

# Ondas Gravitacionais

AGA0101–Visão Geral II

Gastão B. Lima Neto, IAG/USP

# Gravitação

- Newton (1687) “*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*”.
- Teoria clássica da gravitação, adequada para campos fracos.
  - Por exemplo, usada para descrever a dinâmica do Sistema Solar e movimentos estelares
- Não é aplicável para campos fortes e sistemas relativísticos.
- Einstein (1915) Relatividade Geral
- Aplicável para campos fortes, relativísticos, porém não é uma teoria quântica.

844 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 25. November 1915

## Die Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

In zwei vor kurzem erschienenen Mitteilungen<sup>1</sup> habe ich gezeigt, wie man zu Feldgleichungen der Gravitation gelangen kann, die dem Postulat allgemeiner Relativität entsprechen, d. h. die in ihrer allgemeinen Fassung beliebigen Substitutionen der Raumzeitvariablen gegenüber kovariant sind.

Der Entwicklungsgang war dabei folgender. Zunächst fand ich Gleichungen, welche die NEWTONSCHE Theorie als Näherung enthalten

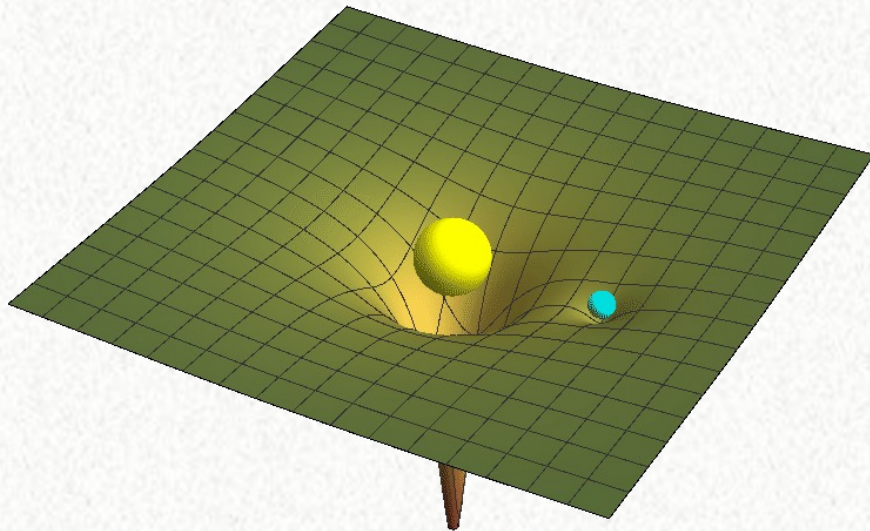
# Gravitação

- Descrição geométrica da gravitação:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$

geometria do espaço-tempo

matéria/energia



Matéria e energia deformam o espaço-tempo.

A deformação do espaço-tempo determina a trajetória dos corpos (as geodésicas).

# Gravitação

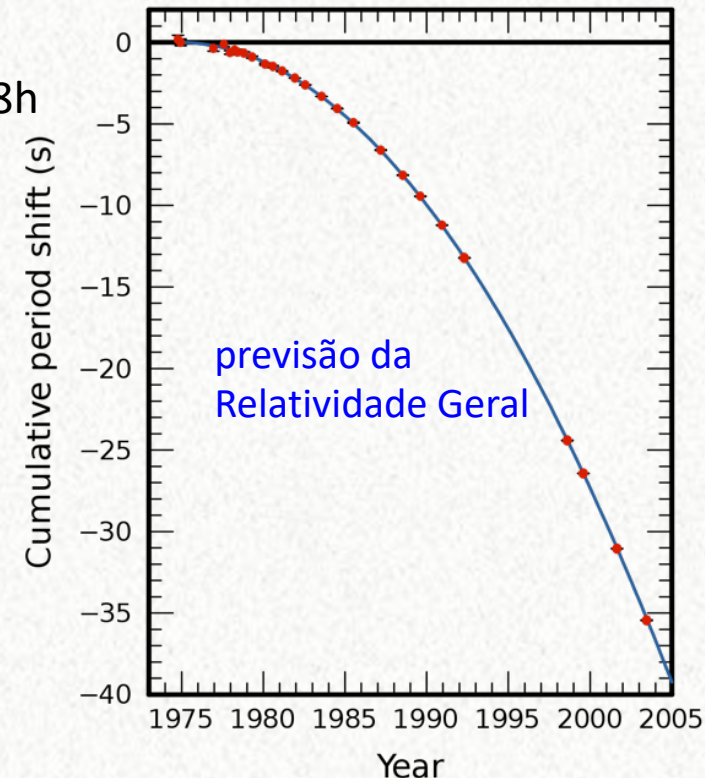
- Teoria da Relatividade Geral prevê fenômenos que não são explicados (ou mesmo previstos) pela teoria clássica:
  - Expansão do Universo
  - Curvatura do Universo
  - Correção do movimento planetário no Sistema Solar (precessão da órbita de Mercúrio)
  - Lentes gravitacionais
  - *Redshift* gravitacional
  - Buracos negros
  - **Ondas gravitacionais**

# Ondas Gravitacionais

- Previsto por Einstein em 1916, publicado em 1918.
  - Einstein duvidava que ondas gravitacionais realmente existissem na natureza.
- Felix Pirani (1957) e Joe Weber (1959) mostraram que ondas gravitacionais poderiam ser detectadas, pois agiriam sobre a matéria.
- Ondas gravitacionais são perturbações do espaço-tempo que se propagam na velocidade da luz
  - Tecnicamente, perturbações da métrica,  $g_{\mu\nu}$ , que descrevem o espaço tempo.
- O que pode produzir ondas gravitacionais?
  - Corpos em movimento acelerado (p.ex., sistema binário de 2 corpos)
  - Colapso de estrelas massivas (supernovas)
  - Inflação cosmológica (evento muito próximo do Big Bang)

# Ondas Gravitacionais

- Evidência indireta de ondas gravitacionais: movimento orbital de um par de pulsares.
- Russell Hulse e Joseph Taylor (1974) descobrem um sistema binário de pulsares, PSR 1913+16.
  - Estrelas de nêutron em um sistema cerrado: período de  $\sim 8\text{h}$
- A emissão de ondas gravitacionais diminui a energia orbital do par:
  - Semi-eixo maior diminui, período diminui (sim, é a 3ª lei de Kepler,  $P \propto a^{3/2}$ ).
- Prêmio Nobel em 1993.

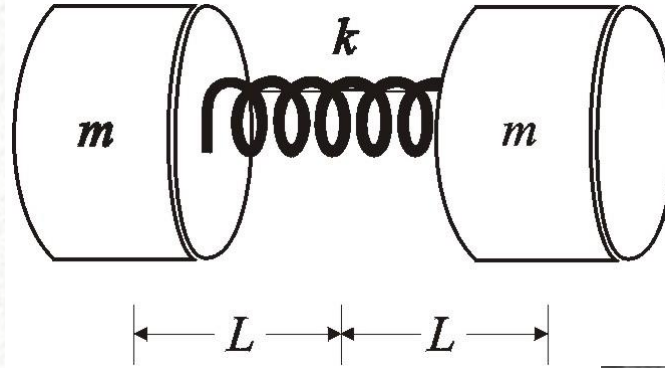


# Ondas Gravitacionais

- Grande desafio: detecção direta de ondas gravitacionais.
  - Extremamente sutis.

- Barras de Weber

$$h = \frac{\Delta L}{L} \sim 10^{-22}$$



Ondas gravitacionais produzem um deslocamento de cerca de  $10^{-18}\text{m}$  para  $L \sim 10 \text{ km}$ .

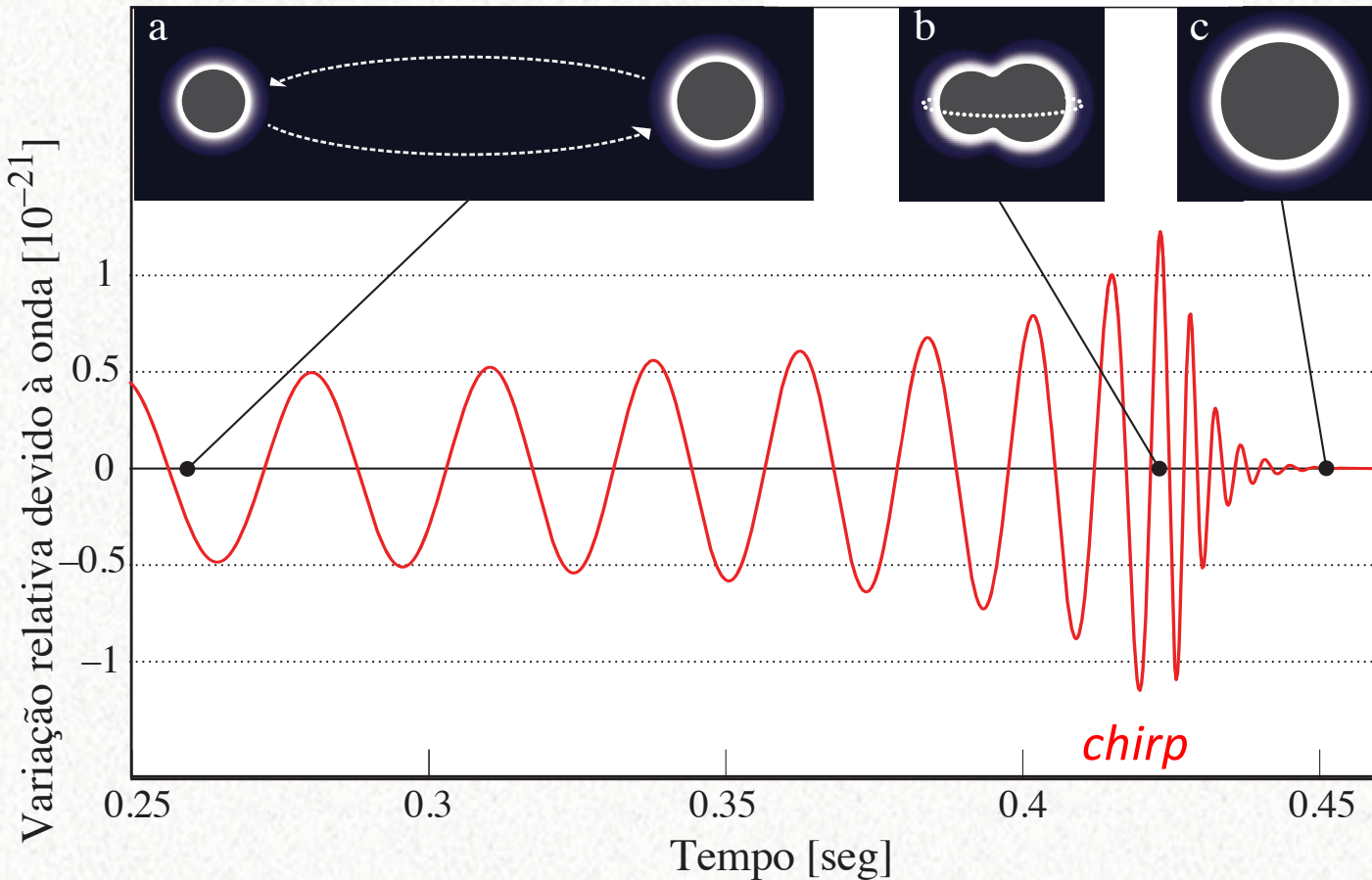
- Interferometria: LIGO “*Laser Interferometer Gravitational Observatory*”

- Dois interferômetros com braços de 4 km nos EUA.
- Detectável pelo padrão de interferência.
- VIRGO, em Piza na Itália.



# Ondas Gravitacionais

- Primeira detecção direta: GW150914, anunciado em 02/2016.
  - Fusão de buracos negros a 410 Mpc (redshift 0,093).



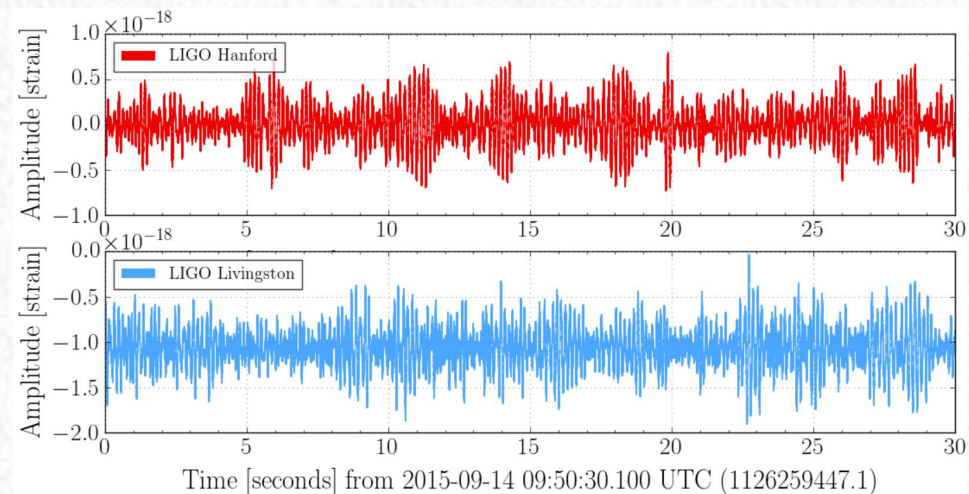
Medidas devem ser feitas com intervalo menor do que 0,01s.

Amplitude do sinal menor do que 0,05xraio do próton.



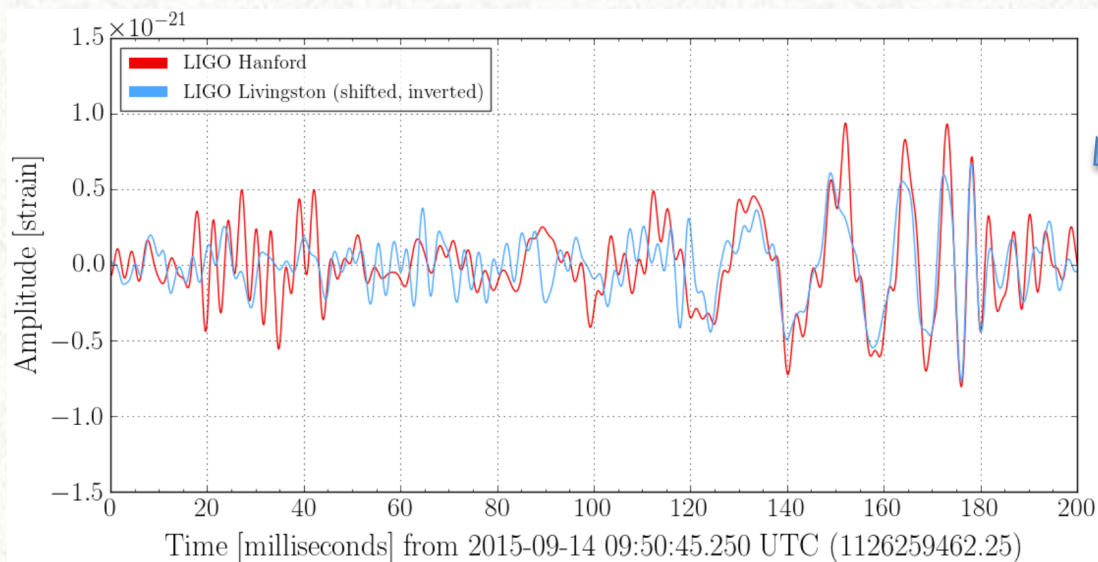
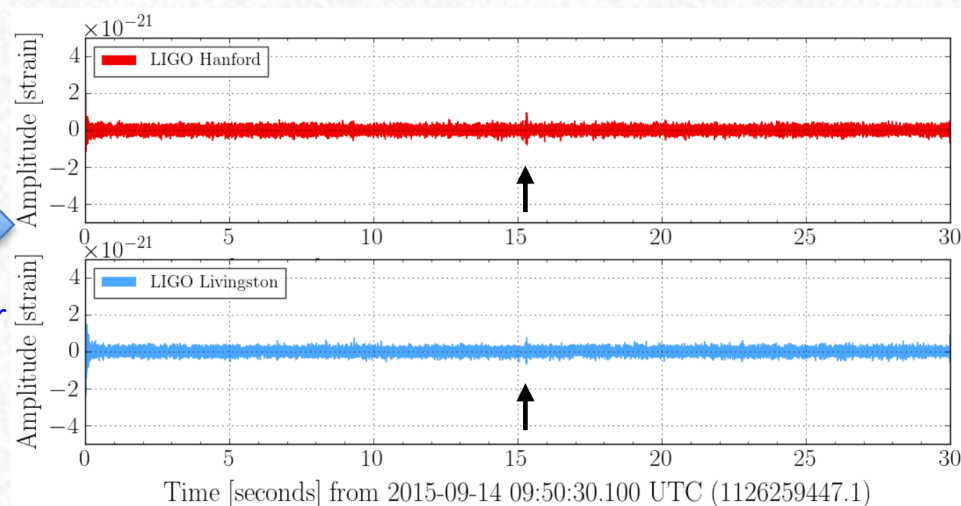
# Ondas Gravitacionais

- Primeira detecção direta: GW150914, anunciado em 02/2016



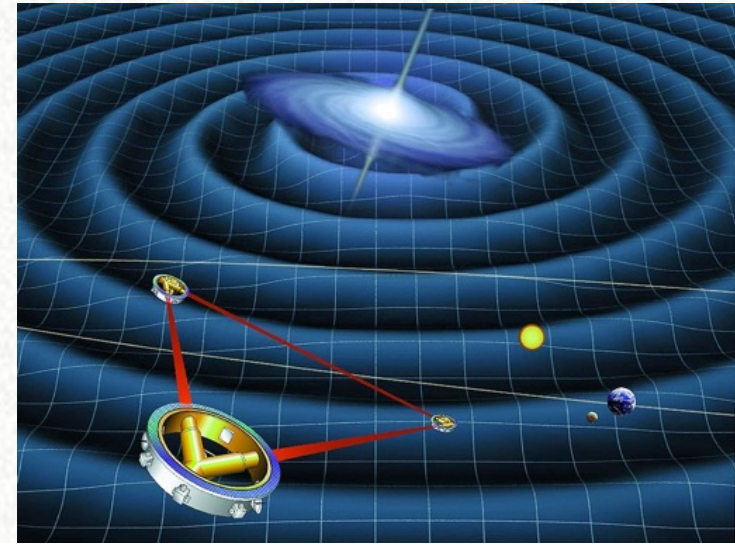
filtragem

escala vertical  
10000x menor



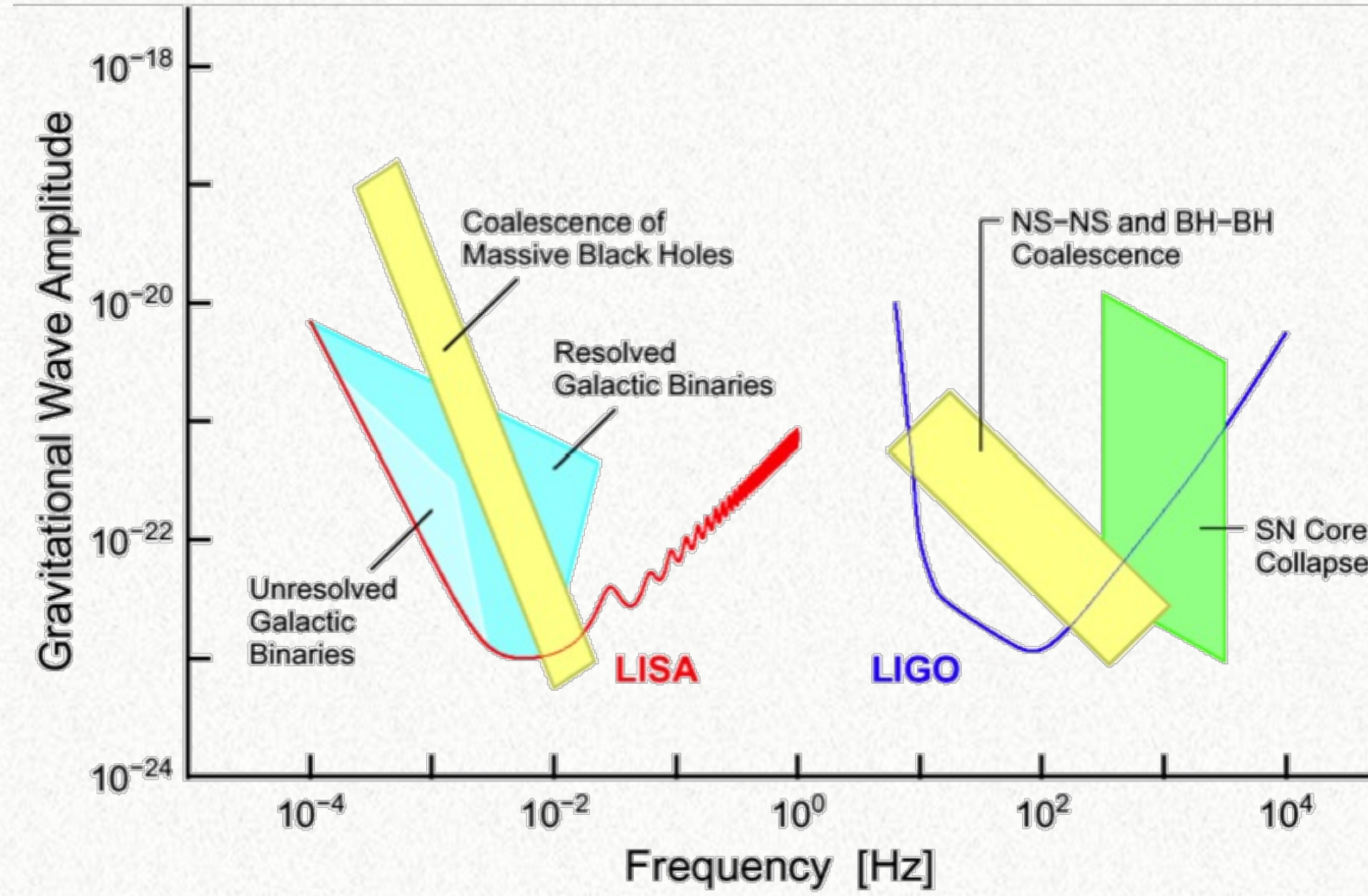
# Ondas Gravitacionais

- Até hoje (10/2023) 90 eventos de fusões detectados.
  - Detetores pararam em 03/2020 devido ao Covid-19.
  - Retomada esperada para início de 2023, mas sofreu atraso.
- GW170817: primeira fusão de 2 estrelas de nêutrons detectada e primeira detecção simultânea de ondas eletromagnéticas
  - caso de “*multi-messenger astronomy*”, observação do mesmo evento com sinais de tipos diferentes (ondas grav. e ondas EM).
  - Galáxia hospedeira: NGC 4993, redshift 0,00973.
- eLISA: “*Evolved Laser Interferometer Space Antenna*”
- Sistema de 3 satélites da ESA com lançamento previsto para 2034.



# Ondas Gravitacionais

- Ciência com ondas gravitacionais.



# Telescópios futuros

- Einstein Telescope (ET)
  - Telescópio de 3ª geração de ondas gravitacionais europeu, planejado para entrar em operação em 2035
  - [www.et-gw.eu](http://www.et-gw.eu)
- Cosmic Explorer (CE)
  - Telescópio de 3ª geração norte-americano, ainda sem uma data prevista para iniciar as observações
  - [cosmicexplorer.org](http://cosmicexplorer.org)
- Laser Interferometer Space Antena (LISA)
  - 3 satélites em formação, separados por milhões de km um do outro.
  - Colaboração NASA e ESA
  - [lisa.nasa.gov](http://lisa.nasa.gov)