

A primeira detecção de Ondas Gravitacionais

Prof. Dr. Tibério Borges Vale
Universidade Federal Fluminense
Campus de Santo Antônio de Pádua/RJ

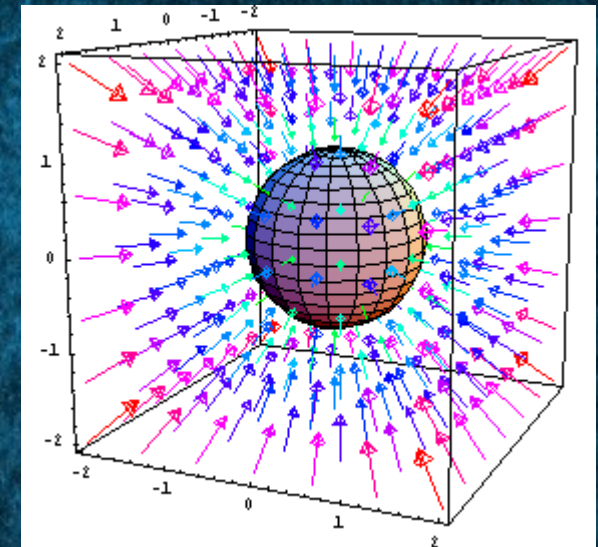
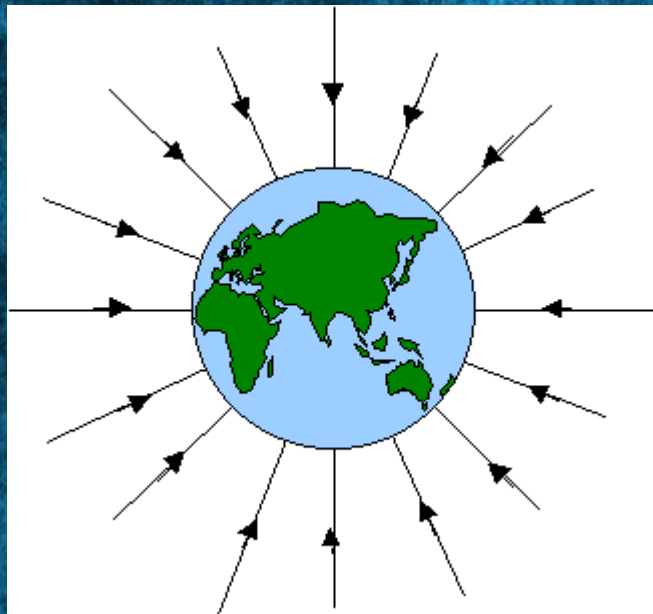
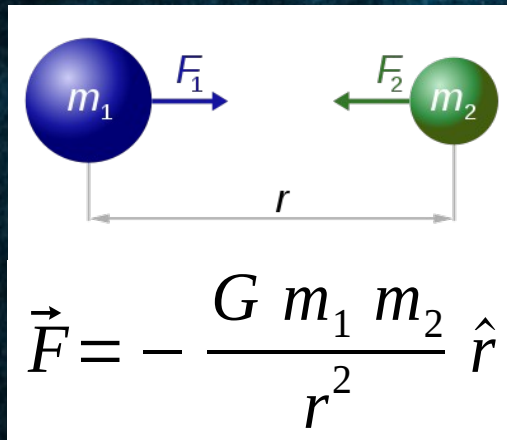
CEDERJ / Itaperuna – RJ
27 de Agosto de 2016

Perguntas

- O que é a Teoria da Relatividade?
- Como foi comprovada?
- Por que a Teoria da Relatividade é tão importante? Em que ela pode ser usada?
- O que são ondas gravitacionais? Como foram propostas por Einstein?
- Qual é o histórico de tentativas de comprovação da RG e de detecção dessas ondas?
- Como o Observatório LIGO conseguiu detectar tais ondas?
- Quais são os impactos futuros e perspectivas que esta detecção abre para a Astronomia e Astrofísica?

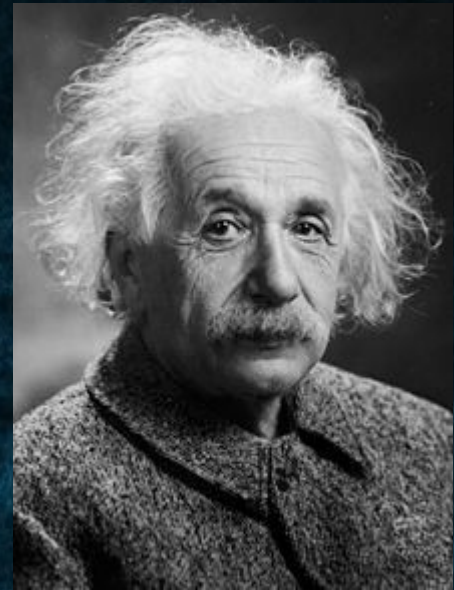
Teoria da Gravitação (Newton)

- Vetores!! Vetores!! Vetores!!
- Espaço e tempo são absolutos!



Teoria da Relatividade

(O que é?)

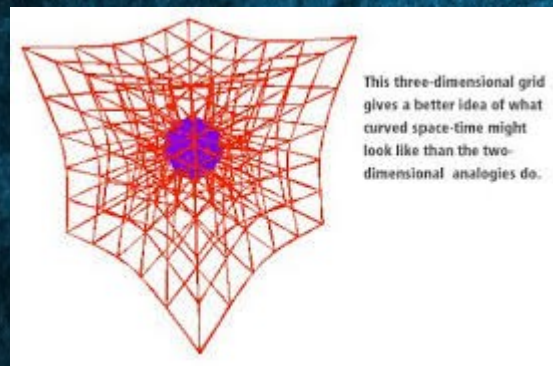
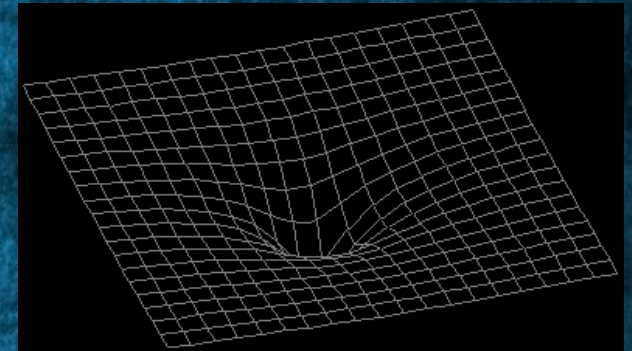
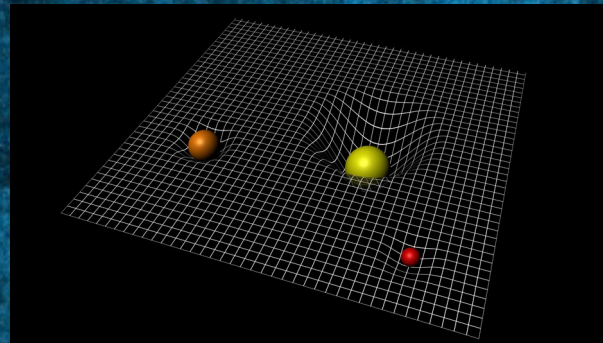
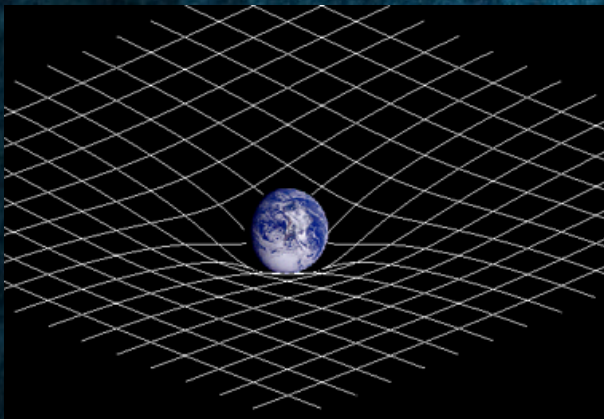


- Albert Einstein!!!
- Relatividade Especial ou Restrita– 1905
 - Trata de movimento uniforme a velocidades próximas à velocidade da luz (**$c=299.792.458$ m/s**)
- Relatividade Geral – 1915
 - Trata da generalização da RE com a inclusão de campos gravitacionais e referenciais acelerados
- Substitui a Teoria da Gravidade de Isaac Newton em:
 - Movimentos com altas velocidades, e
 - Campos gravitacionais muito fortes

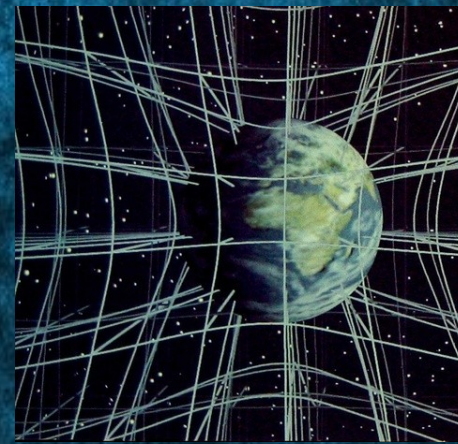
Teoria da Relatividade

(O que é?)

- Espaço e tempo são uma coisa só!
- Espaço-tempo é afetado pela matéria/energia
- A maior velocidade possível é a velocidade da luz c !
- Não há vetores! A RG usa a geometria do espaço-tempo!



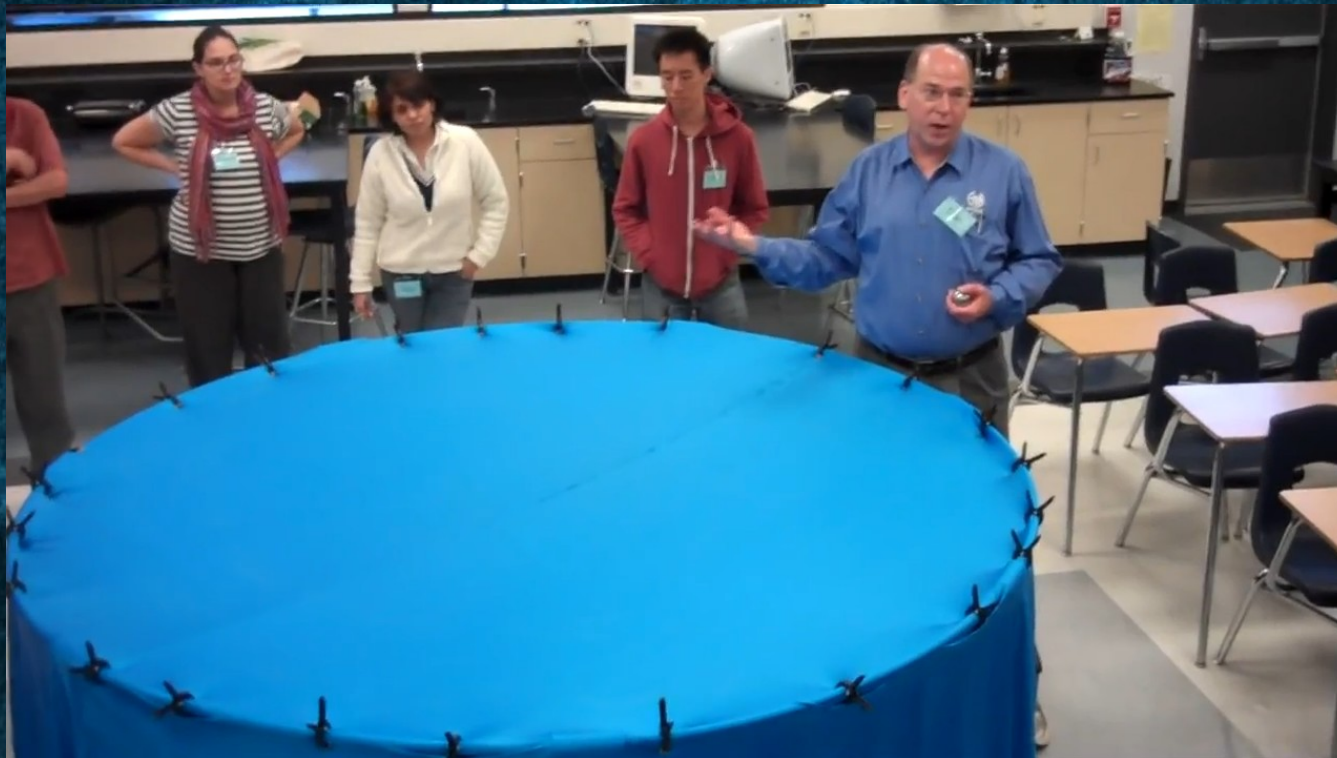
This three-dimensional grid gives a better idea of what curved space-time might look like than the two-dimensional analogies do.



Teoria da Relatividade

(O que é?)

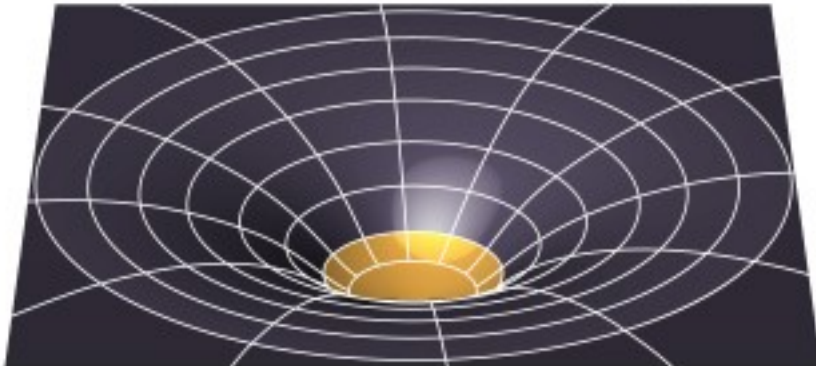
- Video “Gravity Visualized”:
<https://www.youtube.com/watch?v=MTY1Kje0yLg>
- Autor: Dan Burns (Prof. de Física do Los Gatos High School, EUA)



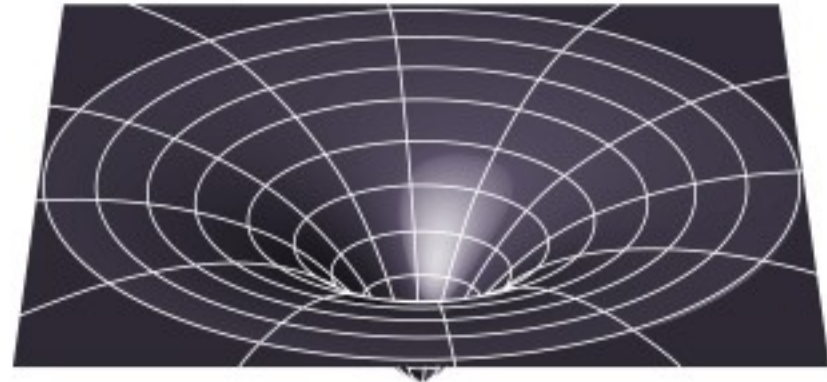
Teoria da Relatividade

(O que é?)

spacetime around the Sun today

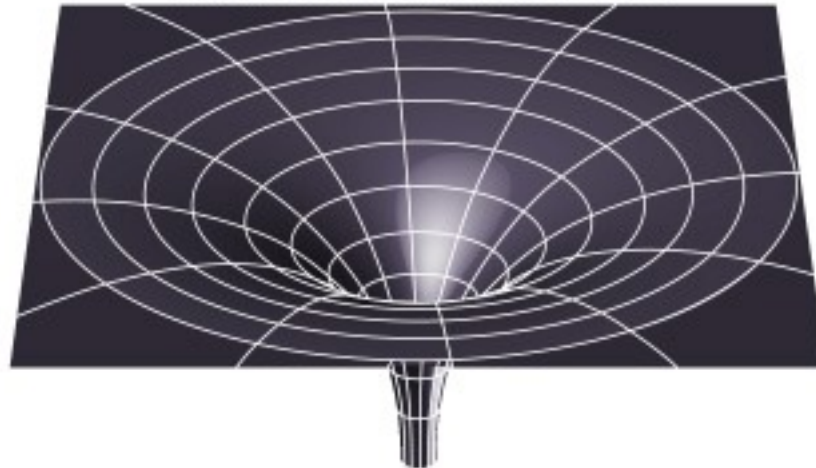


spacetime around the Sun
compressed to a white dwarf



(a)

spacetime around the Sun
compressed to a black hole



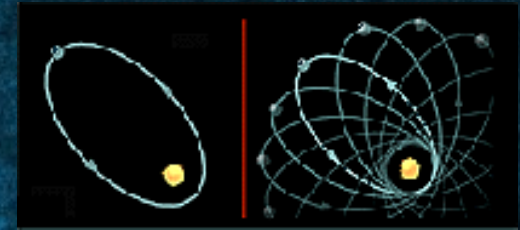
(b)

Teoria da Relatividade Geral

(Como foi comprovada?)

- **Comprovações Iniciais**

- Precessão do periélio na órbita de Mercúrio (1915)
(570"/século, Mecânica Newtoniana errava em 43")



- Desvio da luz das estrelas de fundo durante um eclipse solar. (1919)



- Avermelhamento gravitacional da luz (redshift)
 - Walter Adams (1925) e
 - Experimento de Pound-Rebka (1959)



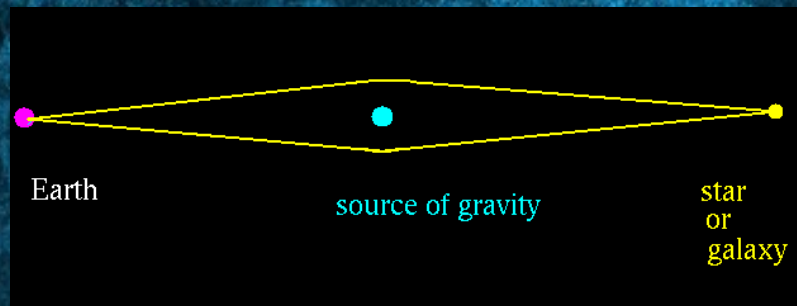
Teoria da Relatividade Geral

(Como foi comprovada?)

- **Comprovações Modernas**

- Teste de atraso temporal da luz de radares nos planetas Mercúrio e Vênus (Irwin Shapiro, 1966)

- Lentes gravitacionais (satélite Hipparcos 1989-1993 e GAIA 2013-) para astrometria de precisão



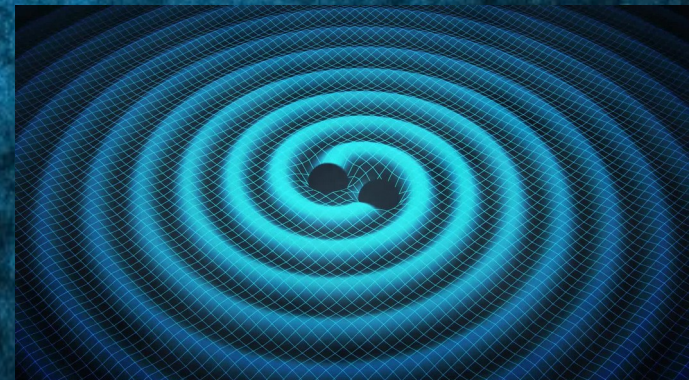
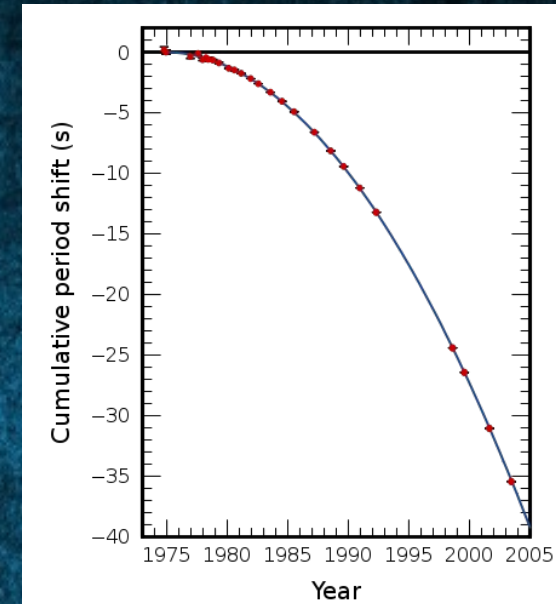
- Arrasto de referencial “Frame-dragging” (Gravity Probe B, 2004 e satélite LARES, 2012 – medindo o efeito Lense-Thirring, efeito gravitomagnético sobre giroscópios)



Teoria da Relatividade Geral

(Como foi comprovada?)

- **Comprovações Modernas**
- Decaimento da rotação de pulsares binários
(estrelas de nêutron em rotação)
Hulse e Taylor 1974
(ganharam Prêmio Nobel de Física de 1992)
- Recentemente: Ondas gravitacionais
(Observatório LIGO, 2016)



Teoria da Relatividade

(Quais suas aplicações?)

- GPS (Global Positioning System)
- Lei de Faraday (Variação de campos magnéticos induzem corrente num circuito) pode ser comprovada a partir da Relatividade Geral (livro do Thomas Moore)
- Química:
 - Por que o Ouro ($_{79}\text{Au}$) é um metal amarelado? E o Césio ($_{55}\text{Cs}$)?
 - Por que o Ouro é inerte e não sofre corrosão?
 - Por que o Mercúrio ($_{80}\text{Hg}$) é líquido?
- Tubo de raios catódicos de TVs antigas (elétrons a 30% c)
- Todos os elementos químicos mais pesados que Ferro ($_{26}\text{Fe}$) são criados em estrelas massivas devido a efeitos relativísticos.

Teoria da Relatividade Geral

(Equações de Campo de Einstein)

- Curvatura do espaço-tempo = atração gravitacional

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Curvature of space

Distribution of mass/energy

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

Some constants

Einstein's Field Equations

$$R_{\mu\nu} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\lambda}^{\lambda}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}}{\partial x^{\lambda}} + \Gamma_{\mu\lambda}^{\beta} \Gamma_{\nu\beta}^{\lambda} - \Gamma_{\mu\nu}^{\beta} \Gamma_{\beta\lambda}^{\lambda} = 0$$

where

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2} g^{\lambda\beta} \left(\frac{\partial g_{\mu\beta}}{\partial x^{\nu}} + \frac{\partial g_{\nu\beta}}{\partial x^{\mu}} + \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\beta}} \right)$$

g is the Lorentz Metric, a 4x4 diagonal matrix in space, time, and mass distribution

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

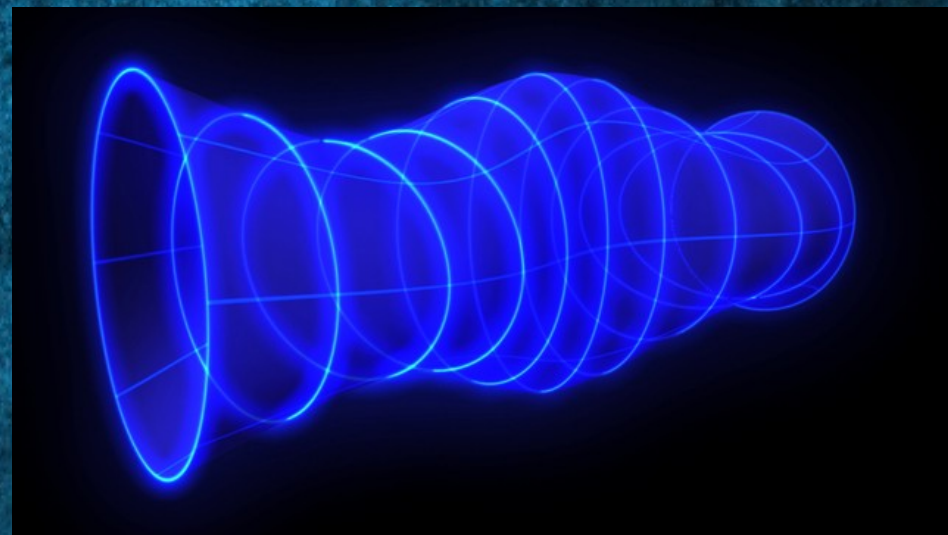
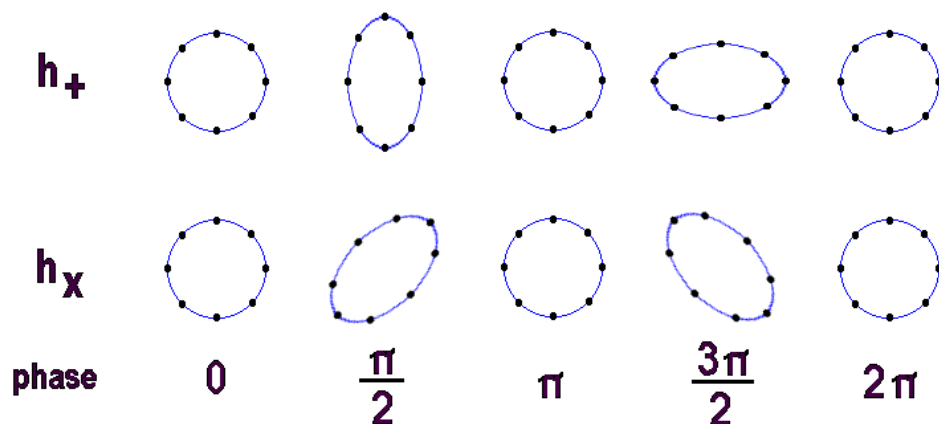
$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\left(1 - \frac{r_s}{r}\right)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

Teoria da Relatividade

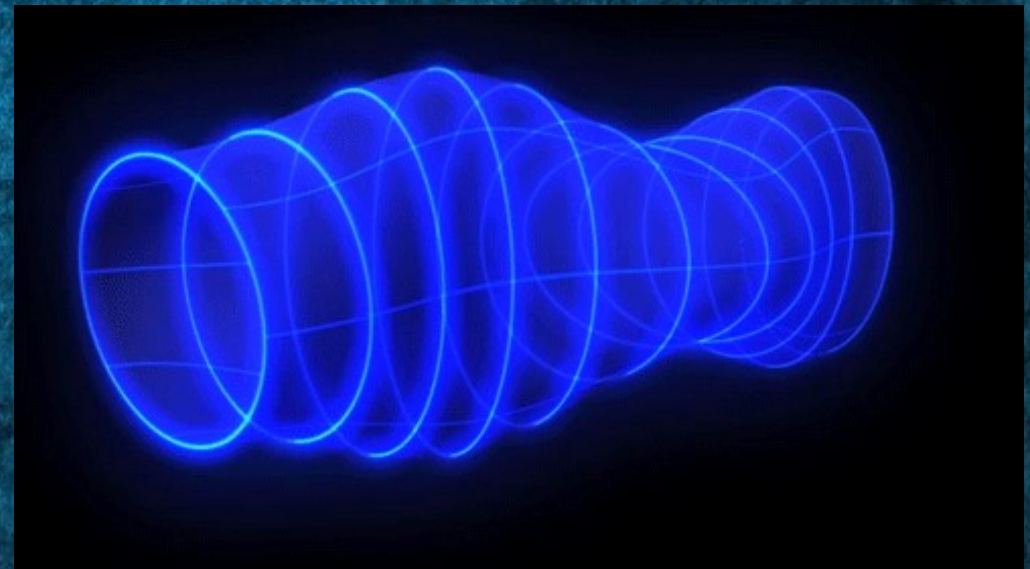
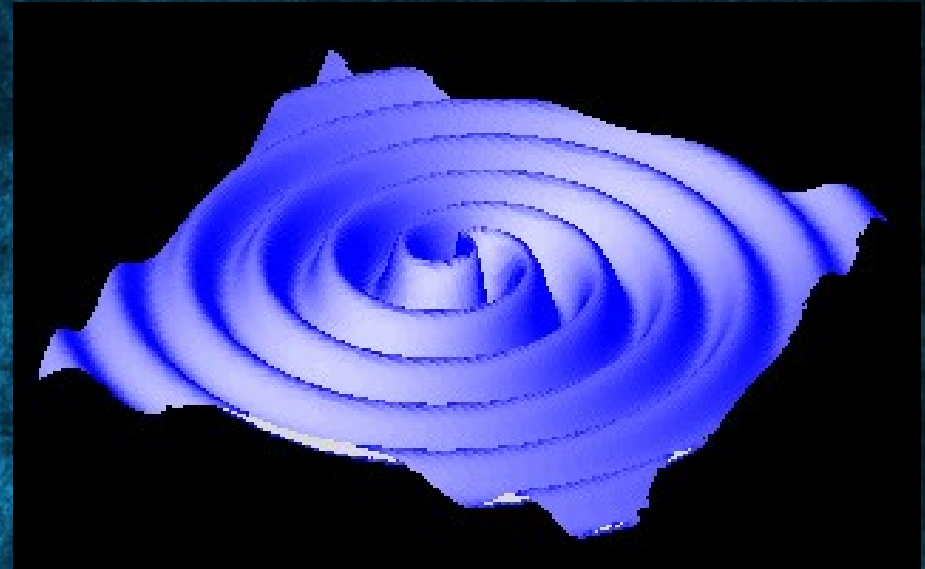
- 1916 – Einstein prevê que as perturbações gravitacionais no espaço-tempo podem se propagar com a velocidade da luz; são as chamadas ***“Ondas Gravitacionais”***

$$g_{\alpha\beta}(t,z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1+f(t-z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-f(t-z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad f(t-z) = a \sin(w*(t-z))$$

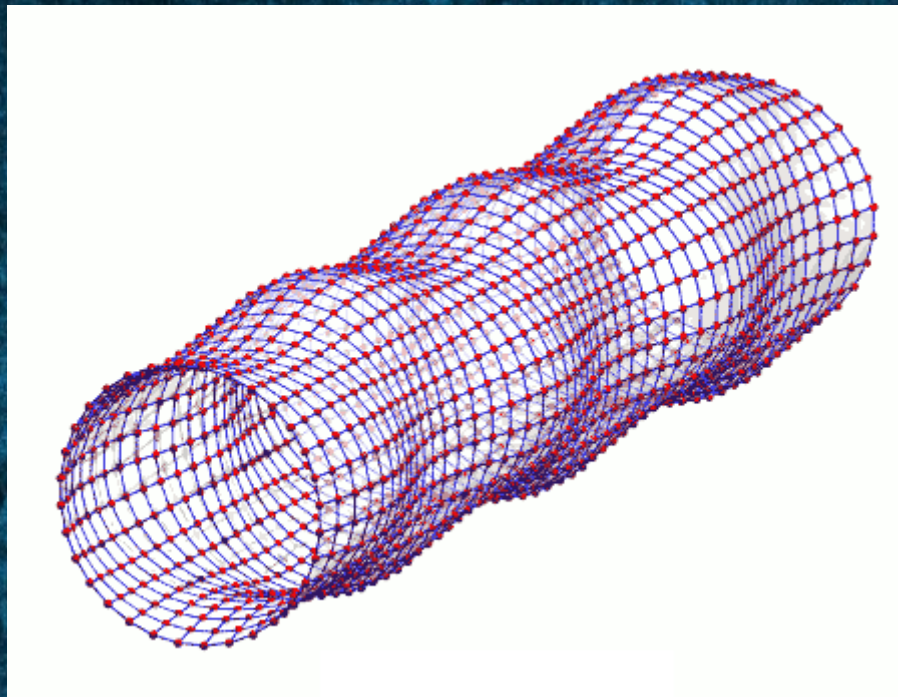


Ondas Gravitacionais

- Representações:
- No R^2 (bidimensional)
- No R^3 (tridimensional)



Ondas Gravitacionais

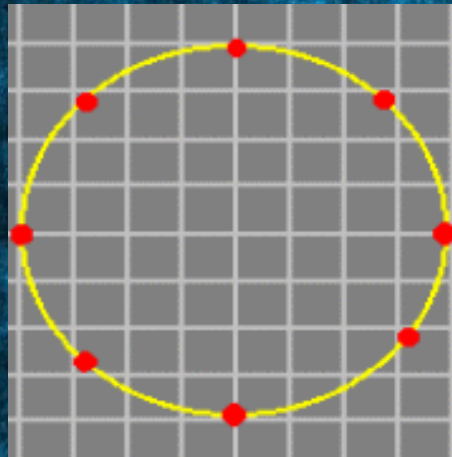
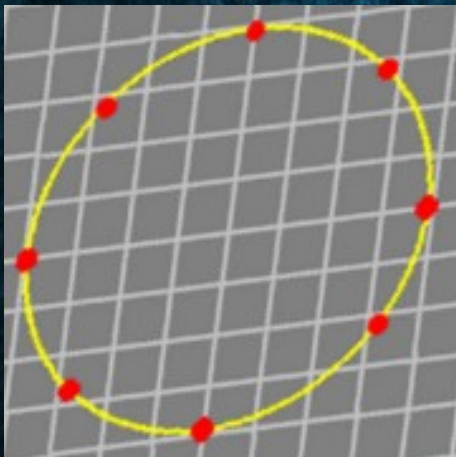


Ondas Gravitacionais

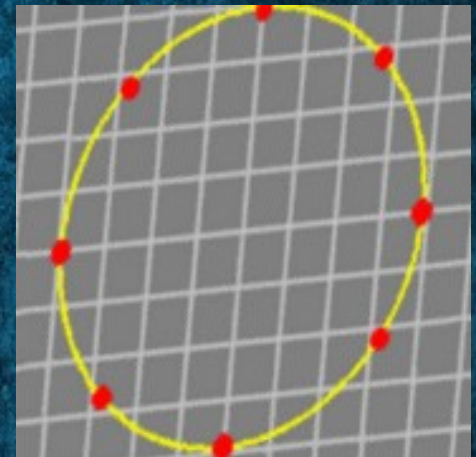
Polarização de ondas gravitacionais:

+ (plus)

X (cross)



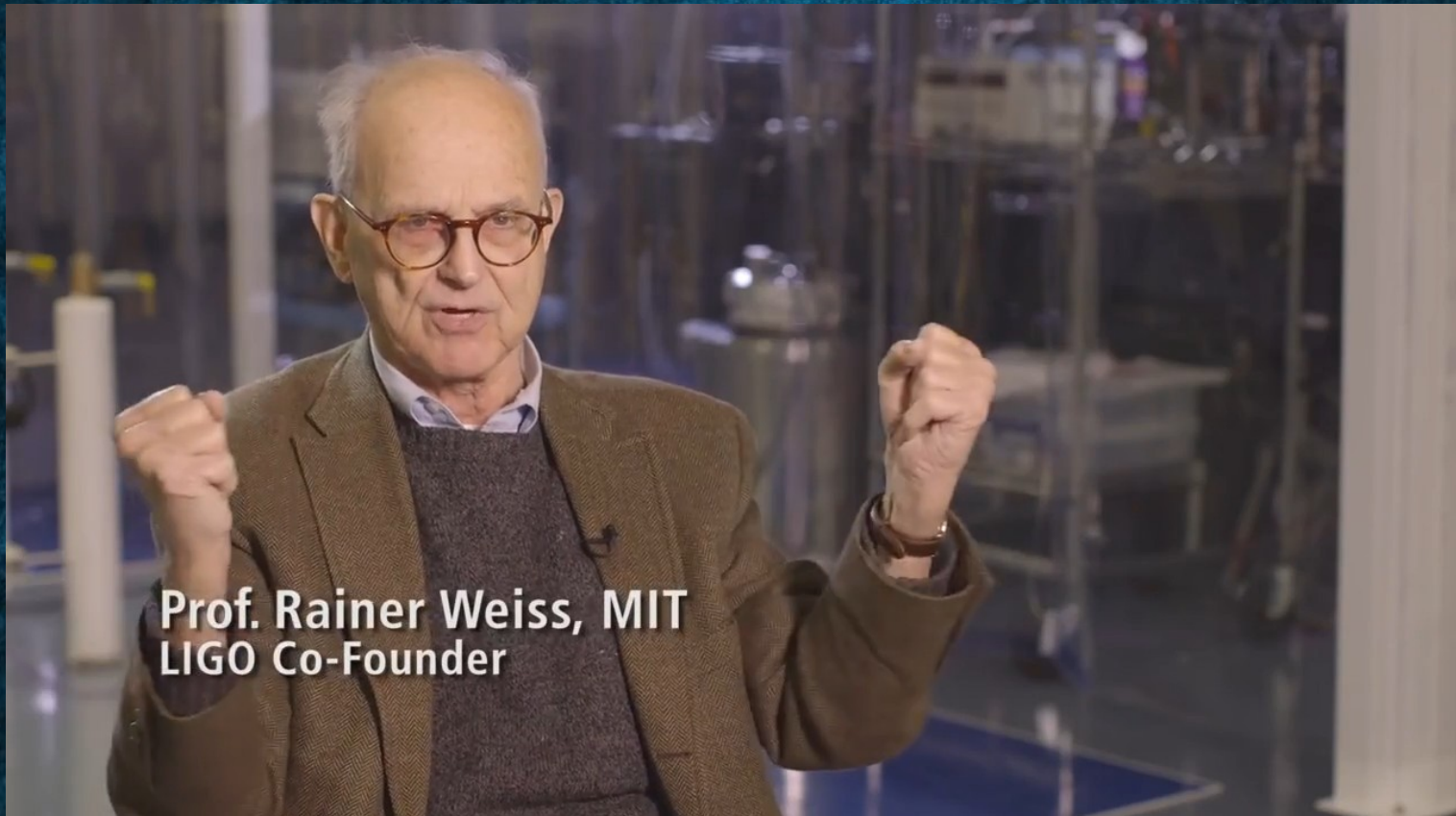
O (circular)



Ondas Gravitacionais

(Como detectar?)

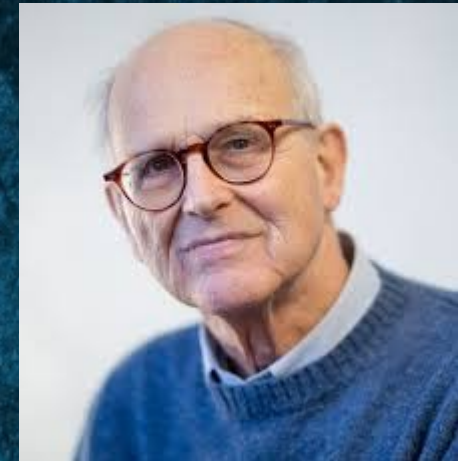
- Video: <https://www.youtube.com/watch?v=B4XzLDM3Py8>



Prof. Rainer Weiss, MIT
LIGO Co-Founder

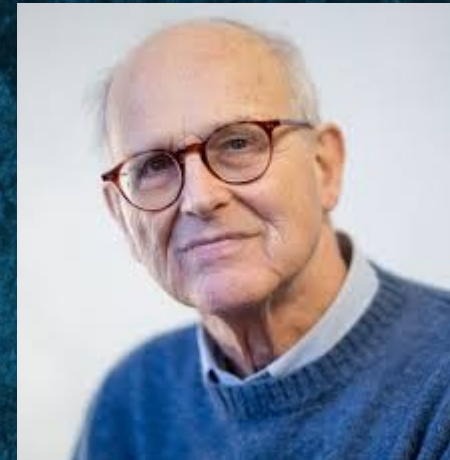
Observatório LIGO

- LIGO = Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
- 1967 – Proposta de construção por Rainer Weiss
- 1968 – Kip Thorne em trabalhos teóricos discute viabilidade de detecção de ondas gravitacionais
- Diversos outros pesquisadores iniciam tentativas mas não havia tecnologia suficiente na década de 1970
- 1980 – Paul Linsay, Peter Saulson e Rainer Weiss (MIT e Caltech) fazem primeiros protótipos mostrando possibilidade de construção de laser na escala de km
- 1988 – Criação do observatório LIGO, com financiamento de NSF e parceiros do MIT, Caltech, Garching (Alemanha), Glasgow (Escócia)



Observatório LIGO

- 1988-1994 – Verba esporádica, troca de diretores, diversas dificuldades
- 1995 – Nova fase, projeto melhorado, início da construção dos Laboratórios em Livingston (Louisiana) e Hanford (Washington), desenvolvimento de novas tecnologia
- 1997 – Final da construção dos Laboratórios, Criação das instituições organizacionais LIGO Laboratory e LIGO Science Collaboration
- 2002-2010 – Nenhuma detecção
- 2004 – Lançamento do projeto de ampliação para o AdvancedLIGO aumentou capacidade de detecção
- Nergis Mavalvala e Mathew Evans



Observatório LIGO



- Set/2015 – Já haviam sido gastos mais de US\$600mi
- Previsão de início de operações do AdvancedLIGO: 18/09/2015
- No dia 14/09/2015 detectaram um sinal, durante o período preparatório na realização de testes. BANG!!!
- No início de 2016 a notícia começou a circular entre fóruns, blogs e e-mails de pesquisadores em Astronomia
- Em 11/02/2016 é anunciado um press release para divulgação da notícia: detectamos ondas gravitacionais!!

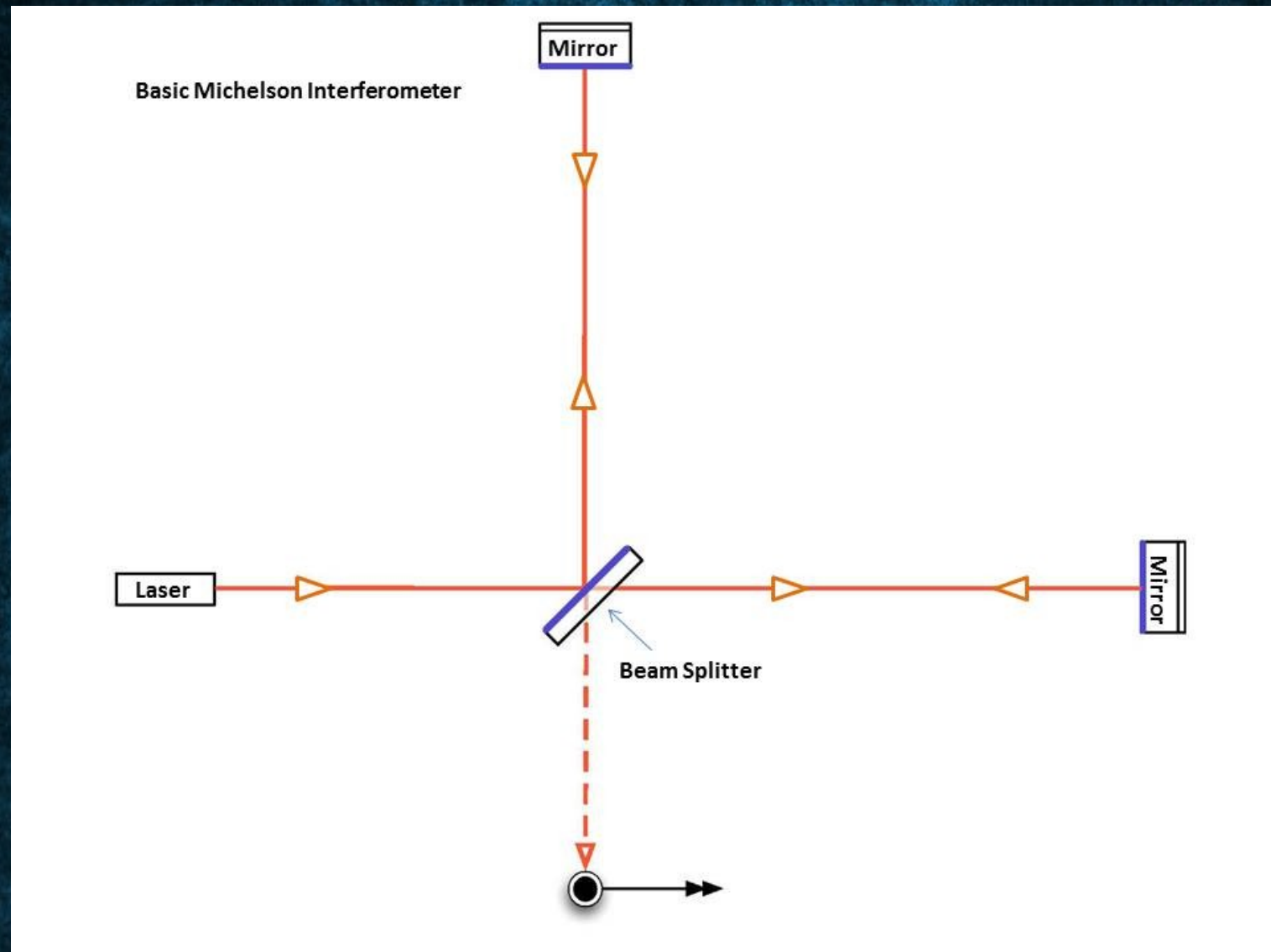
Hanford



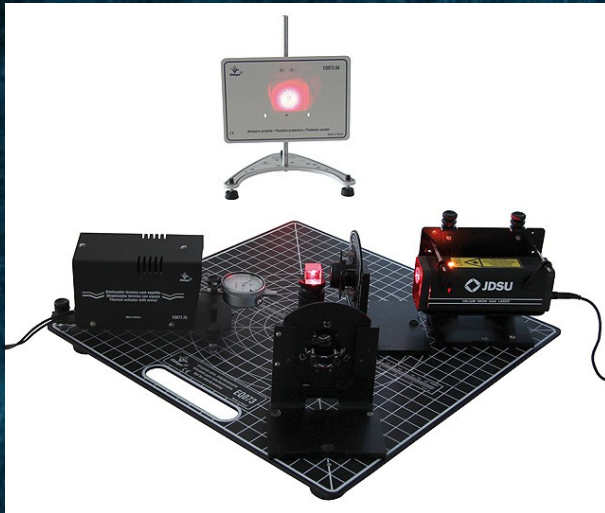
Livingston



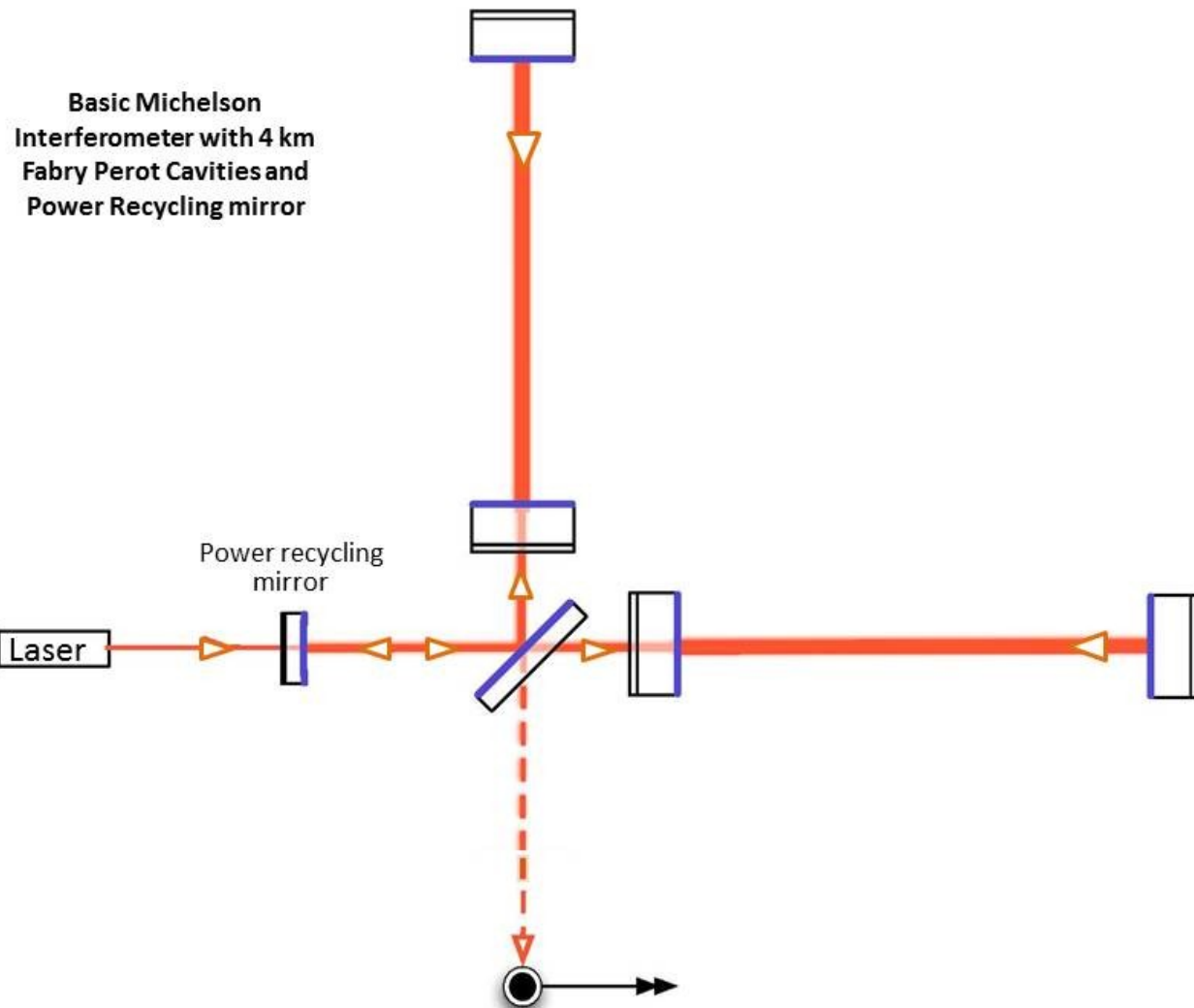
Observatório LIGO



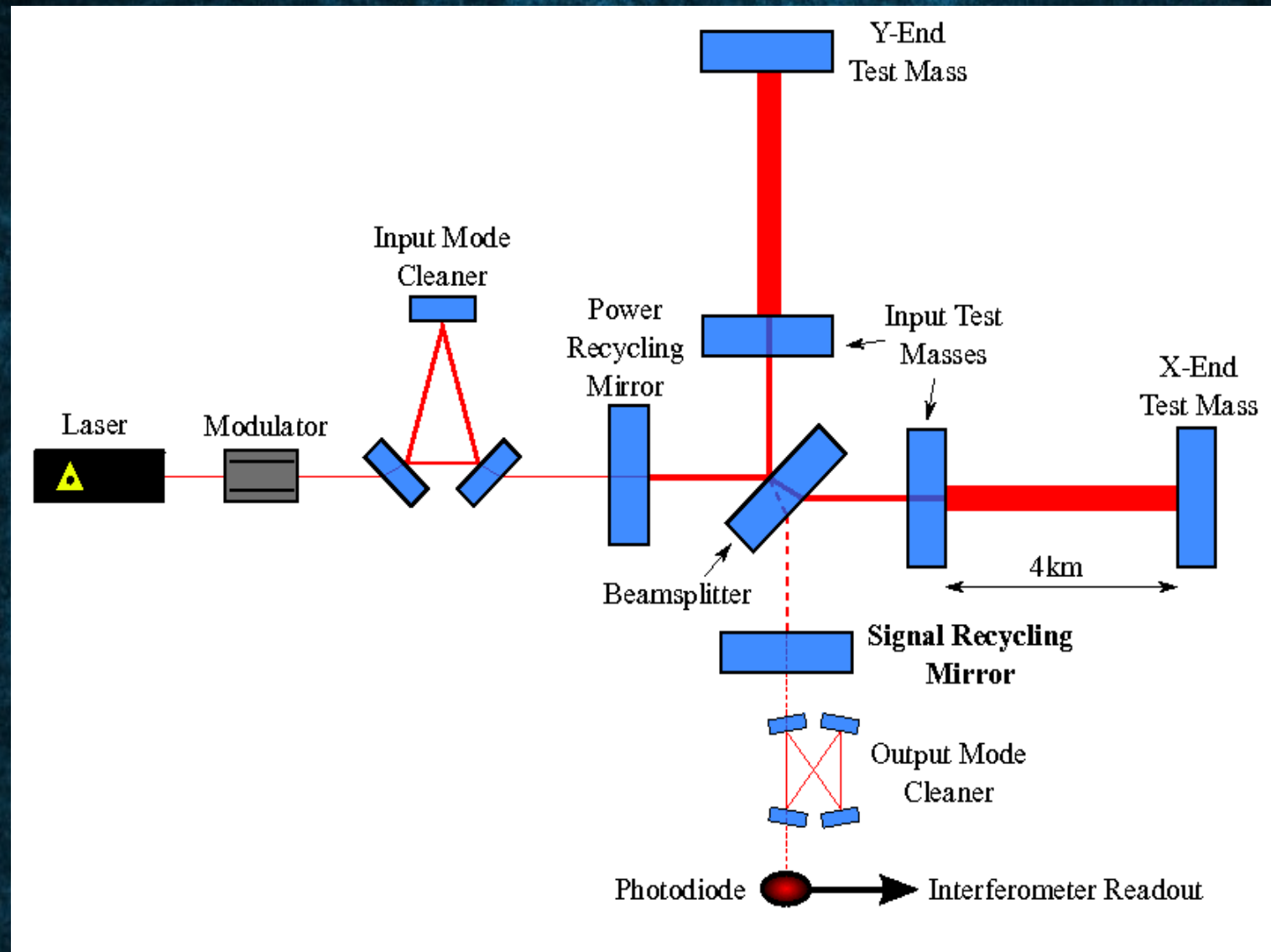
(Figuras de Interferência)



Observatório LIGO

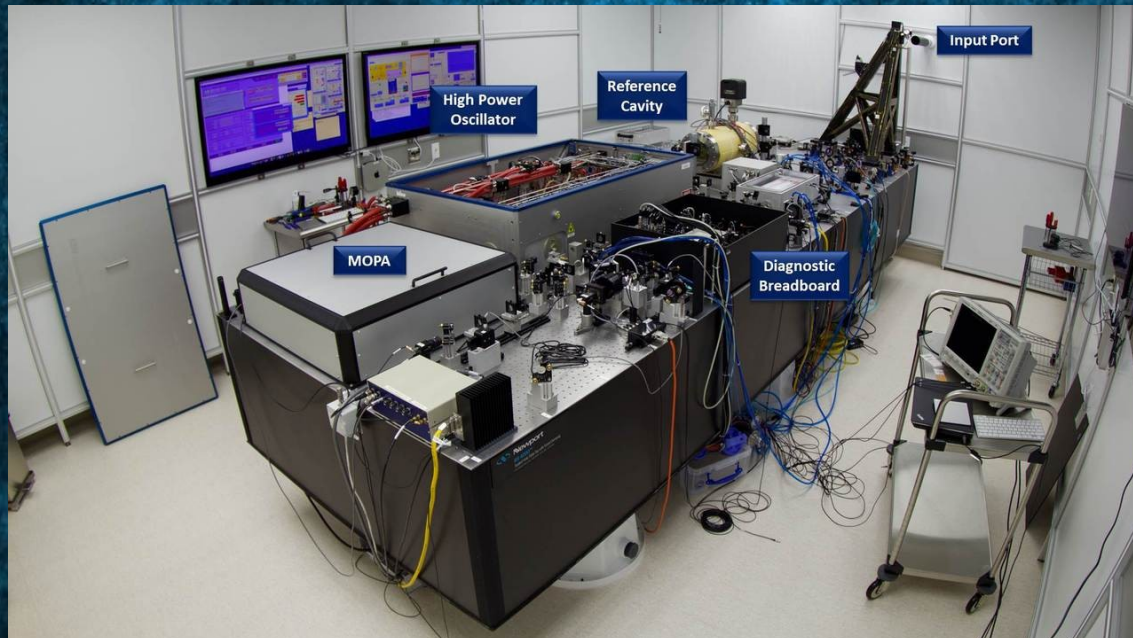


Observatório LIGO



Observatório LIGO

- Laser 1064nm
- Potência (4W $\rightarrow$ 200W) $\rightarrow$ 750kW (Fabry-Perrot)
- 4W = 800x mais potente que laser de mão (ponteiro)



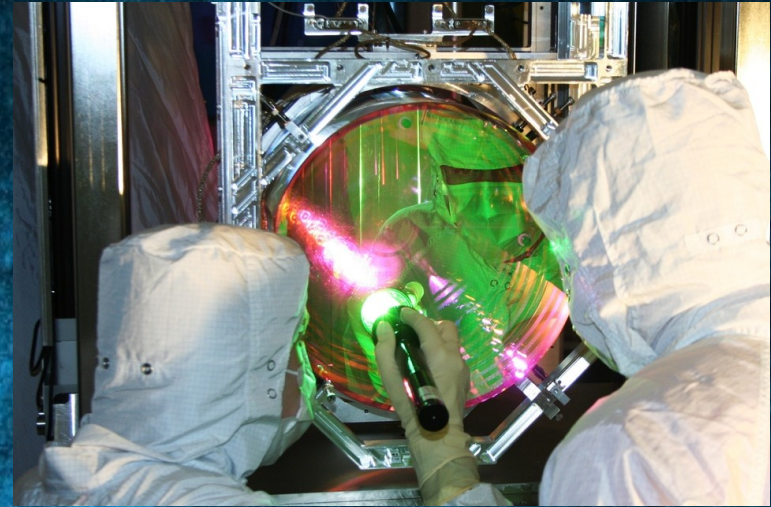
Observatório LIGO

- Tubos de 3mm de espessura de puro aço com 1,2m de diâmetro
- Vácuo: 10^{-9} torr (10^{-12} atm)
- 40 dias pra bombear todo o ar
- Braços do interferômetro: 4km
- Com as reflexões na câmara de Fabry-Perrot, os feixes laser percorrem 1120km



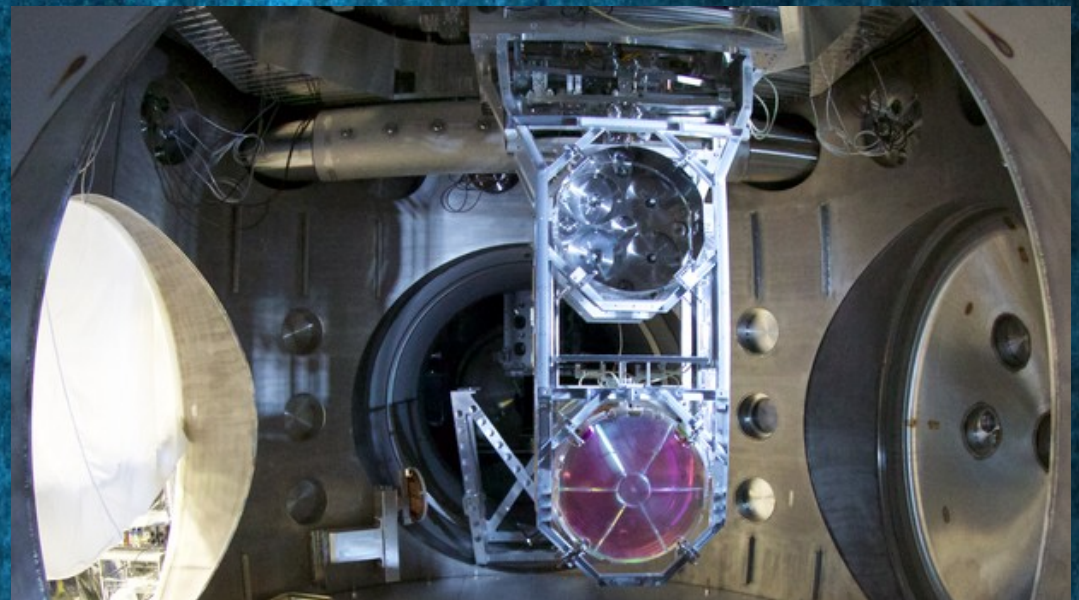
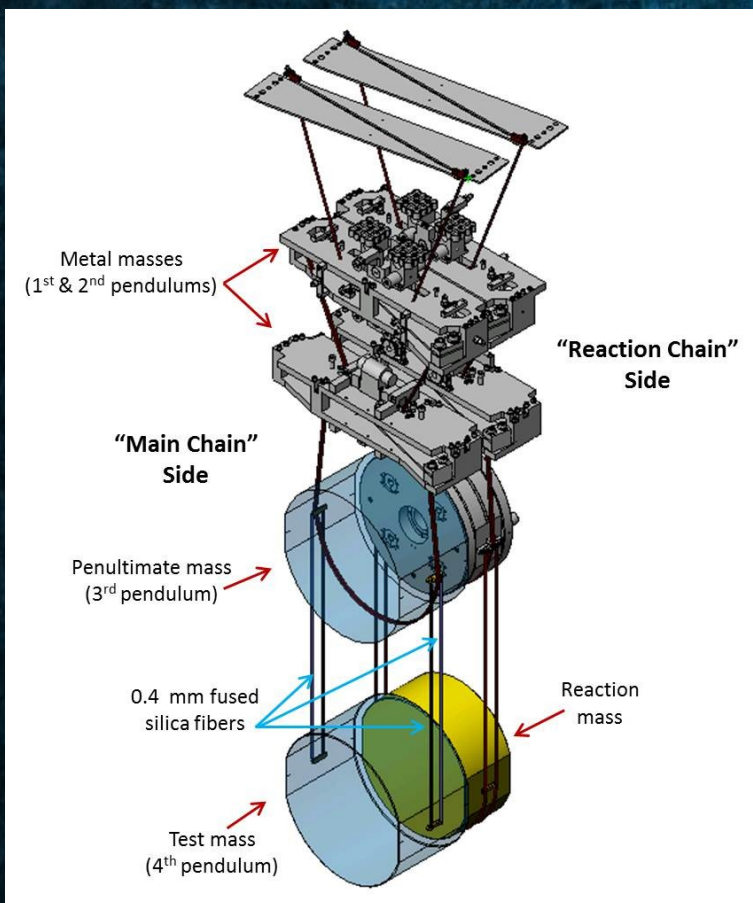
CFOELLM1 VIA WIKIMEDIA COMMONS

Observatório LIGO

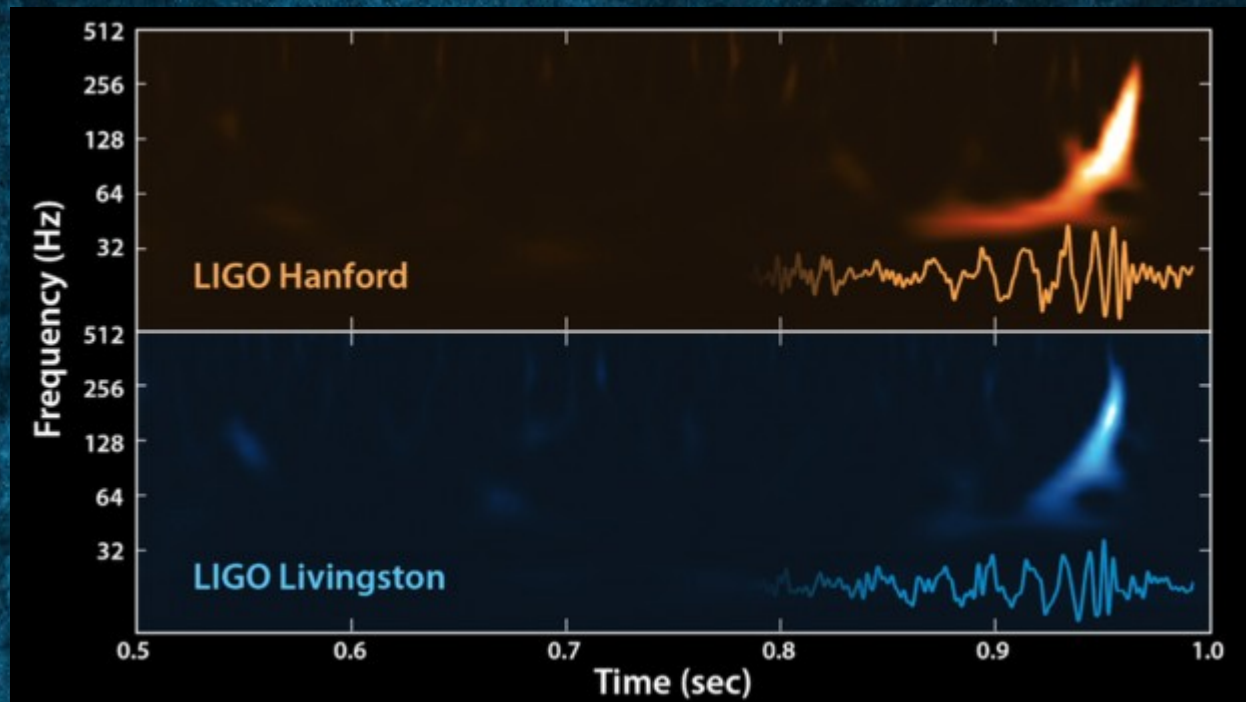
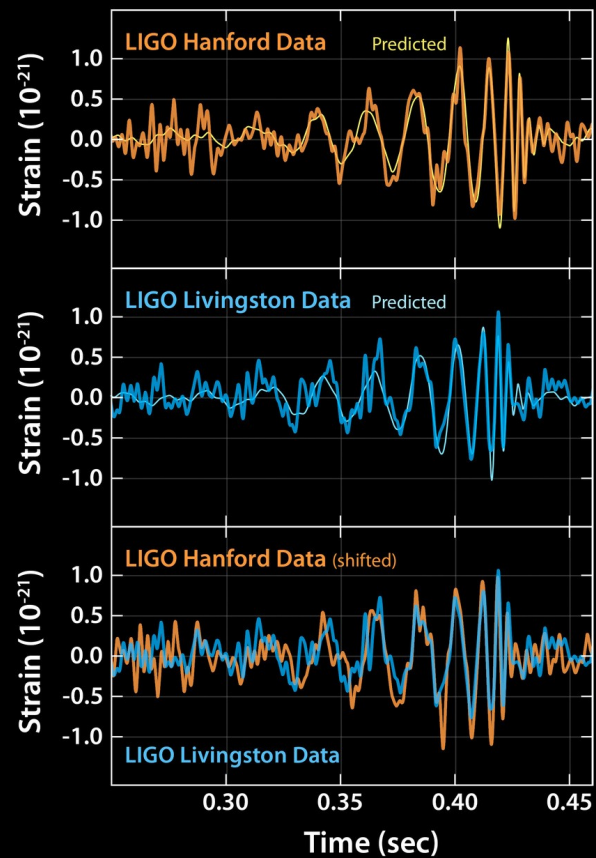


Observatório LIGO

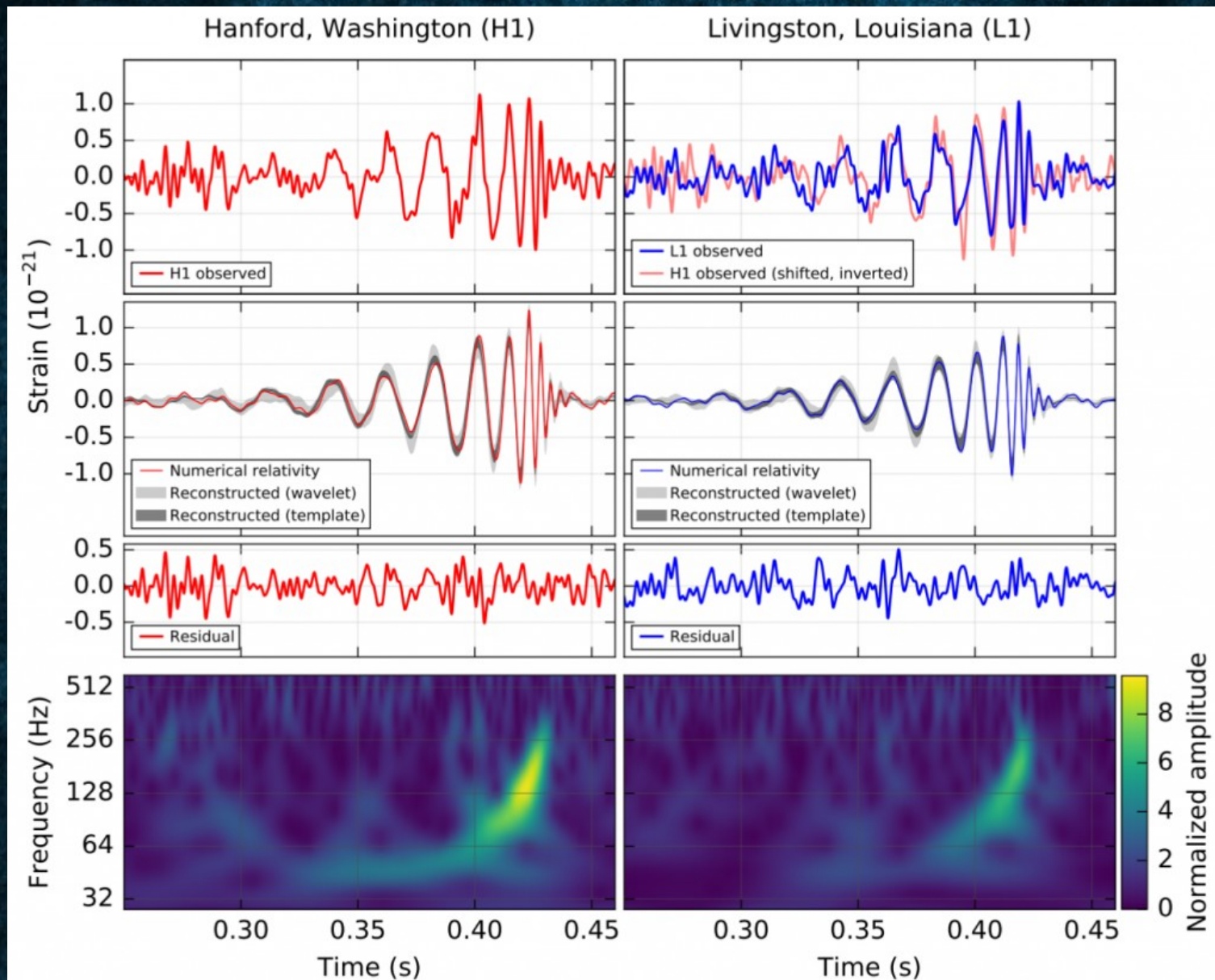
- Os espelhos não podem oscilar!!
- Precisam medir variações no caminho ótico da ordem de 10^{-19}m (10.000 menor que um átomo)
- Sistema de resfriamento do espelho



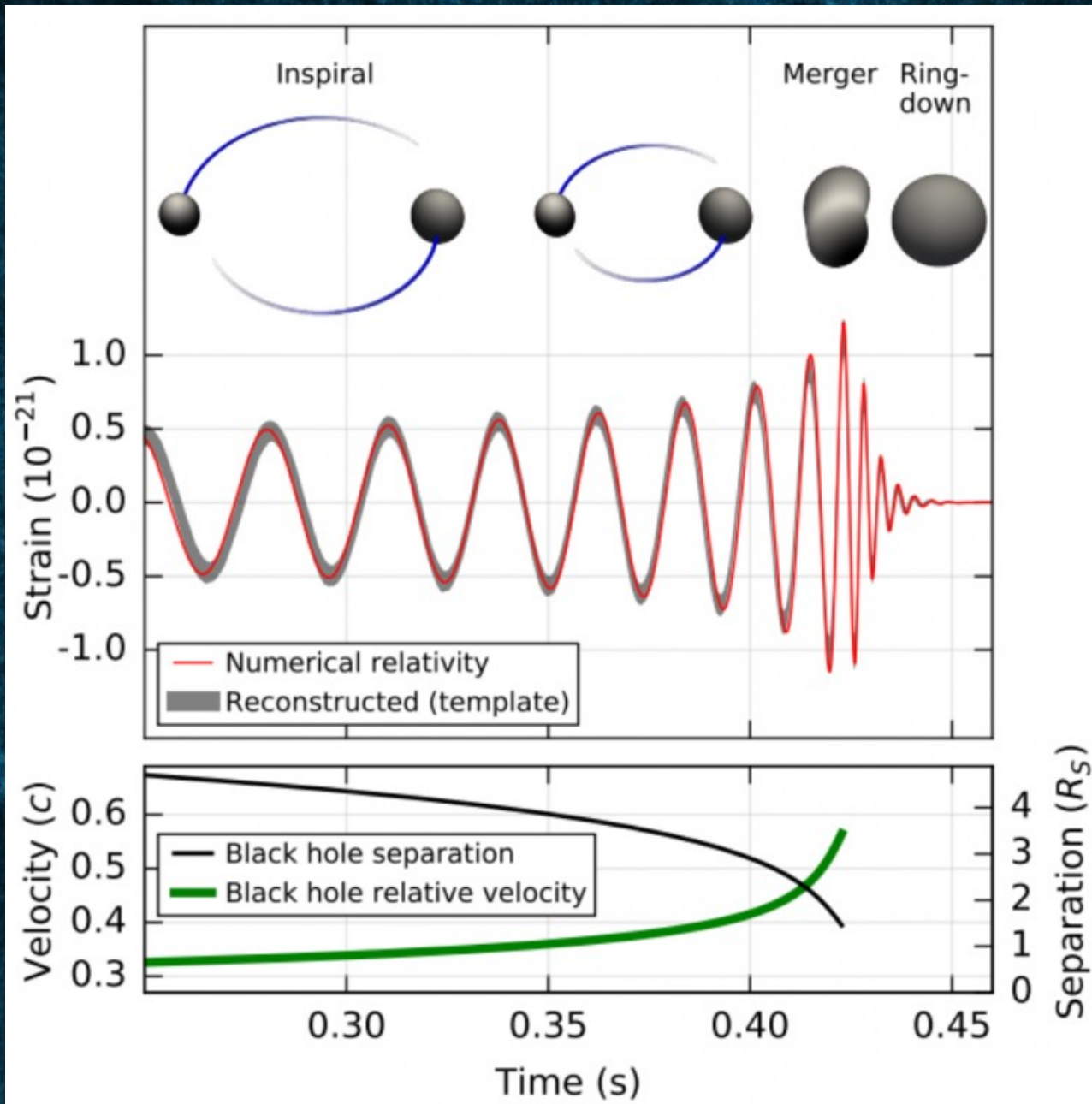
Dados Observacionais



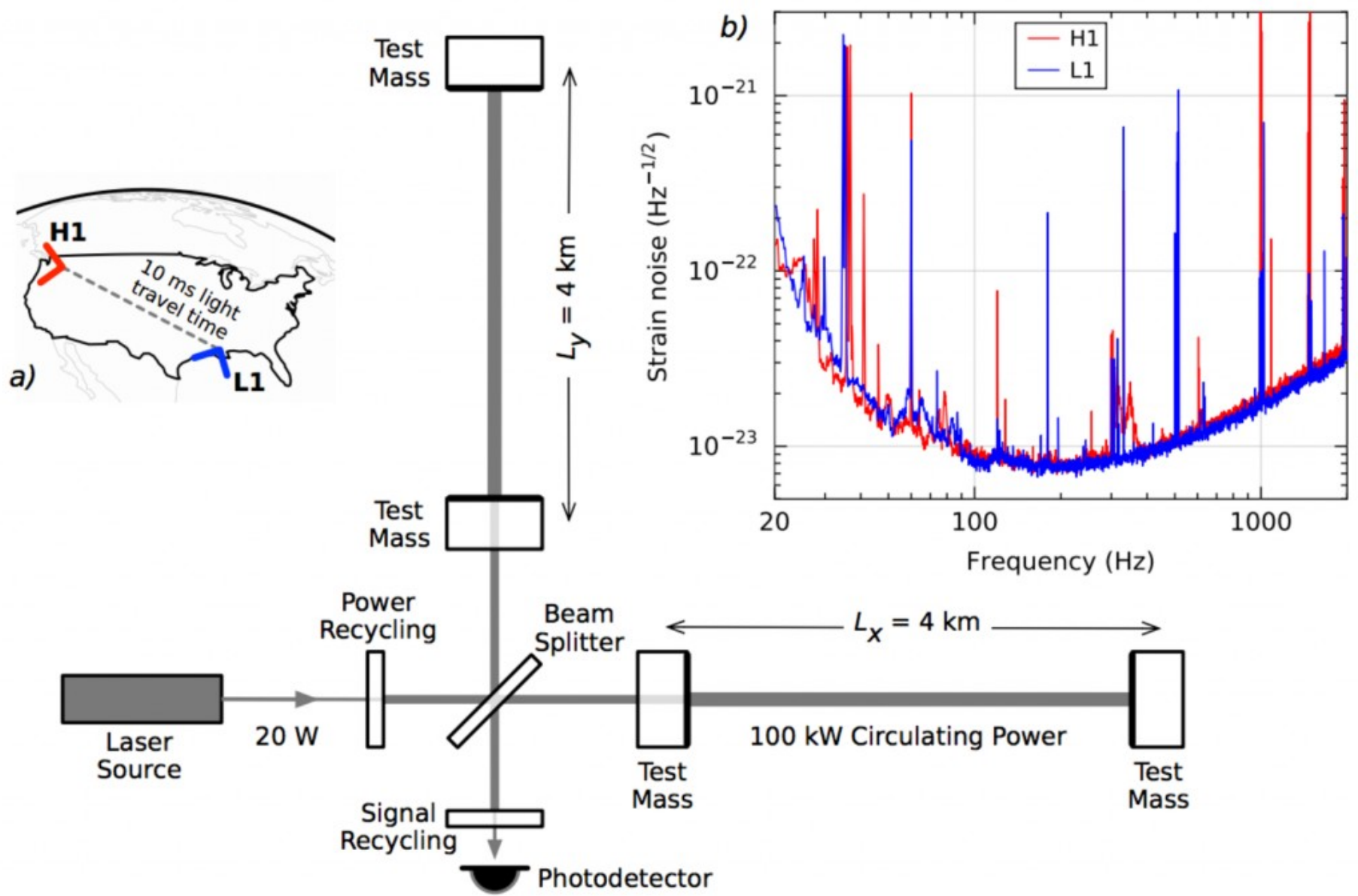
Dados Observacionais



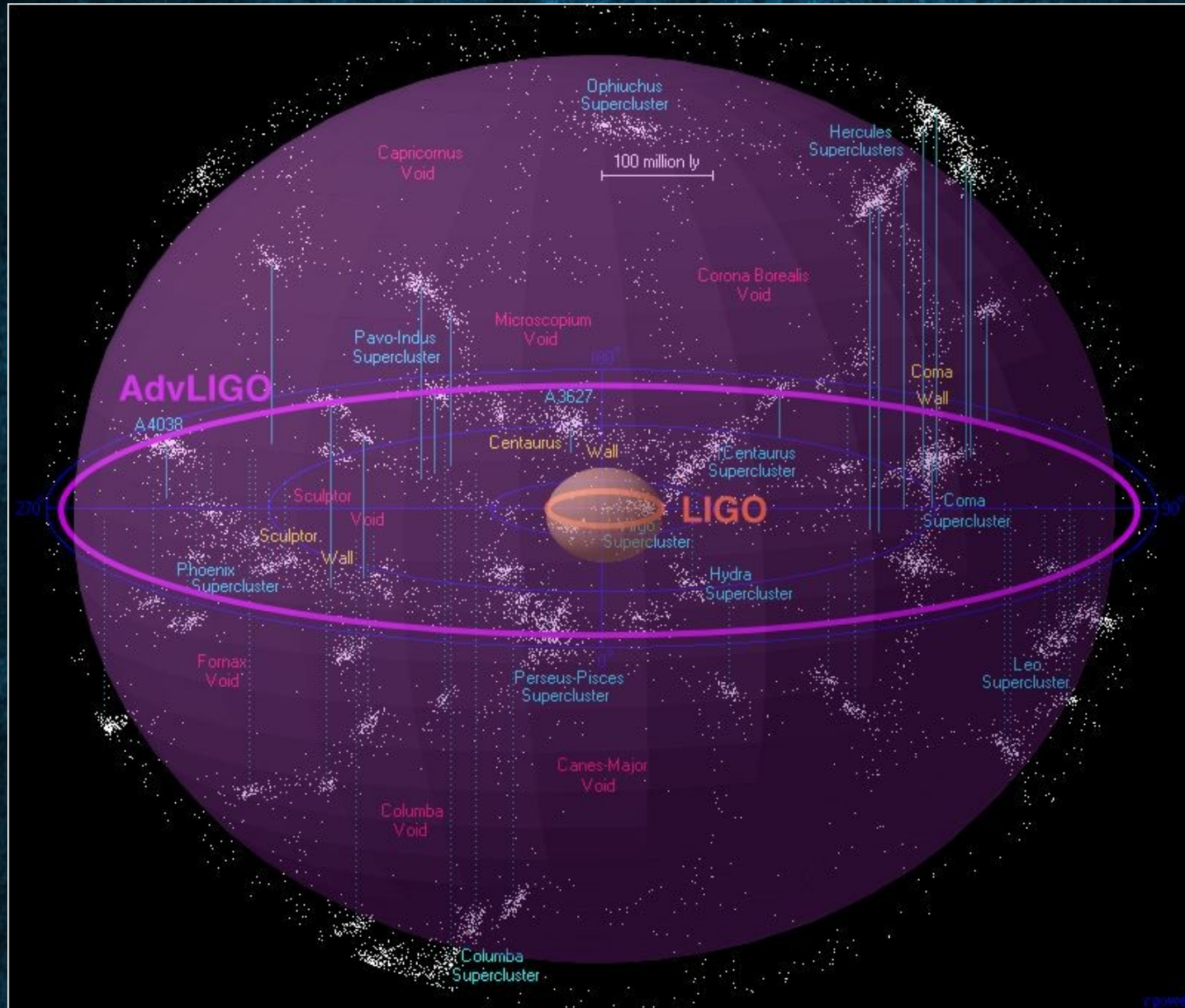
Dados Observacionais



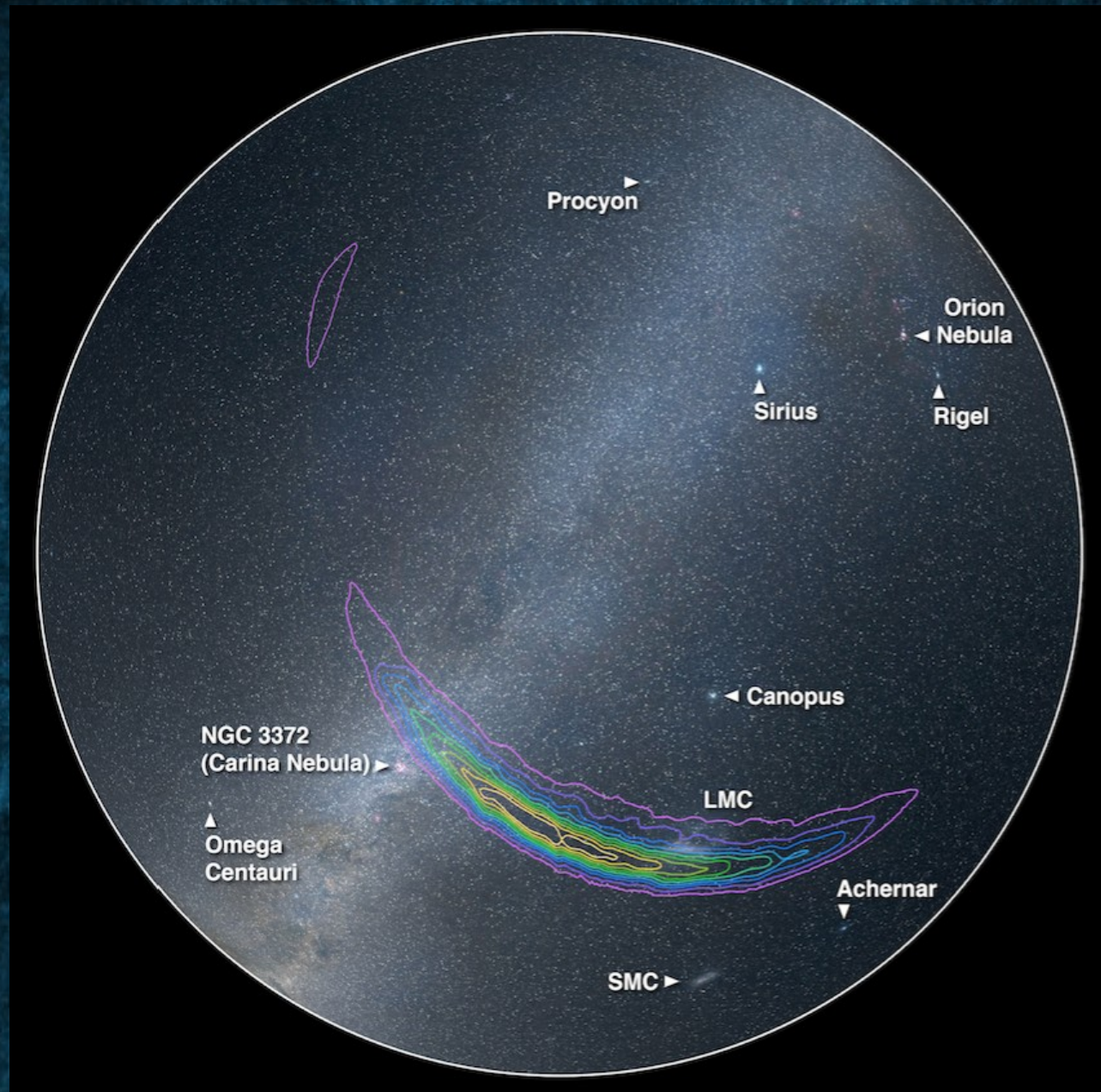
Dados Observacionais



Dados Observacionais



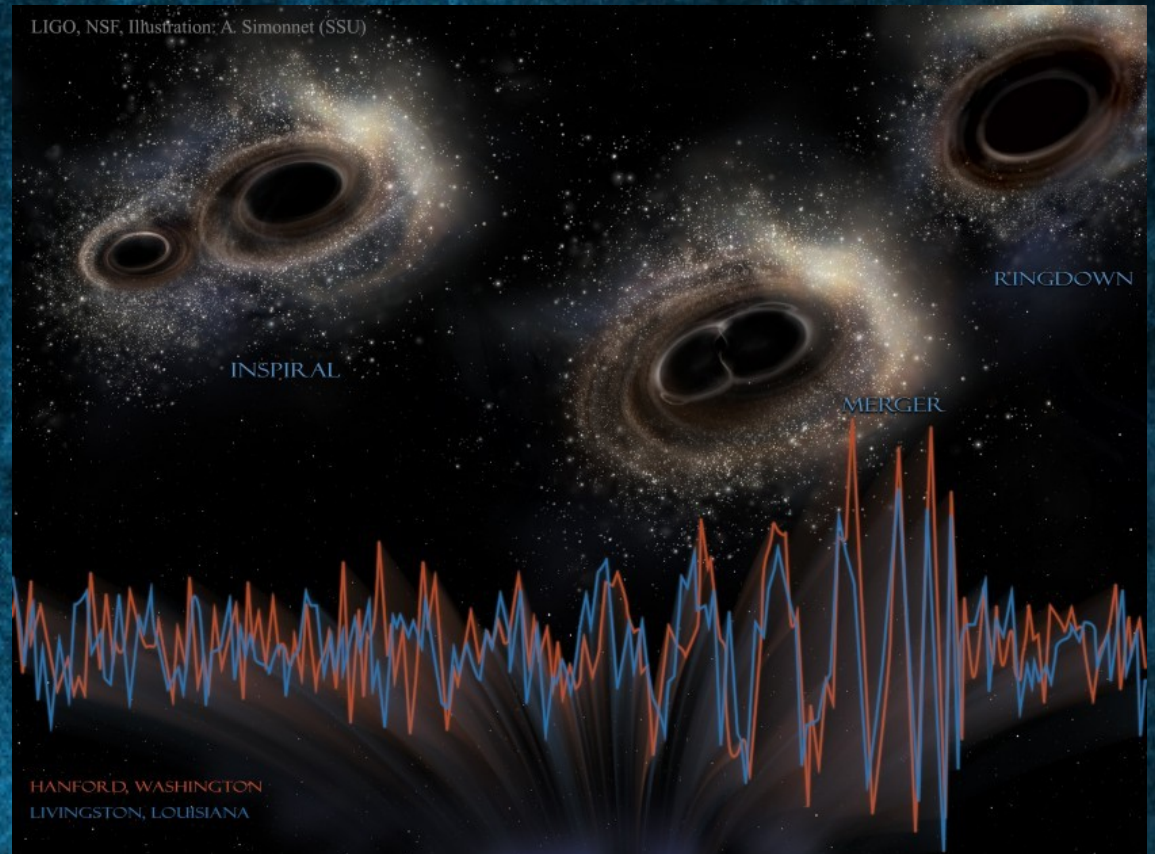
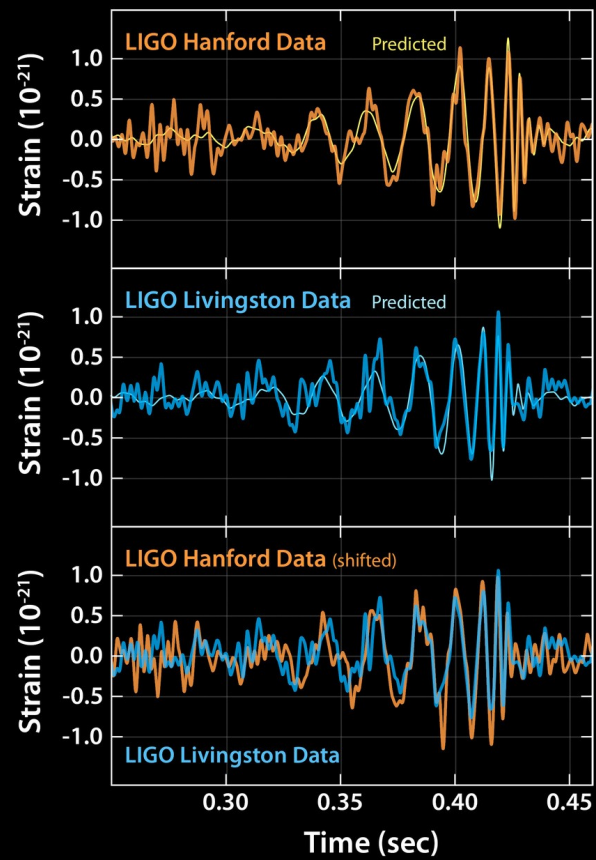
Dados Observacionais



Resultados

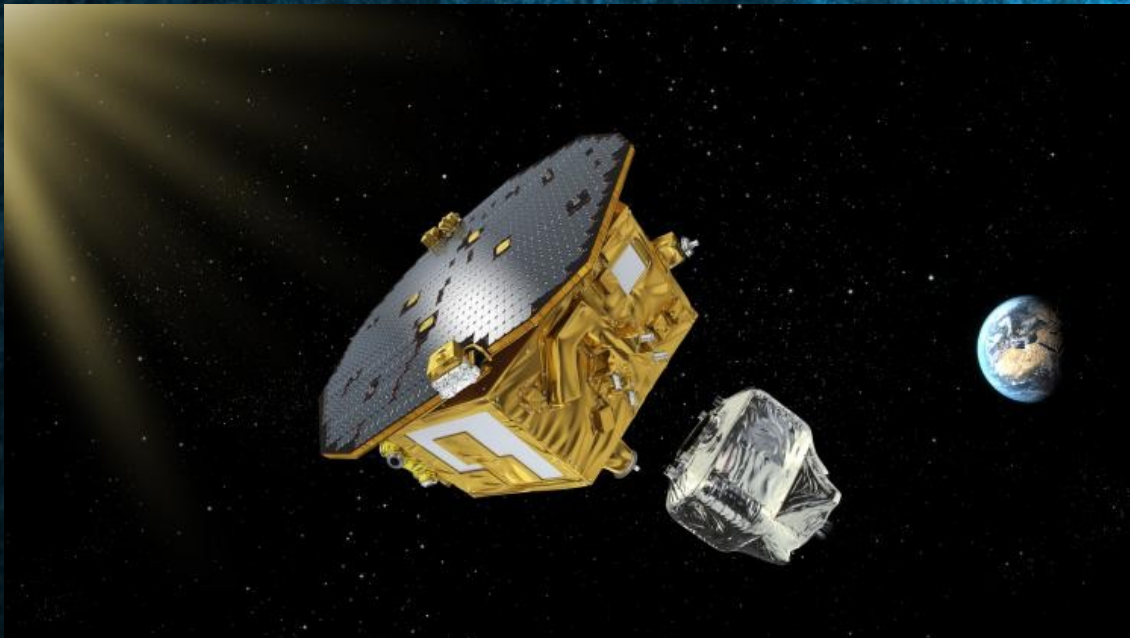
- Após análises e simulações computacionais (Cadeias de Markov com Monte Carlo com técnicas de estatística bayesiana) concluiu-se que:
 - Ondas emitidas por 2 Buracos Negros binários em movimento espiral **[VIDEO: What are GWs?]**
 - Massas dos BHs originais: $36 M_{\odot}$ e $29 M_{\odot}$
 - Massa do BH final: $62 M_{\odot}$
 - Onde foi parar $3 M_{\odot}$ restantes???
 - Emitidas na forma de Ondas Gravitacionais!!!
- Probabilidade de ser mero ruído: $< 1/203.000$
- Redshift da fonte: $z \sim 0.09$ ($1,3 \times 10^9$ de anos atrás ou 1,3 Bi anos)
- Probabilidade de ocorrência: 6-400 eventos / Gpc / ano
- $1 \text{ Gpc} = 10^9 \text{ pc} = 3,26 \times 10^9$ anos-luz (Dist. até Andrômeda = 2,5 Mpc)

Dados Observacionais



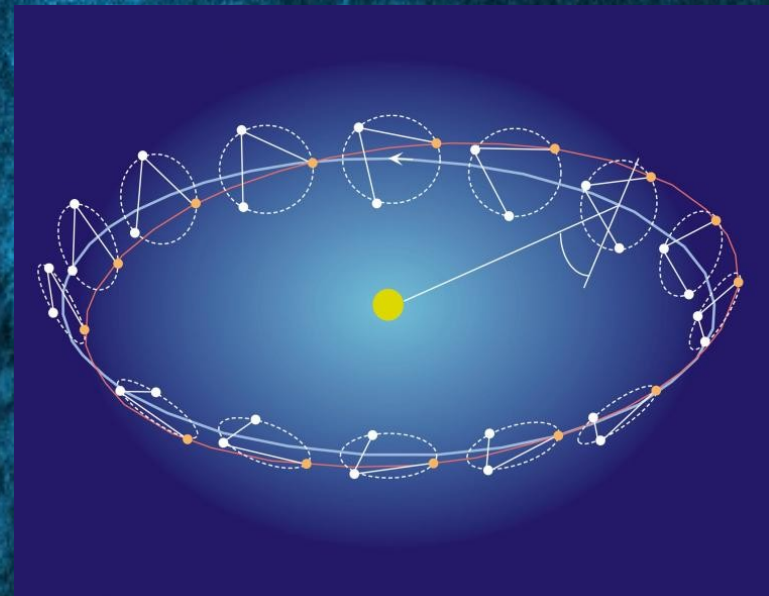
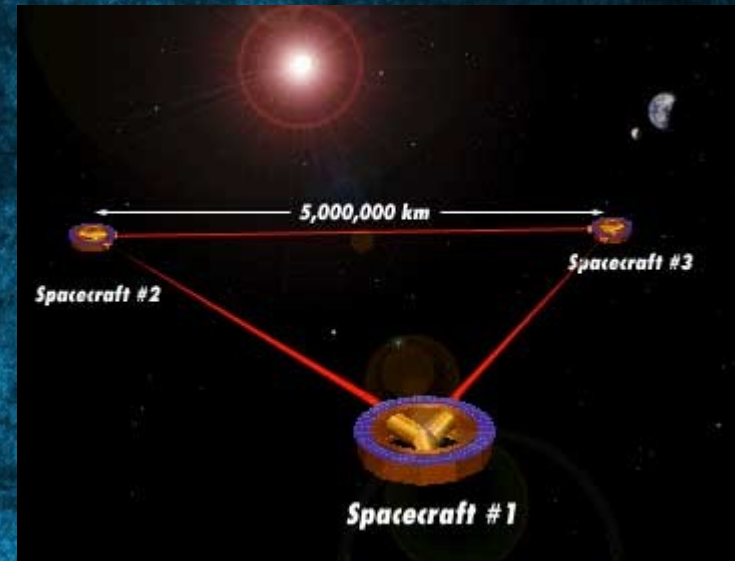
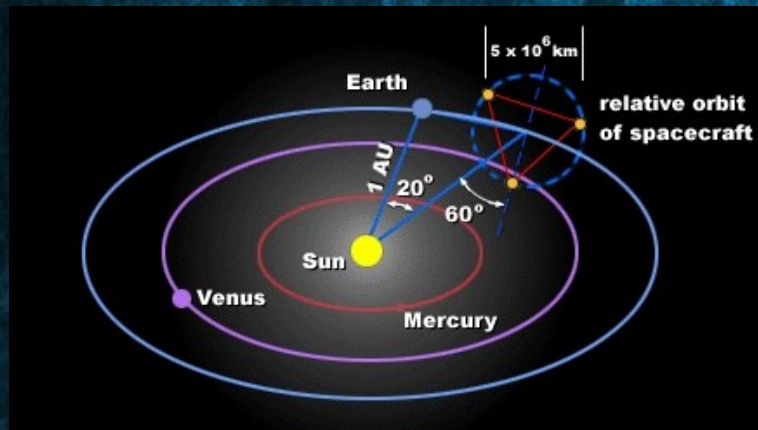
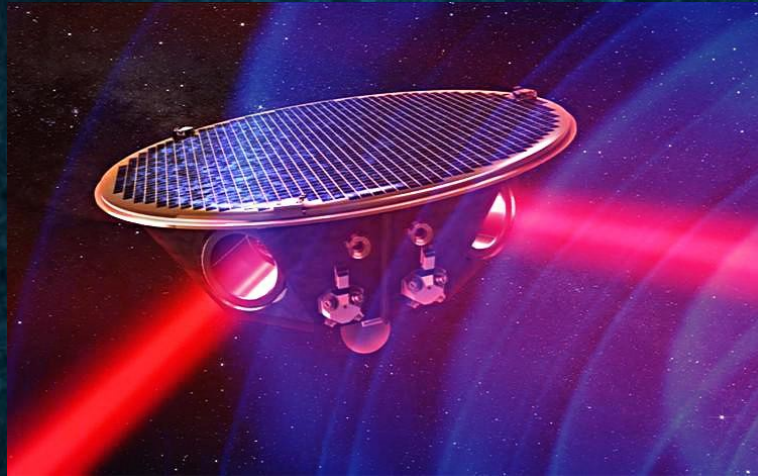
Perspectivas

- Já existem vários outros sinais sendo analisados no Observatório LIGO
- eLISA Pathfinder lançado recentemente



Perspectivas

- eLISA :



Obrigado!!!

- Referências:

- B. P. Abbot et al, Physical Review Letters 116, 061102 (2016)

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

- Blog Astrobites (<http://astrobites.org/>)

- Livros:

- “Gravity, an introduction to Einstein's General Relativity”, James B. Hartle
- “A General Relativity Workbook”, Thomas Moore
- “Gravitation”, Charles W. Misner e Kip S. Thorne

- Johnston Archive (<http://www.johnstonsarchive.net/>)

- Diversos sites, jornais e revistas