the host galaxy. Right: $3\times$ zoom into the residual image after host galaxy subtraction and core masking (hatched circle; see Section 2.2 for details).

ASTROFÍSICA MULTIMENSAGEIRA: Busca simultânea com instrumentos da janela eletromagnética



optical

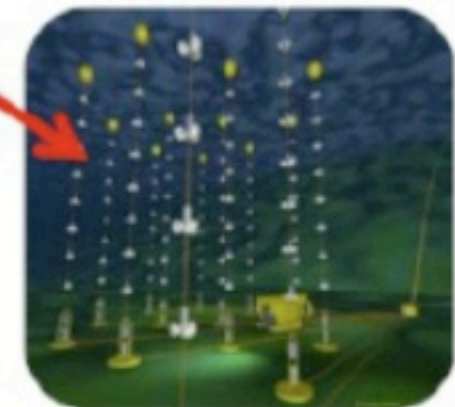
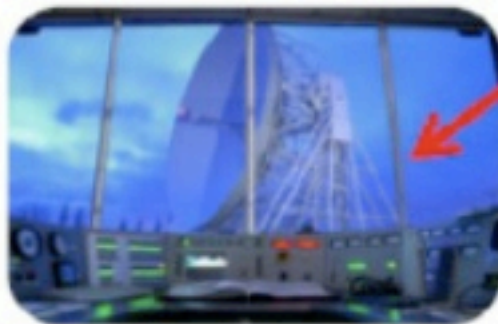
Menos de dois anos após a estréia da astronomia de ondas gravitacionais, GW170817 marca o início de uma nova era de descoberta.



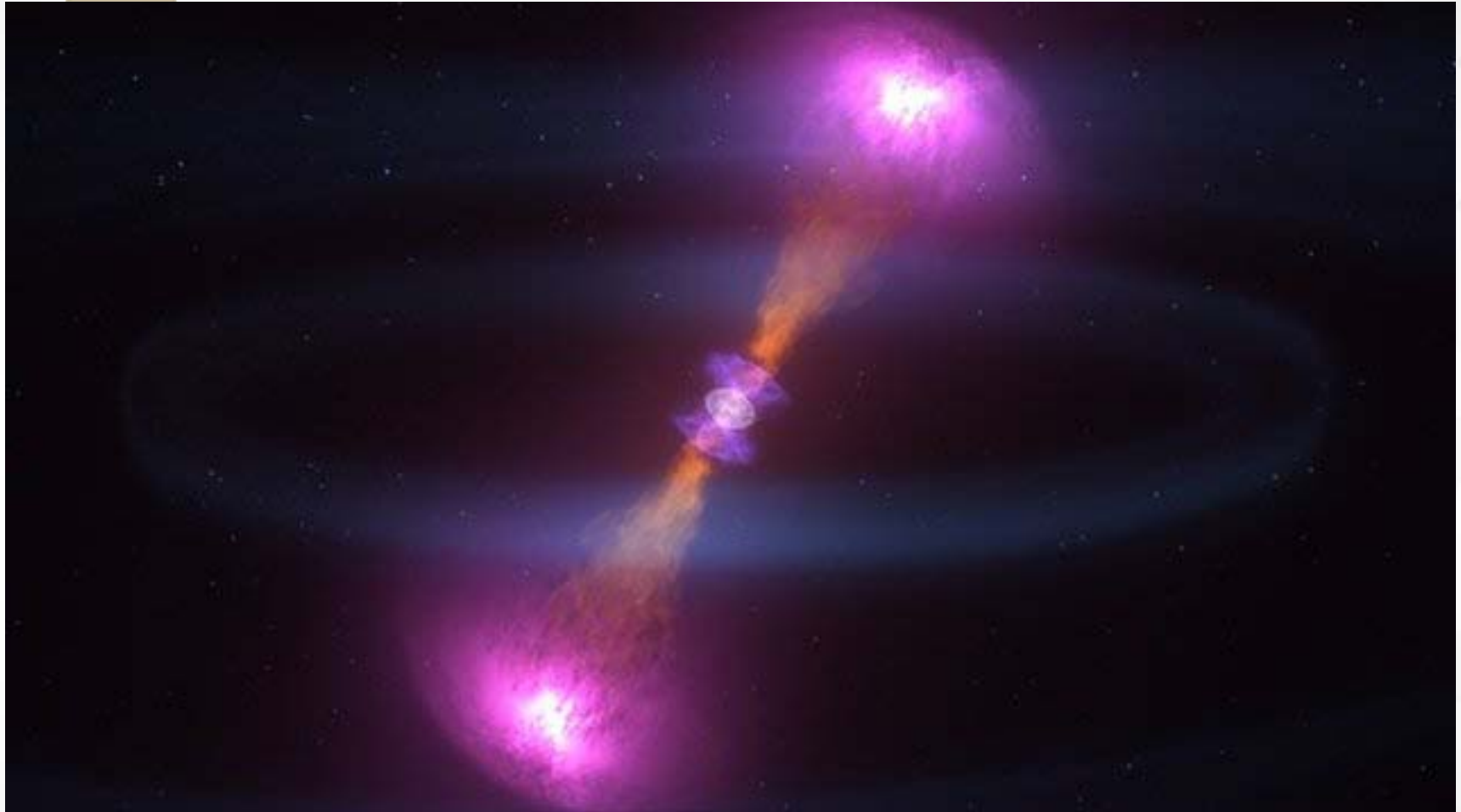
gamma rays,
x-rays



radio



neutrinos



This still from a NASA animation shows the aftermath of a collision of two neutron stars, which merged into an object called GW170817. Gravitational waves from the collision were detected on Aug. 17, 2017.

Credit: NASA's Goddard Space Flight Center/CI Lab

Do gravitational waves propagate as predicted?

Will, Phys. Rev. D **57**, 2061 (1998)

□ Dispersion of gravitational waves?

$$E^2 = p^2 c^2 + m_g^2 c^4$$

$$\lambda_g = h / (m_g c)$$

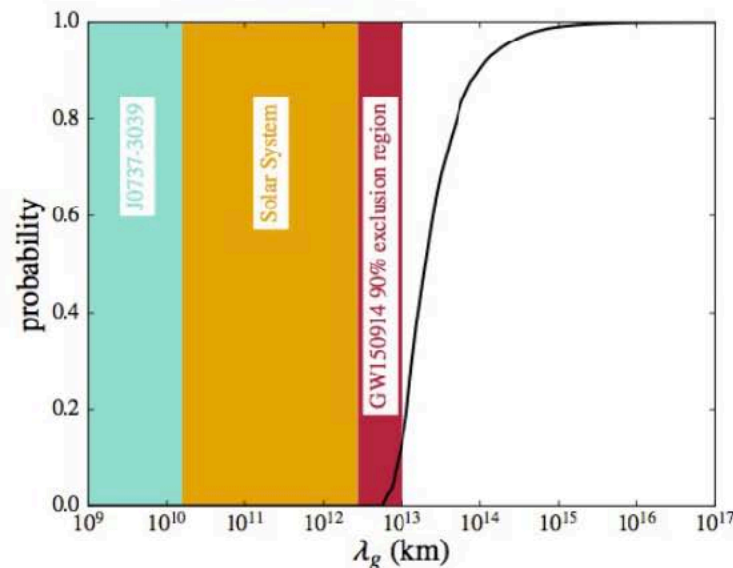
$$\Phi_{MG}(f) = -(\pi D c) / [\lambda_g^2 (1+z) f]$$

- New bound on graviton Compton wavelength and mass:

$$\lambda_g > 10^{13} \text{ km}$$

$$m_g < 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$

- 3 orders of magnitude better than only other existing dynamical bound
- Factor of a few better than (static) Solar system bound

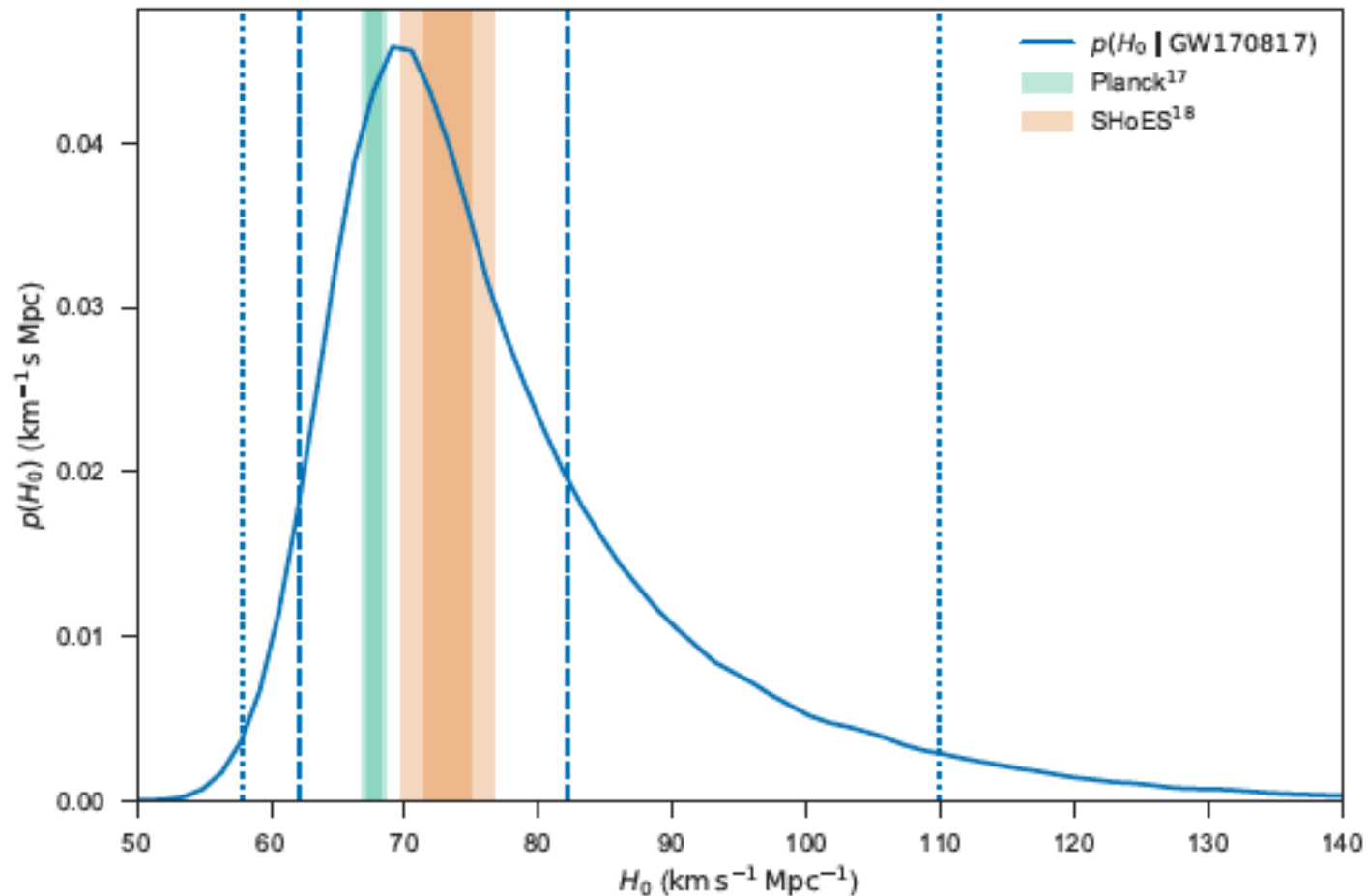


LSC+Virgo, Phys. Rev. Lett. **116**, 221101 (2016)

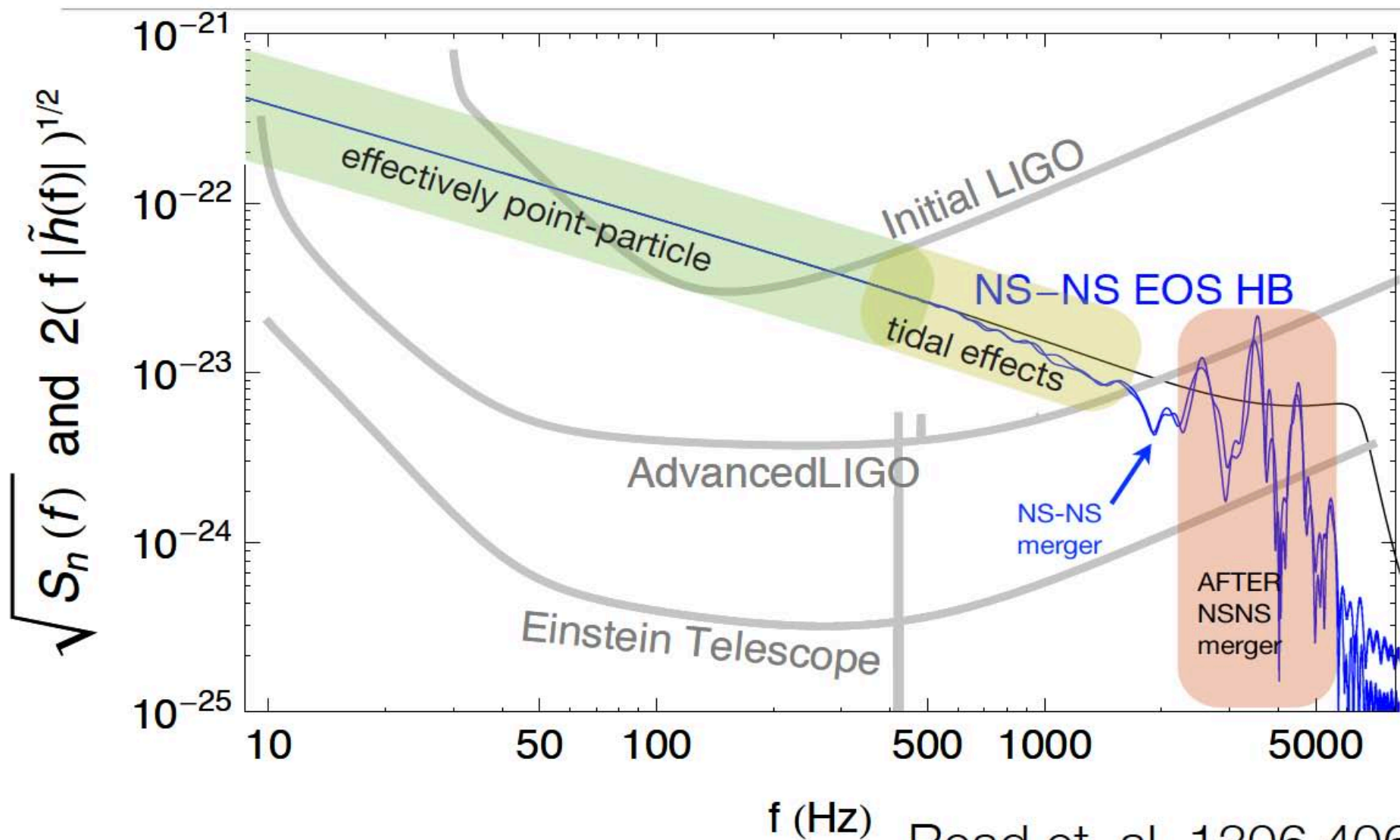
Figure 1. GW170817 measurement of H_0 . Marginalized posterior density for H_0 (blue curve). Constraints at 1- and 2σ from Planck (Planck Collaboration et al. 2016) and SHoES (Riess et al. 2016) are shown in green and orange. The maximum a posteriori value and minimal 68.3% credible interval from this PDF is $H_0 = 70.0^{+12.0}_{-8.0} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. The 68.3% (1σ) and 95.4% (2σ) minimal credible intervals are indicated by dashed and dotted lines.

$$v_H = H_0 d$$

doi:10.1038/nature24471



Gravitational-wave spectrum of BNS



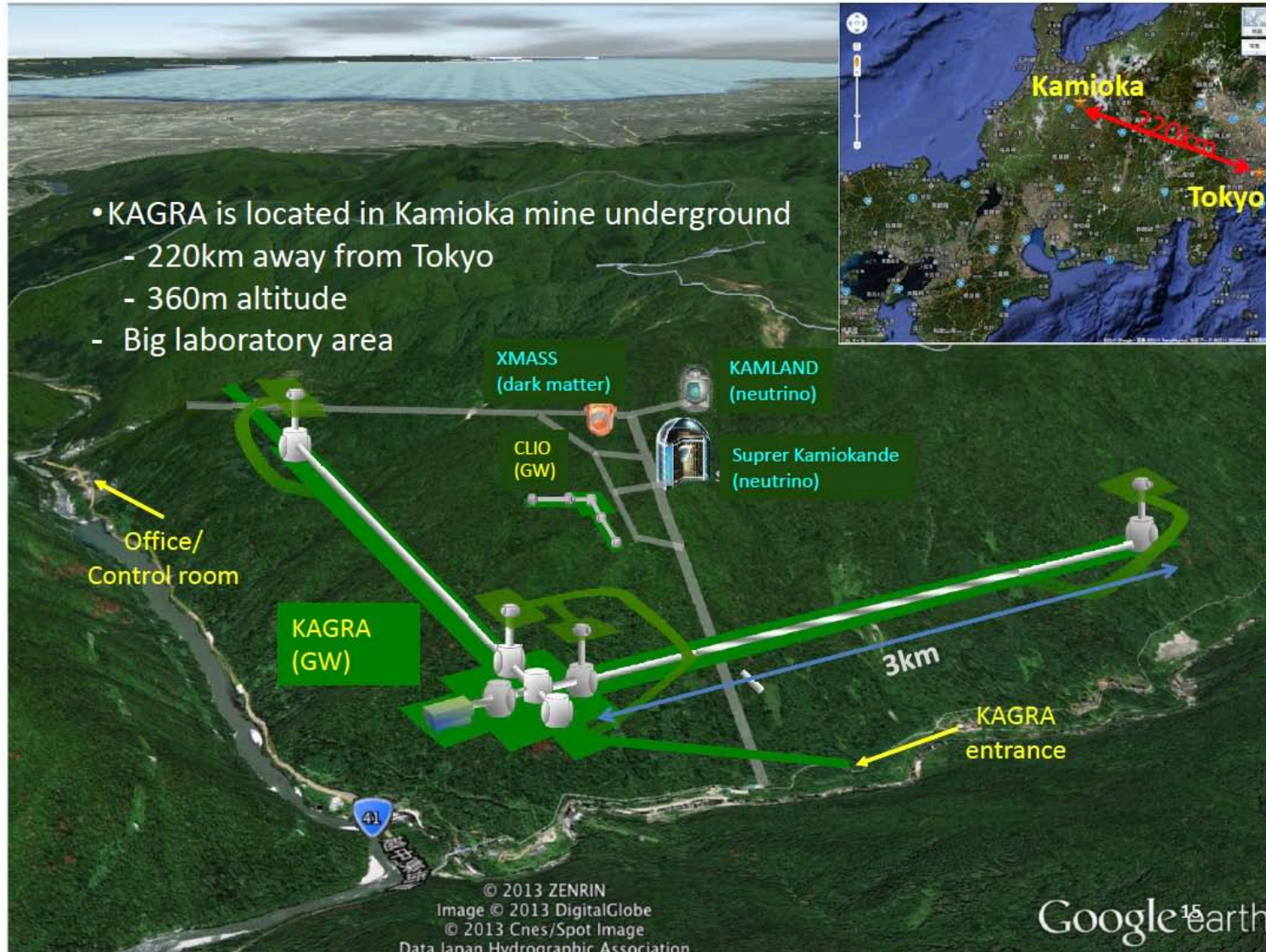


E qual é o futuro da astrofísica de ONDAS GRAVITACIONAIS?



crédito: LIGO lab

Presented at Amaldi12 by Sheila Rowan
<http://www.amaldi12.org/talks>

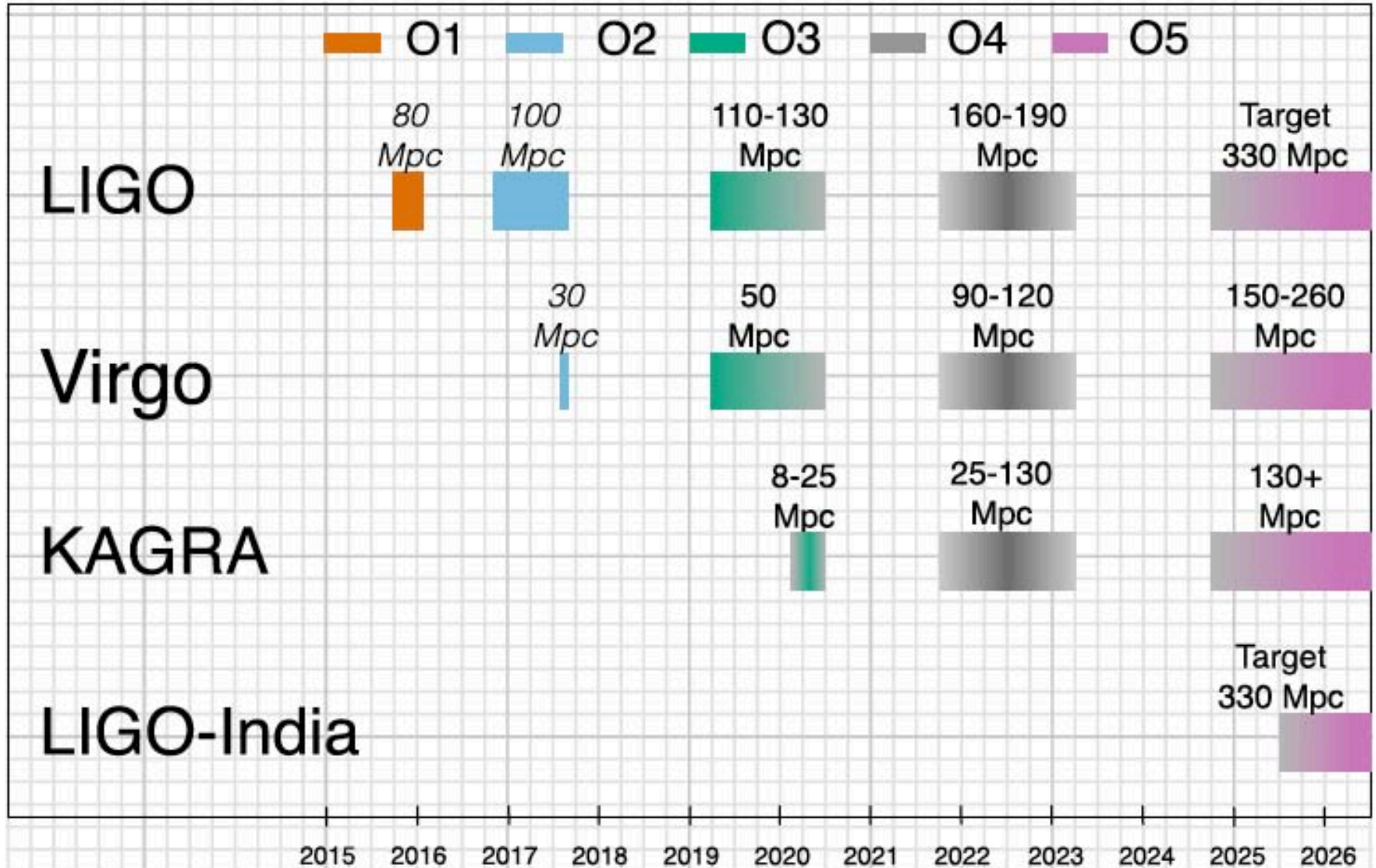




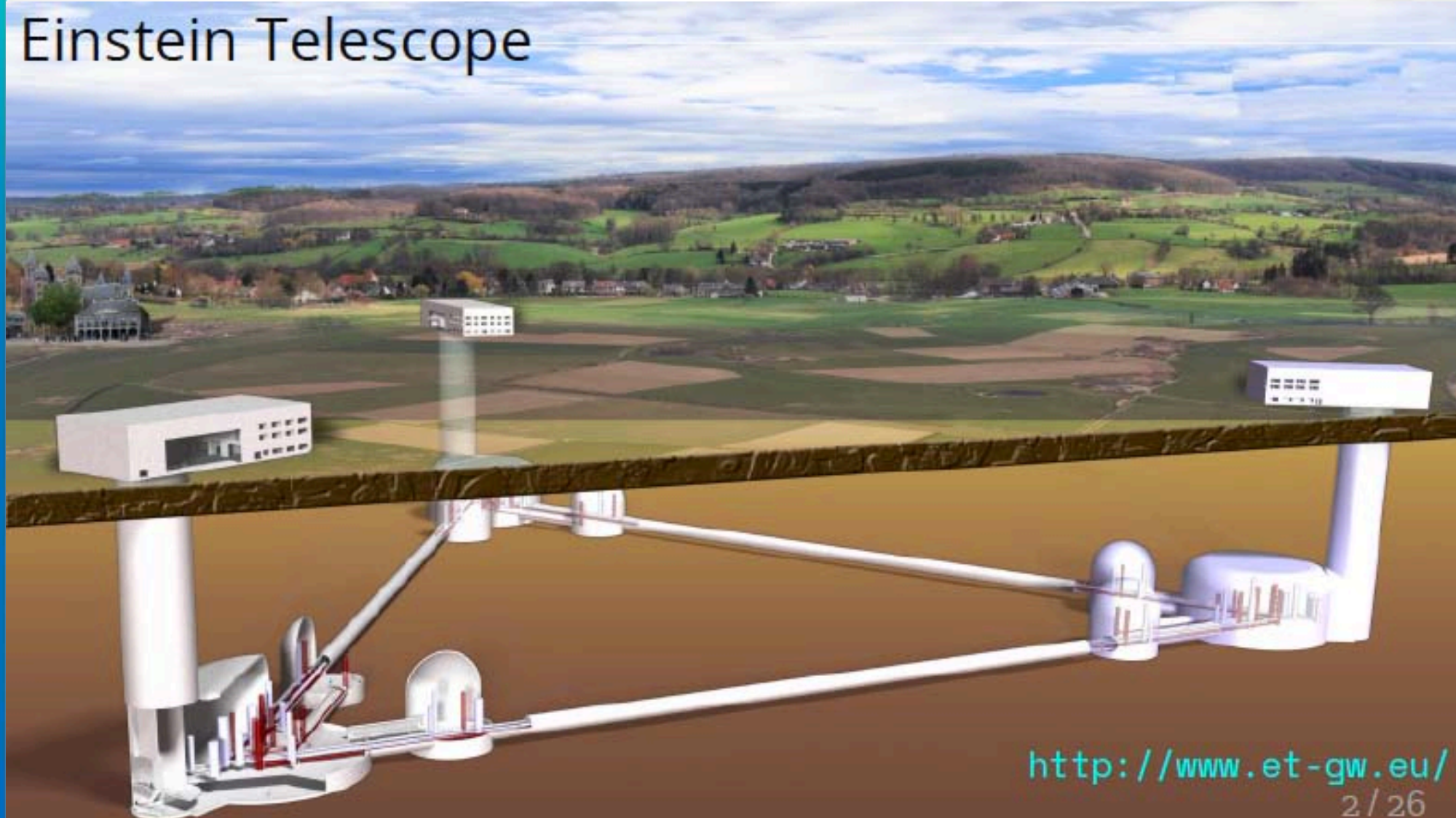
Living Reviews in Relativity

<https://doi.org/10.1007/s41114-020-00026-9>

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



Einstein Telescope



12th Edoardo Amaldi Conference, Pasadena, CA, July 13, 2017



LIGO

Cosmic Explorer (US)

Presented at Amaldi12 by David Reitze
<http://www.amaldi12.org/talks>

- Third-generation GW observatory
- Target sensitivity a factor of > 10 improvement in comparison to current advanced detectors
- Above ground, 40 km arm length, L configuration

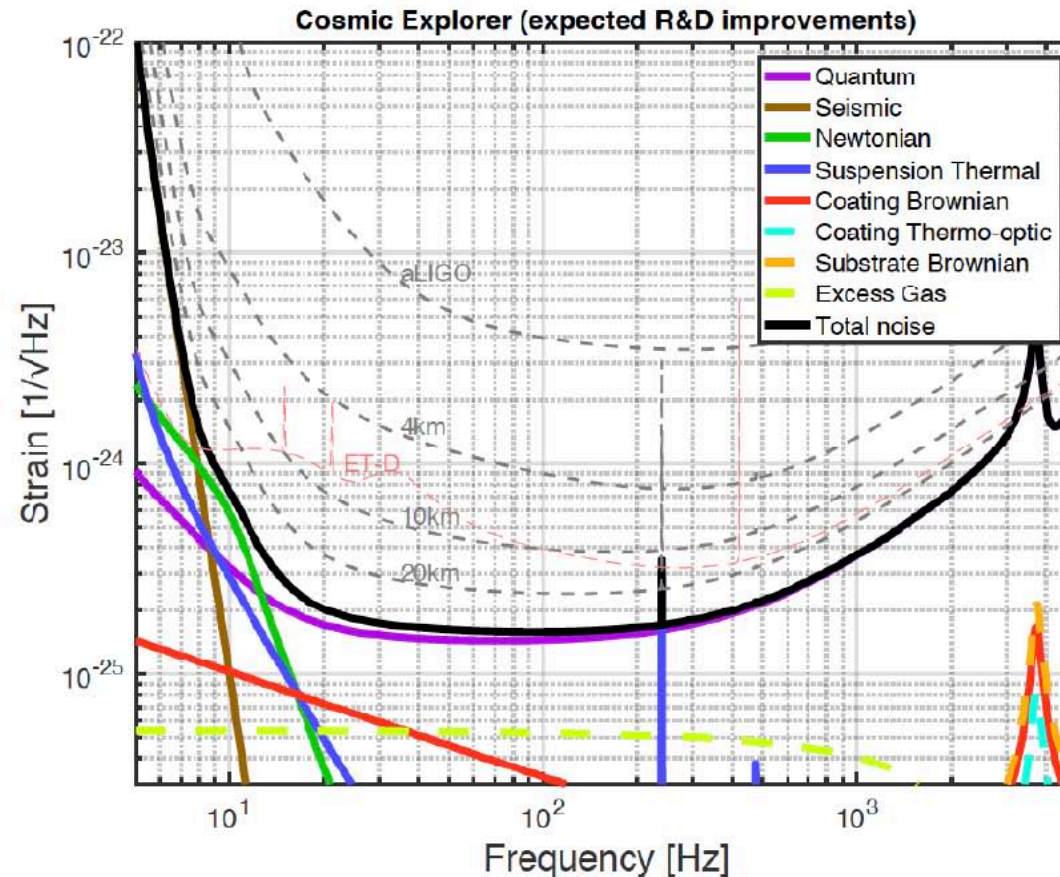
Formal Design Study: not yet, but proposal under development (M. Evans, MIT, PI)



12th Edoardo Amaldi Conference, Pasadena, CA, July 13, 2017

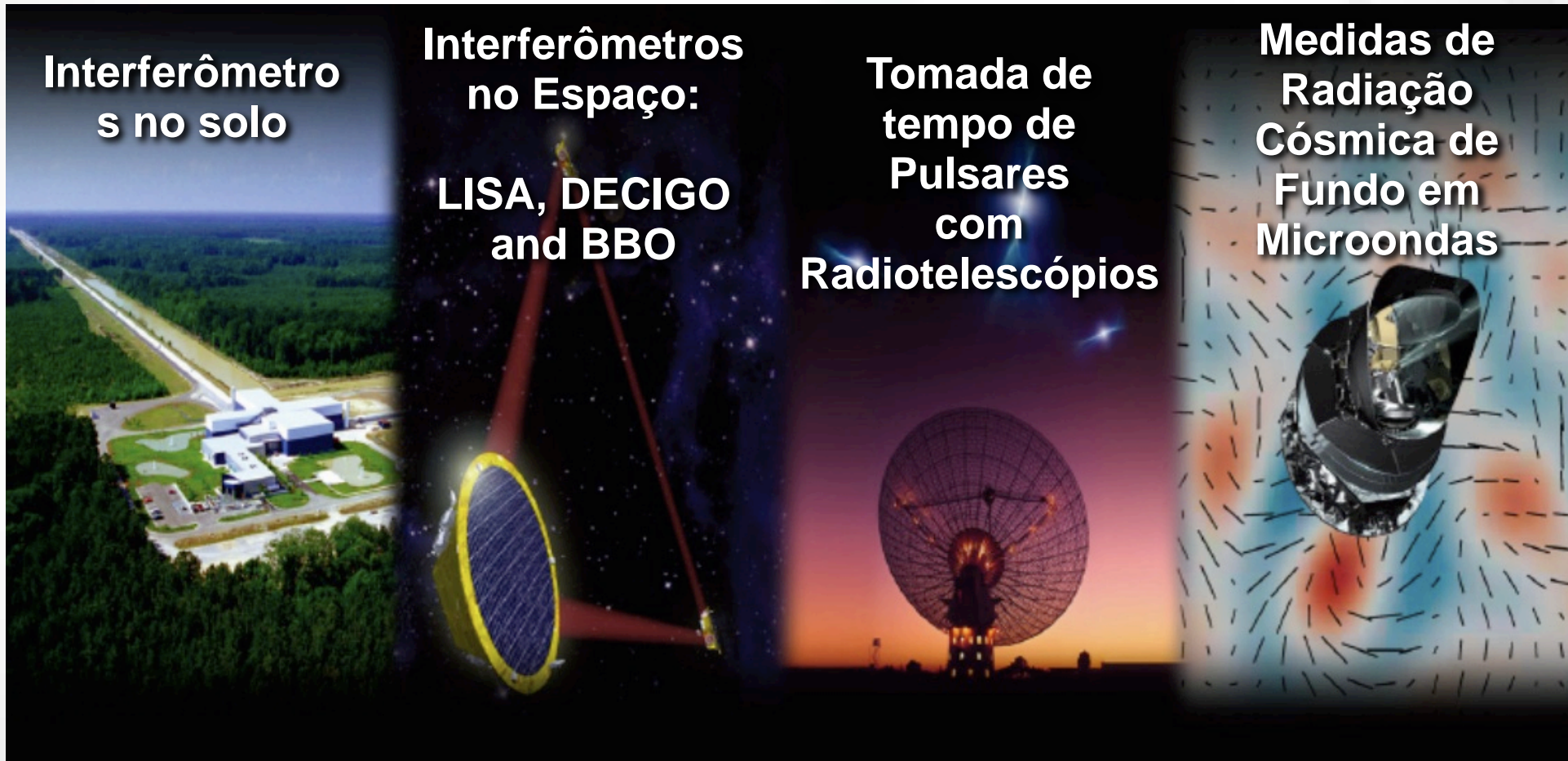


The 3G Sensitivity Horizon (circa 2017)



LSC Instrument Science White Paper 2017-2018, LIGO-T1700231-v2

Perspectivas para o futuro da recém-inaugurada *Astronomia de Ondas Gravitacionais*



Milissegundos

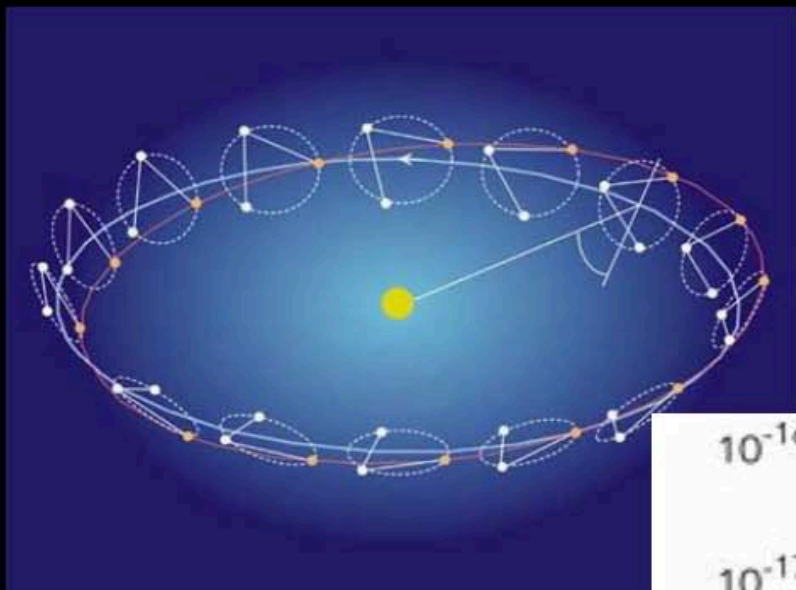
Minutos a Horas

Anos a Décadas

Bilhões de Anos

Período das ondas gravitacionais

The Laser Interferometer Space Antenna

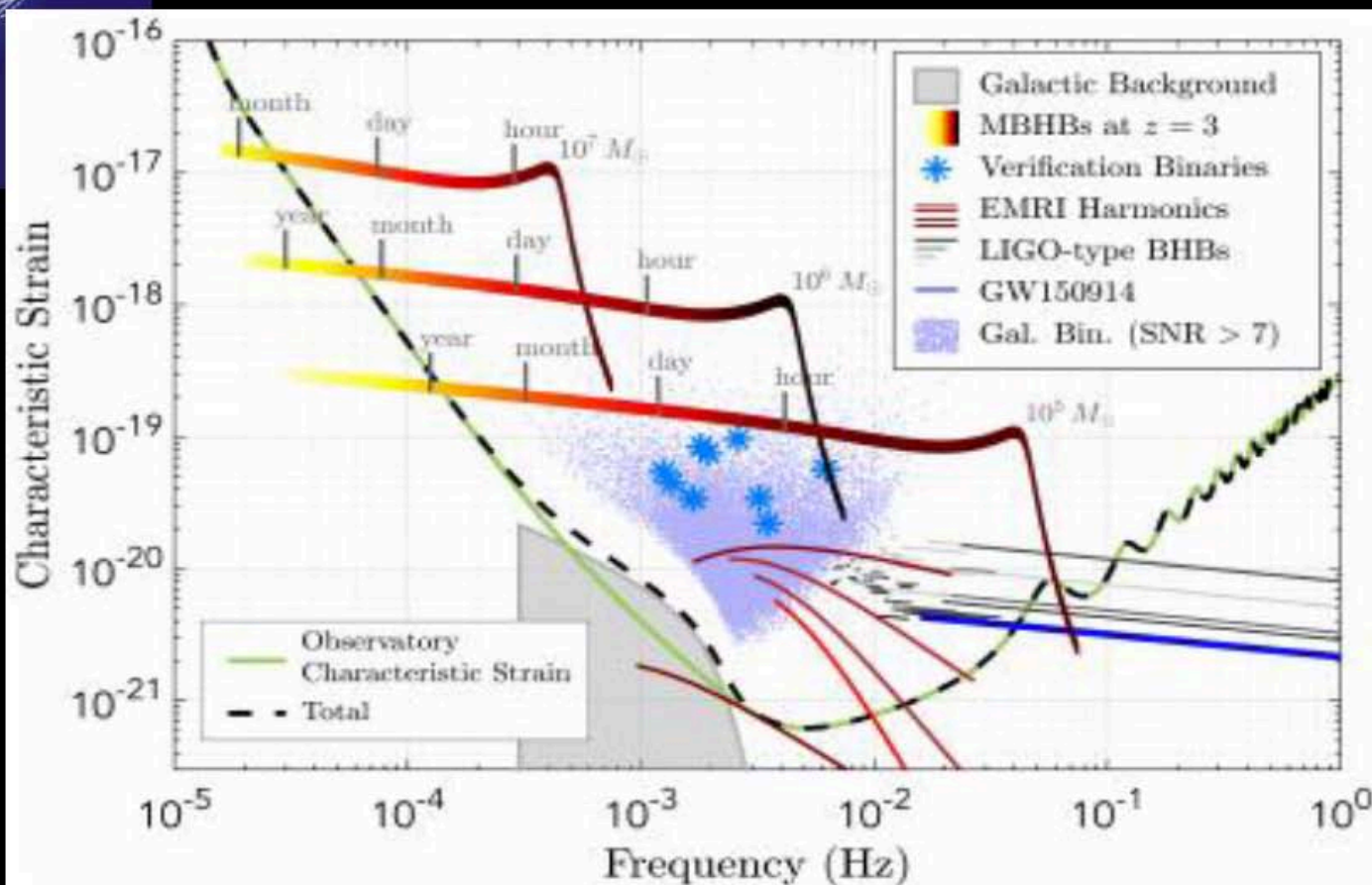


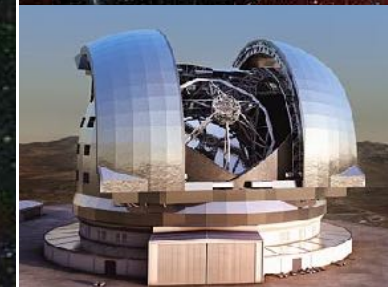
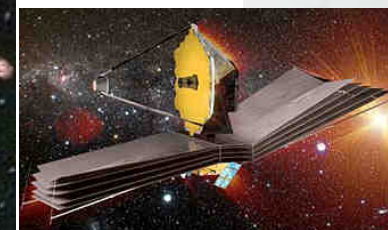
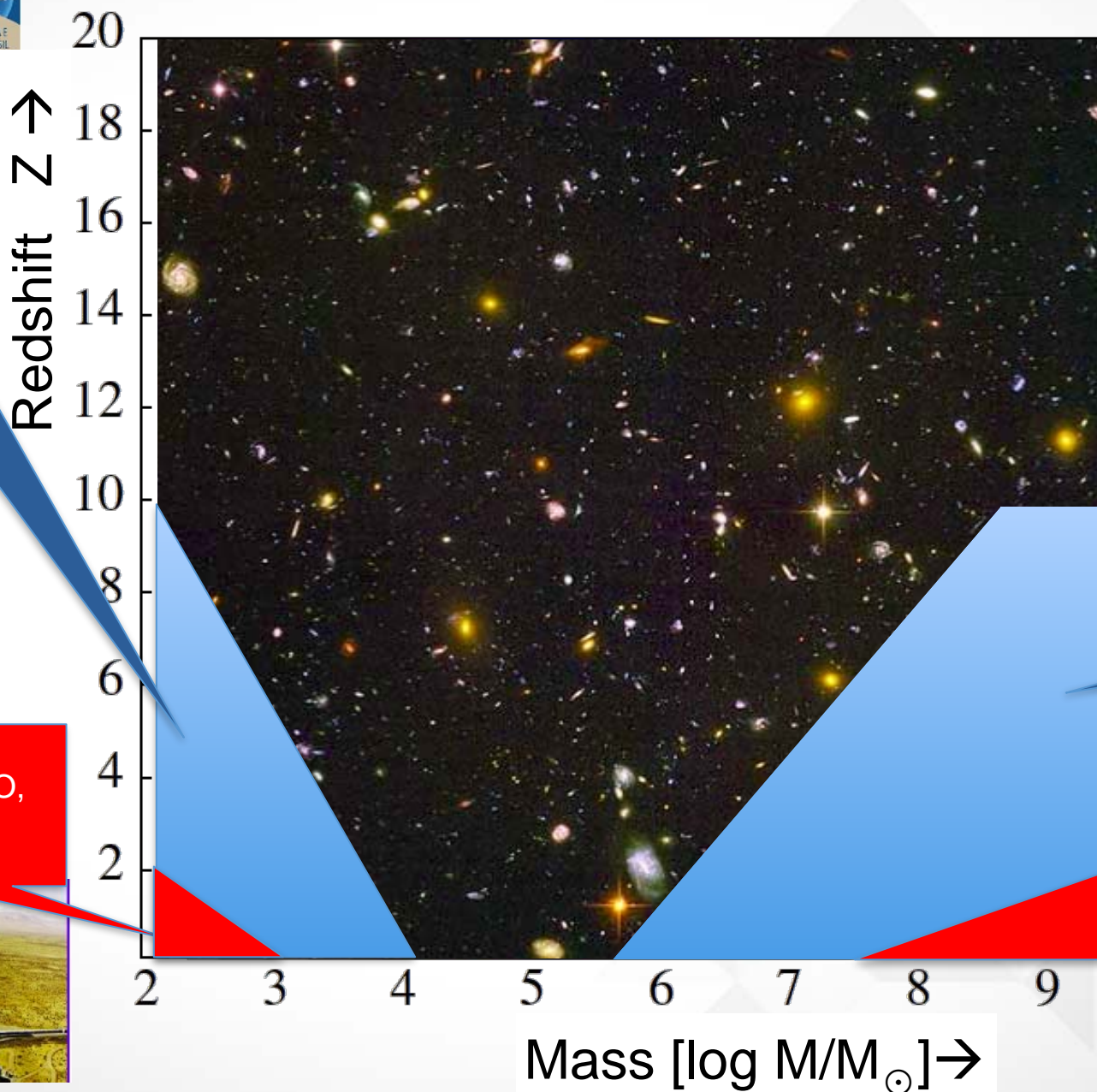
Sensitive in the mHz frequency range where MBH binary evolution is fast (chirp)

Observes the full inspiral/merger/ringdown

3 satellites trailing the Earth connected through laser links

Proposed baseline:
2.5M km armlength
6 laser links
4 yr lifetime (10 yr goal)

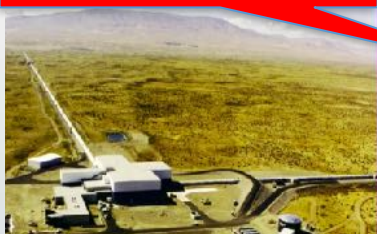


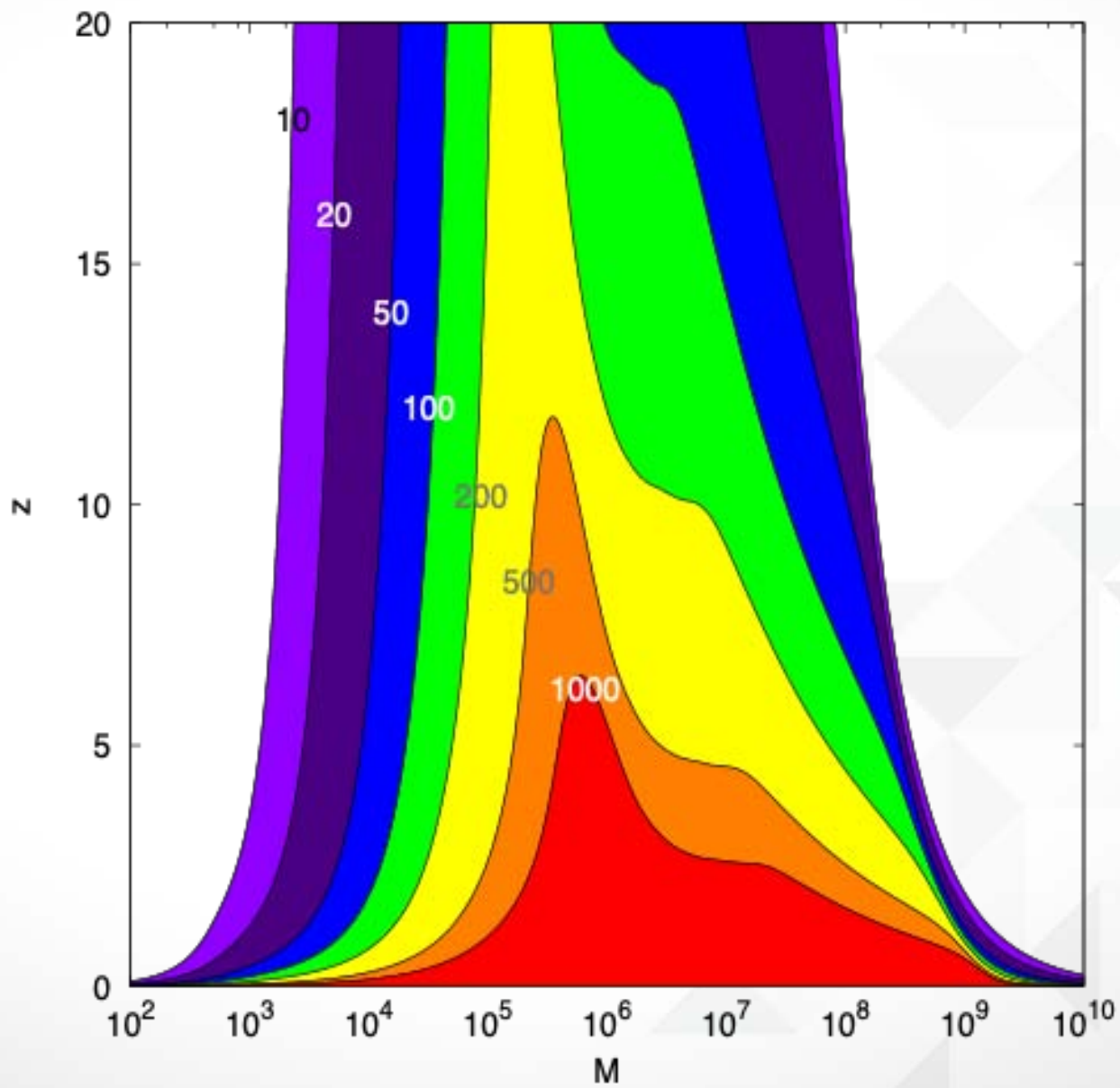


Future EM Obs.
LSST, JWST, EELT

aLIGO, aVIRGO,
KAGRA

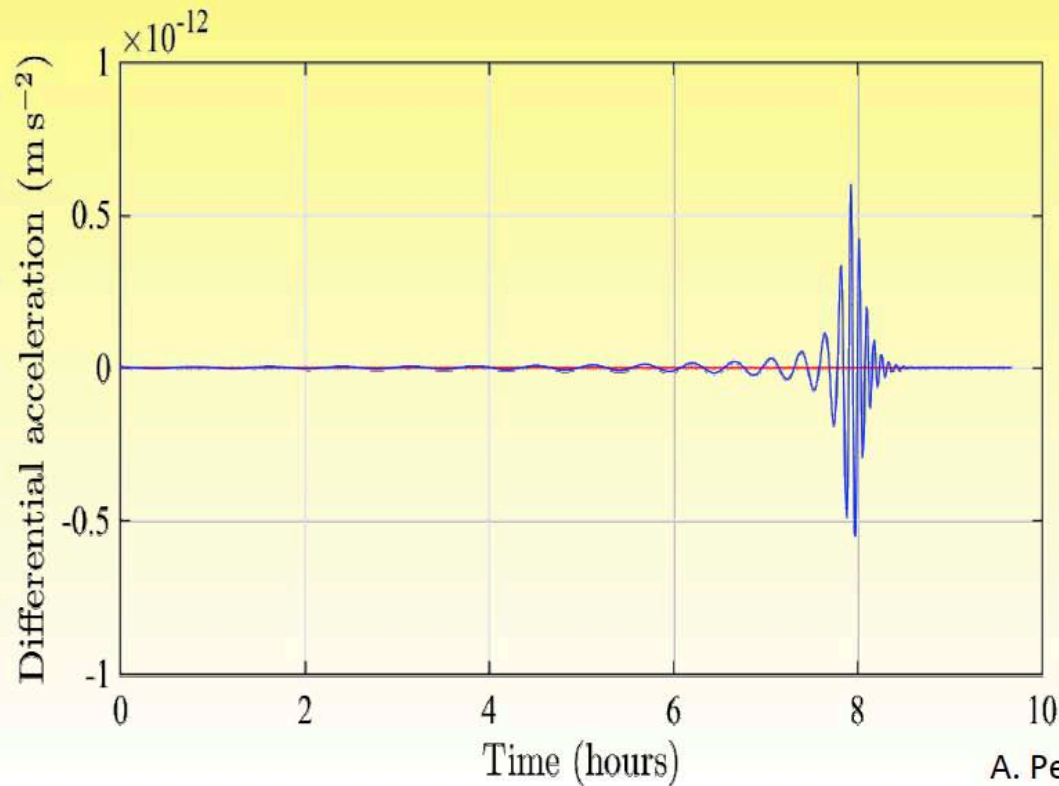
SKA, Pulsar Timing





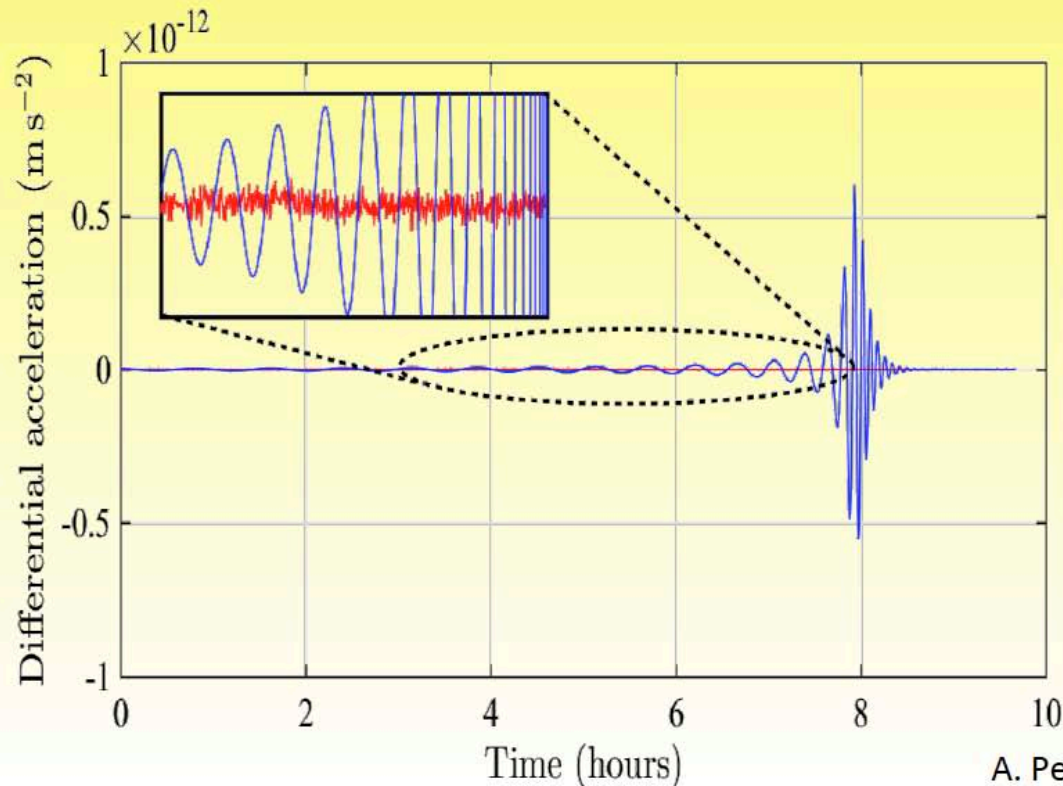
Black Hole Mergers far above Noise

- $10^5 M_{\odot}$ BH binary merger at $z=5$
- In Red: Pathfinder instrumental noise



Black Hole Merger far above Noise

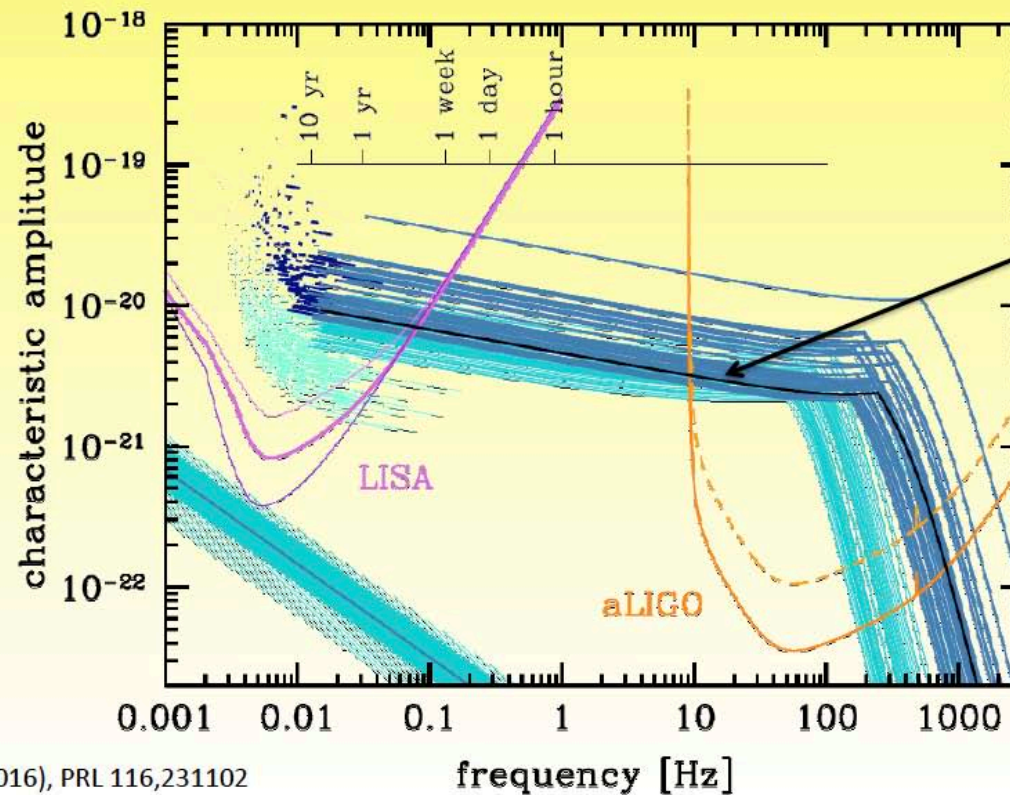
- $10^5 M_{\odot}$ BH binary merger at $z=5$
- In Red: Pathfinder instrumental noise



LISA: LIGO Event Predicted 10 Years in Advance!



- Accurate to seconds and within a square-degree!





A Astronomia de Ondas Gravitacionais (AOG) vai revolucionar o nosso conhecimento da física e astrofísica e, provavelmente, nos ajudar a responder às suas principais questões da atualidade: a matéria escura, a energia escura e como o Universo teve início.

DUAS VISÕES DO PRINCÍPIO

Em nosso Universo em expansão, as galáxias se afastam rapidamente umas das outras, a uma velocidade proporcional à distância entre elas: duas galáxias separadas por uma distância de 500 milhões de anos-luz se afastam a uma velocidade duas vezes maior do que duas galáxias separadas por uma distância de 250 milhões de anos-luz. Por isso, todas as galáxias que vemos devem ter se originado em um mesmo ponto e ao mesmo tempo – o Big Bang. A conclusão é válida mesmo quando a expansão cósmica passou por períodos de aceleração e desaceleração; em diagramas de espaço-tempo (abaixo), as galáxias seguem trajetórias sinuosas que as levam para dentro e para fora da região observável do espaço (*triângulo amarelo*). No entanto, a situação torna-se incerta no instante exato em que as trajetórias das galáxias (ou suas predecessoras) começaram a divergir.

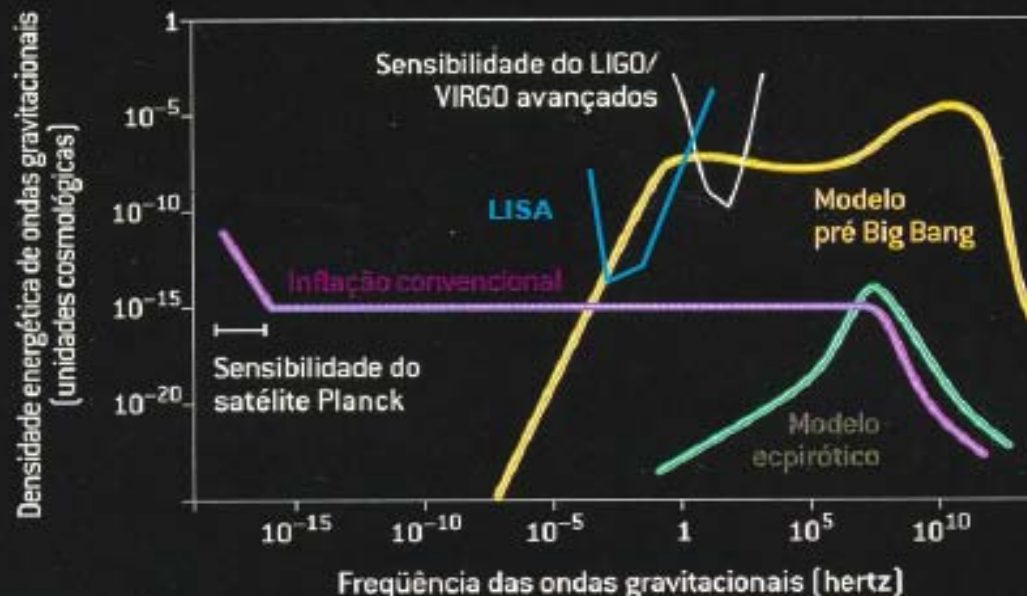
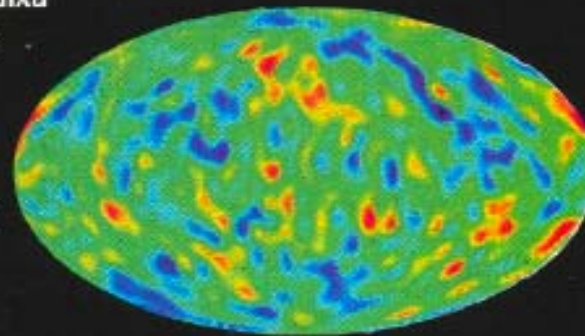


Na cosmologia do Big Bang convencional, que se baseia na teoria da relatividade geral de Einstein, a distância entre quaisquer duas galáxias era zero há um tempo finito. O tempo perde significado antes desse instante.

Nos modelos mais sofisticados, que incluem efeitos quânticos, quaisquer duas galáxias devem ter surgido a uma certa distância mínima uma da outra. Esses modelos abrem a possibilidade de um Universo pré-Big Bang.

EFEITO DE FUNDO

Observar o Universo pré-Big Bang pode parecer uma tarefa sem futuro, mas uma forma de radiação poderia sobreviver desde aquela época: a radiação gravitacional. Essas variações periódicas na campo gravitacional poderiam ser detectadas indiretamente, por seu efeito na polarização do fundo cósmico de microondas (*vista simulada, abaixo*), ou diretamente, em observatórios terrestres. Os cenários pré-Big Bang e ecpirótico prevêm mais ondas gravitacionais de alta freqüência e menos de baixa freqüência do que os modelos convencionais de inflação (*abaixo*). Medidas existentes de vários fenômenos astronômicos não conseguem fazer a distinção entre esses modelos, mas futuras observações do satélite Planck, assim como dos observatórios LIGO e VIRGO, devem ser capazes disso.



Gravitational Wave Astronomy

A new window for the observation of the universe that will revolutionize our knowledge of it.

que poderá revolucionar o conhecimento que temos dele.



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



www.gov.br/mcti



Obrigado pela atenção!