



UNIVERSIDADE ESTADUAL
DO SUDOESTE DA BAHIA

III ENCONTRO COM CIÊNCIAS CAMPUS JEQUIÉ ANO 2017

Uma Abordagem sobre Ondas Gravitacionais

Prof. Silvanio Bezerra de Oliveira

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB

Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas - DCET

`silvaniobezerra@uesb.edu.br`

Introdução

- 1916 - Albert Einstein - Teoria da Relatividade Geral (previstas);
- 2015 - Rainer Weiss, Kip Thorne e Barry Barish (primeira detecção direta de ondas gravitacionais);
- "Laser Interferometer Gravitational - Wave Observatory – LIGO" (mobilizou mais de mil cientistas espalhados por cerca de 100 instituições em 18 países, inclusive o Brasil);
- 2017 - Academia Real de Ciências da Suécia decidiu conceder o Prêmio Nobel em Física.

Relatividade Geral

- Tudo se inicia a partir da solução das equações de Einstein para uma distribuição estática de massa a qual se obtém o tensor métrico sem perturbação [1],

$$g_{\mu\nu}^{(0)}.$$

- Quando esta distribuição de massa é ligeiramente perturbada,

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{(0)} + h_{\mu\nu},$$

onde $h_{\mu\nu}$ representa uma pequena correção do campo gravitacional inicial.

- Na ausência de matéria, $g_{\mu\nu}^{(0)}$ é dado pelo tensor de Minkowsky,

$$g_{\mu\nu}^{(0)} = (1, 1, 1, -1).$$

Relatividade Geral

- **A assinatura de um tensor métrico (conhecido como a forma quadrática) é o número de valores próprios positivos e negativos da simétrica.**
- **Isto é, a matriz simétrica correspondente real é diagonalizada, e a entrada diagonal de cada sinal é contado.**
- **A assinatura é dita ser "indefinida" ou "mista" se tanto "p" e "q" são maior ou menor mas não igual a zero.**
- **A métrica Riemanniana é uma métrica com uma assinatura positiva definida.**
- **Uma métrica Lorentziana é uma com assinatura $(p, - 1)$ (ou alguma vezes $(1, - q)$).**

(Fonte: Wikipédia, a enciclopédia livre.)

Relatividade Geral

- Artigos recentes (M. Cattani, 1998, 2009 e 2010) envolvendo o uso da Teoria da Gravitação de Einstein, mostram como obter as equações básicas que prevêm as ondas gravitacionais.
 - Por exemplo, *Gravitational Waves I: Basic Emission Equations*, foi escrito para estudantes de graduação e pós-graduação em Física, cujas deduções das equações são didaticamente simples, mantendo o rigor matemático necessário [3].
 - Essas equações também foram usadas para estimar as intensidades, amplitudes de onda (ou deformação) $h_{\mu\nu}$ da GW geradas por alguns sistemas transmissores [4,5]:
 - Por exemplo, estrelas binárias, pulsações e precessão de estrelas de nêutrons de formadas com quadrupolos oscilantes, barras rotativas e processos cataclísmicos que dão origem a supernovas.

Técnicas de Detecção

Muitas técnicas de detecção diferentes foram propostas para detectar GW [2, 6,7]:

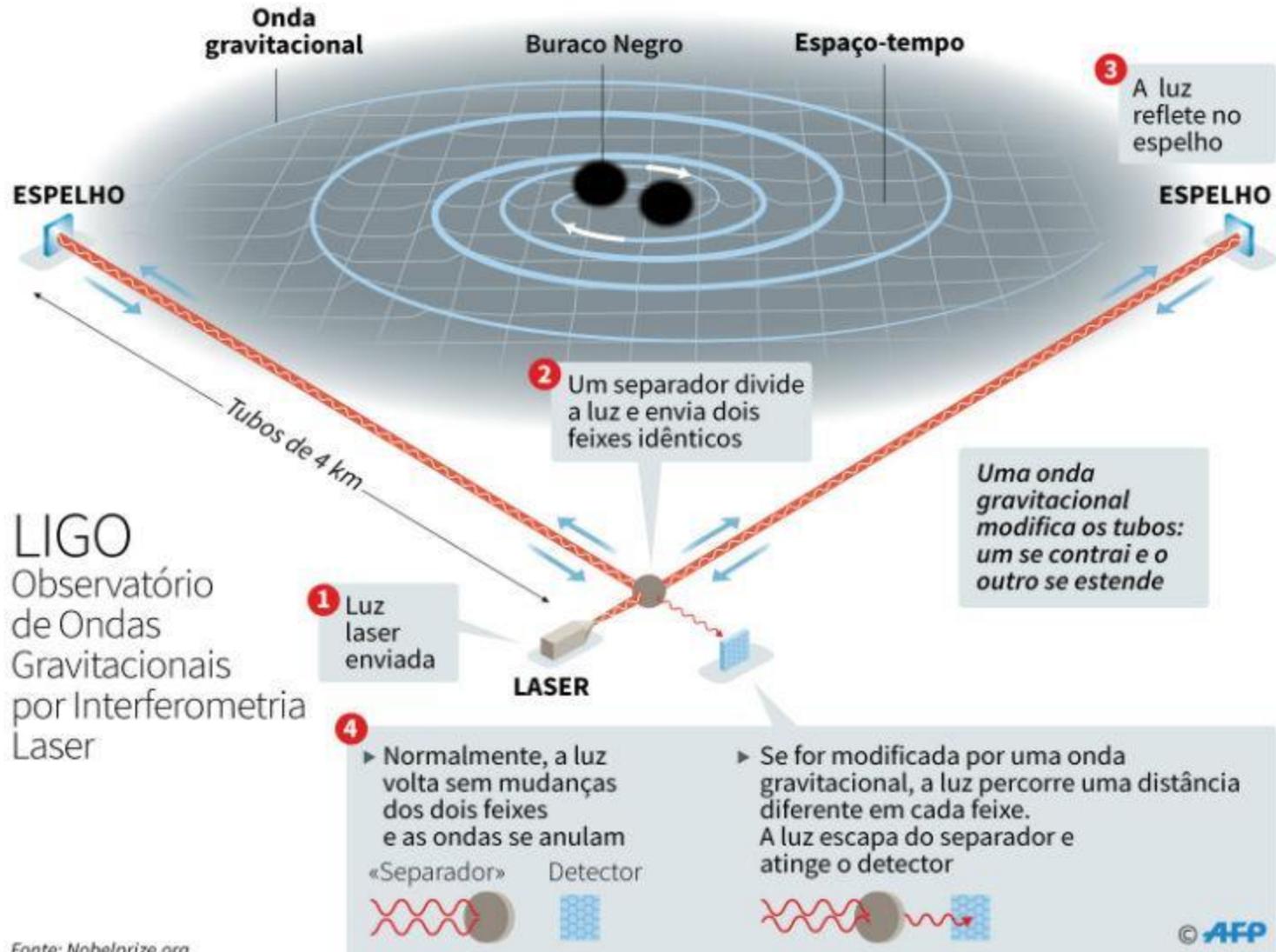
- técnicas interferométricas a laser,
- sólidos ressonantes,
- flutuações na distância entre Terra e Lua,
- oscilações da crosta terrestre,
- modos normais de vibração nos sólidos sob a forma de retângulos, bifurcações e anéis,
- hastes de fiação,
- tubos de fiação com líquidos dentro.

Técnica de Detecção: interferômetro a laser

- Os interferômetros são os sistemas de detecção mais sensíveis: teoricamente são capazes de detectar GW com amplitudes $h \approx 3 \times 10^{-22}$, cerca de 300 vezes menores que as estimativas para outros detectores.
- Além disso, outra vantagem dos interferômetros é que eles podem detectar ondas com qualquer frequência.
- Somente em 1990 chegou à conclusão de que GW poderiam ser detectados com certeza somente por interferômetros [4, 5-7].
- Isso ocorreu apenas após 20 anos de pesquisas intensas com diferentes técnicas nos EUA, Japão, Itália, Austrália, Holanda.
- Os detectores interferométricos foram sugeridos pela primeira vez no início da década de 1960 e na década de 1970 [3-7].

O detector de ondas gravitacionais

Os astrofísicos Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne ganharam o Prêmio Nobel de Física por sua concepção e seus resultados



EGO - Observatório Gravitacional Europeu – localizado próximo de Pisa, na Comuna de Cascina (Itália), encontra-se a Antena Interferométrica VIRGO para a detecção de ondas gravitacionais.



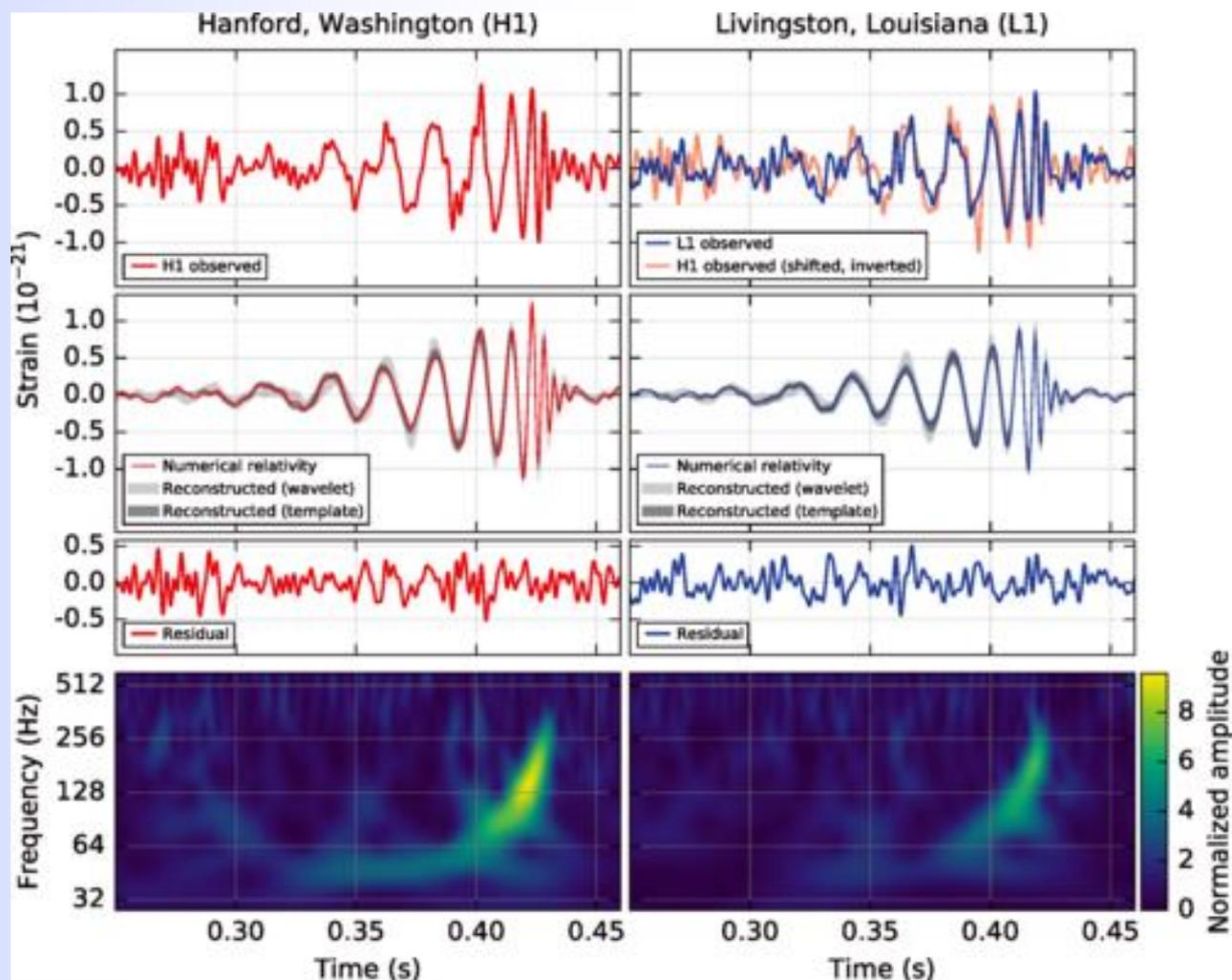
Fonte: <http://www.ego-gw.it/public/about/WhatIs.aspx>

LIGO - Observatório de Ondas Gravitacionais – localizado em Livingston Louisiana - EUA, composto por dois detectores de ondas gravitacionais onde funciona o Centro de Educação Científica para escolas, professores, workshops e aberto para visitação.



Fonte: <https://www.ligo.caltech.edu/LA>

Em 14 de setembro de 2015, uma onda gravitacional foi detectada pela primeira vez em dois detectores localizados em Washington e Louisiana a partir de uma fusão entre dois Buracos Negros.



Fonte: Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger B.P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 – Published 11 February 2016.

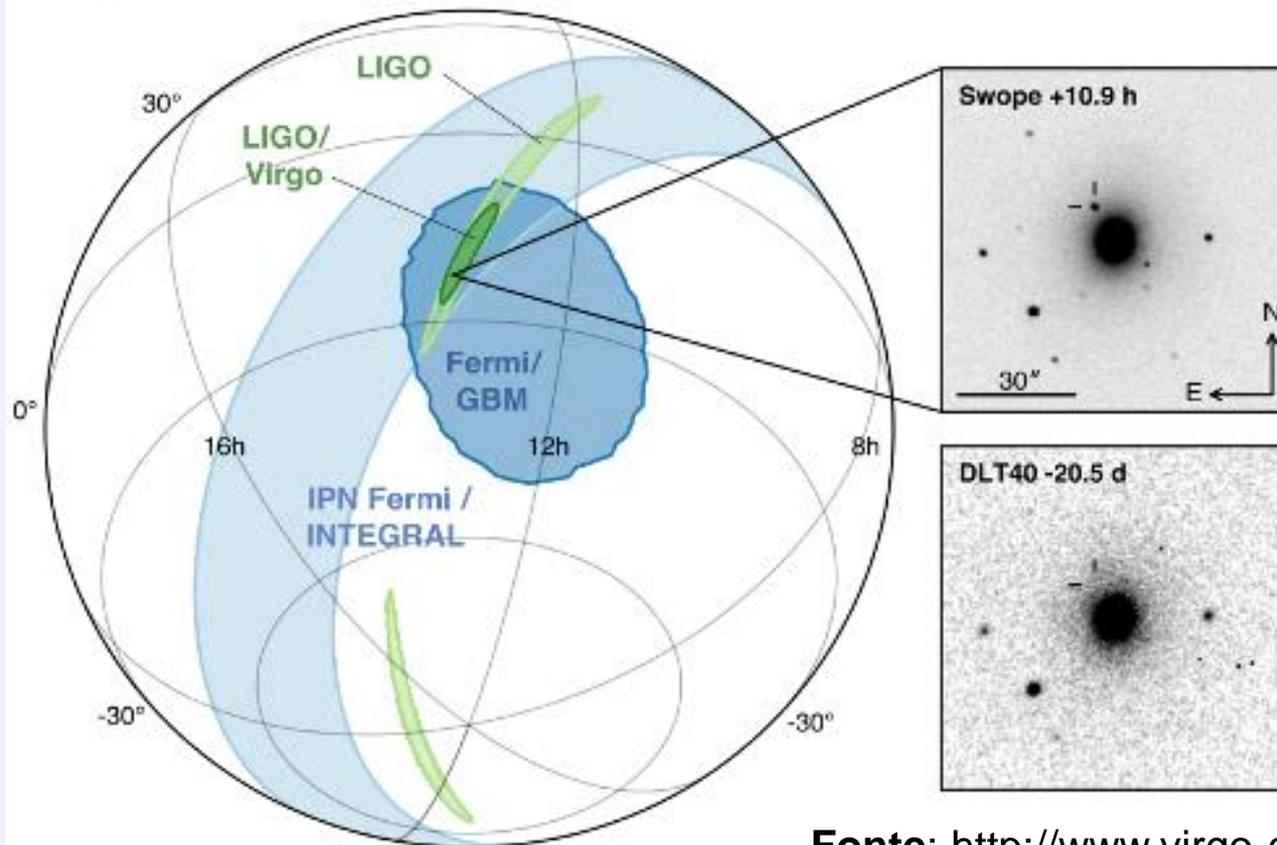
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

Simulação

Técnica de Detecção: interferomêtro a laser (estrelas de nêutron)

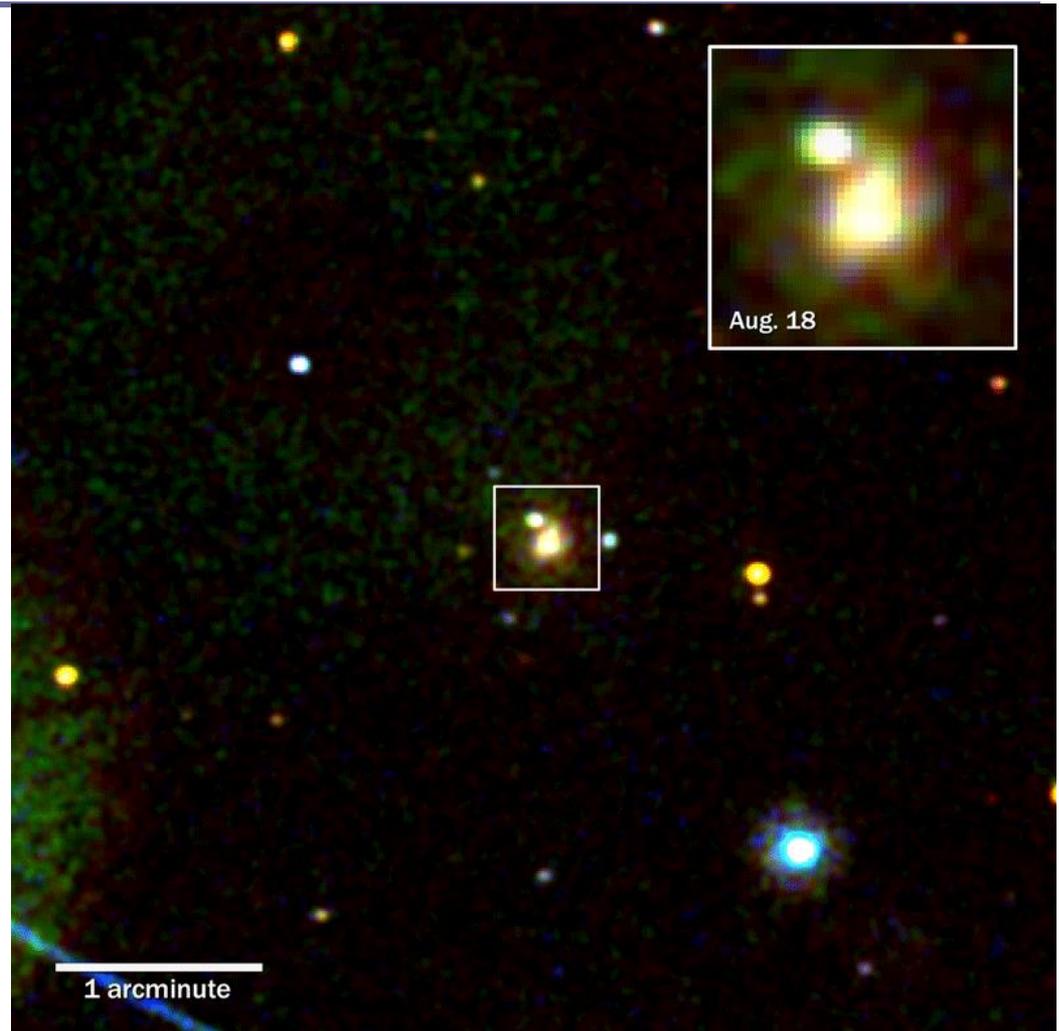
- Outra descoberta marca o primeiro evento cósmico observado nas ondas gravitacionais e na luz.
- Pela primeira vez, os cientistas detectaram diretamente ondas gravitacionais além da luz vinda da colisão entre duas estrelas de nêutrons.
- A descoberta foi feita no Observatório de Onda Gravitacional de Interferômetro a Laser (LIGO e VIRGO) e cerca de 70 observatórios terrestres e espaciais.
- A imagem mostra a localização dos sinais da onda gravitacional (da rede global LIGO-Virgo 3 detectores), dos raios gama (pelos sinais de satélite Fermi e INTEGRAL) e óticos (a imagem de descoberta Swope) do evento transitório detectado no 17 de agosto de 2017.

- As áreas coloridas mostram as regiões de localização do céu estimadas pelos observadores de raios gama (em azul) e pelos detectores de onda gravitacional (em verde).
- A inserção mostra a localização da galaxy NGC4993: na imagem superior, registrada quase 11 horas após a detecção de sinais de ondas gravitacionais e de raios gama e na imagem inferior, cerca de três semanas antes do evento não havia registro.



Técnica de Detecção: interferomêtro a laser (estrelas de nêutron - quilonova)

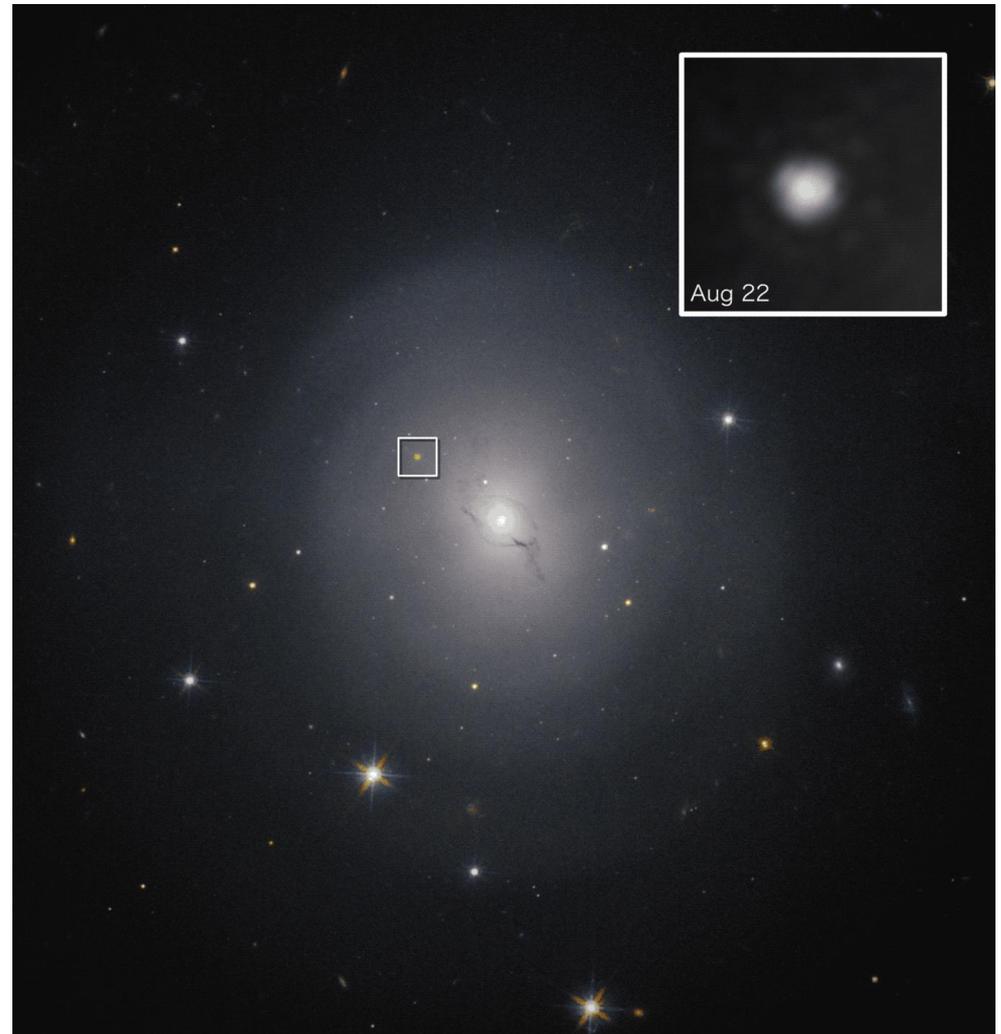
- Este evento ocorreu há 130 milhões de anos-luz da Terra (época dos dinossauros) considerado o mais importante da história recente da Astrofísica e Astronomia.
- Estrelas de nêutron são objetos visíveis mais densos do Universo girando e criando campos magnéticos extremamente intensos.
- Uma colher de chá do material dessa estrela, pesaria mais do que o monte Everest.



Fonte: Nasa's Goddard Space Flight Center/CI Lab.

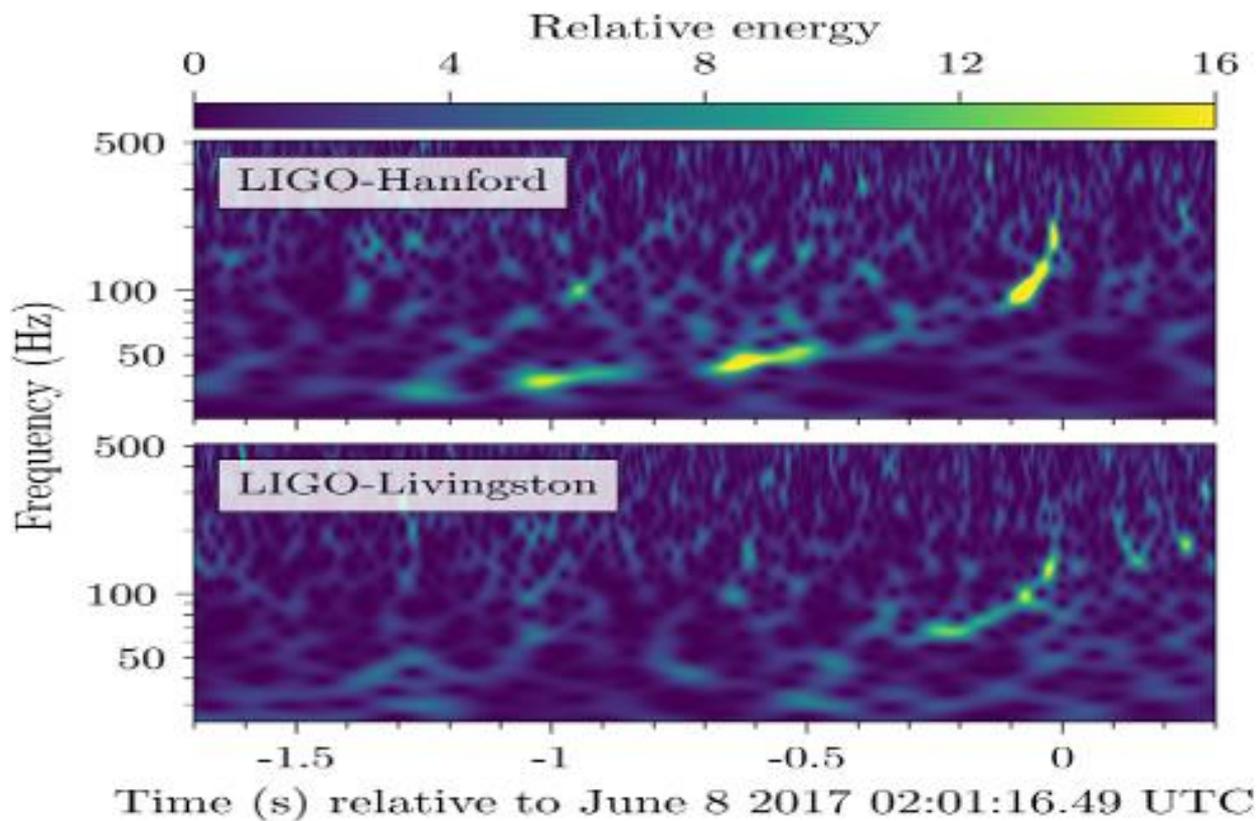
Técnica de Detecção: interferomêtro a laser (estrelas de nêutron - kilonova)

- Dentro de 12 horas, os observatórios identificaram a fonte do evento dentro da galaxy NGC 4993, mostrada nesta imagem do telescópio espacial Hubble, e localizou um alargamento estelar associado chamado kilonova (caixa).
- Inserção: o Hubble observou a queda do kilonova ao longo de seis dias.



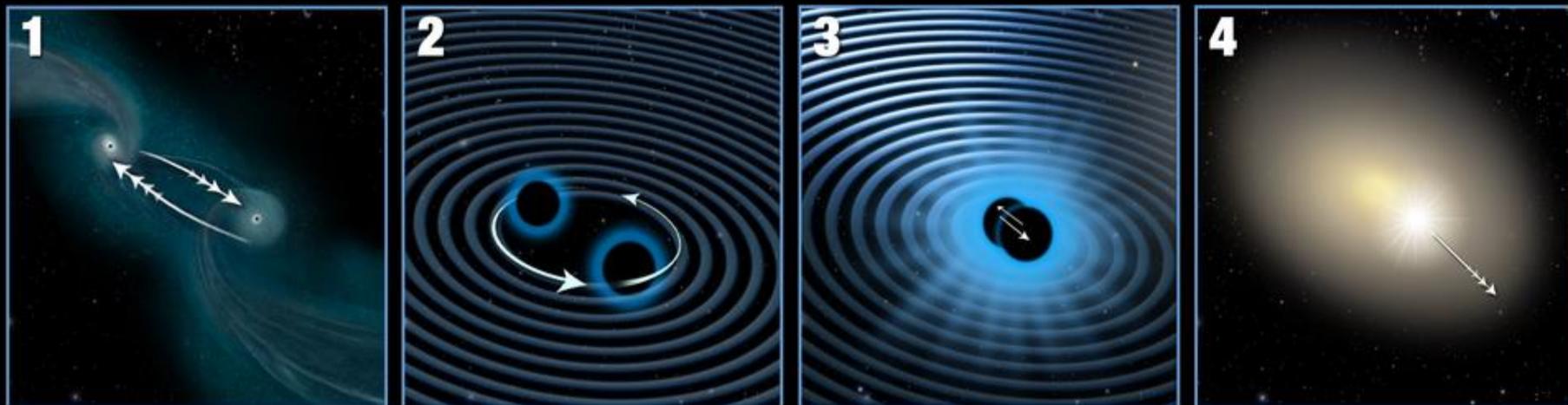
(BURACOS NEGROS) - LIGO e Virgo confirmaram mais uma detecção no início deste ano. Apontado como GW170608, esta descoberta foi produzida pela fusão de dois buracos negros relativamente leves, entre 12 e 7 massas do Sol, cerca de um de um bilhão anos-luz da Terra.

- Este evento foi detectado pelos dois detectores LIGO em 8 de junho de 2017; Para essa detecção, Virgo ainda estava em fase de comissionamento, o qual apenas começou a tomar dados em 1 de agosto.



Fonte: <http://www.virgo-gw.eu/#about>

Gravitational waves eject black hole from galaxy



A ilustração mostra como as ondas gravitacionais podem impulsionar um buraco negro do centro de uma galáxia.

1- Fusão de duas galáxias, cada uma com um buraco negro central.

2- Dois buracos negros na galáxia recentemente fundida se instalam no centro e começam a girar um ao redor do outro. Essa ação energética produz ondas gravitacionais.

3- À medida que os dois objetos pesados continuam a irradiar energia gravitacional, eles se aproximam um do outro ao longo do tempo. Se os buracos negros não tiverem a mesma massa e taxa de rotação, eles emitem ondas gravitacionais mais fortemente em uma direção, como mostrado pela área brilhante no canto superior esquerdo.

4- Os buracos negros finalmente se fundem formando um buraco negro gigante. A energia emitida pela fusão impulsiona o buraco negro para longe do centro e na direção oposta das ondas gravitacionais mais fortes.

Participação Brasileira

- Entre os participantes do projeto estão pesquisadores brasileiros do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais do Brasil (INPE), e do Centro Internacional de Física Teórica da Universidade de São Paulo (UNESP).
- Dr. Odylio Aguiar, do INPE, é o chefe da missão brasileira do LIGO e membro do Conselho da Colaboração Científica, que reúne um seleto grupo de 200 cientistas, basicamente os chefes de grupos envolvidos no experimento.
- “Todas as hipóteses foram checadas, inclusive a possibilidade de hackers terem entrado nos dados e manipulado. Eles checaram todas as senhas usadas. Eles foram atrás de todos os operadores dos computadores; tudo foi checado, inclusive a possibilidade de que o sinal tenha sido colocado maliciosamente. O trabalho durou duas semanas até a divulgação da descoberta”.

Participação Brasileira

- Propostas aceitas do Dr. Odylio Aguiar:
- local para a instalação de um dos aparelhos, que tem quatro quilômetros;
- Isolamento gravitacional evitando para que os espelhos se mexam;
- No futuro, a equipe vai contribuir com o resfriamento desses espelhos pra diminuir o ruído térmico deles;
- Invenção de um sistema de pêndulos alinhados em que você economiza espaço vertical e usar essa tecnologia para melhorar a sensibilidade do LIGO;

Participação Brasileira

- Dr. César Costa contribui para colocar a equipe de brasileiros no experimento;
- Trabalha com a caracterização dos ruídos dos aparelhos (tipos de ruídos, como detectá-los, se estão ocorrendo, como limpá-los, ou como vetar os dados os quais não se consegue retirar o ruído), essencial para o julgamento deste sinal;
- Dr. Ricardo Sturani, trabalhou no modelamento das órbitas de duas estrelas, ou seja, faz os modelos que são usados para checar o sinal.
- “A colaboração é muito complexa. Ela envolve vários grupos que se dividem em inúmeras tarefas. O *“paper”* tem mil autores, mas a colaboração tem mais gente, de 1.300 a 1.400 pessoas, além dos técnicos. Tudo isso é dividido em tarefas, uma divisão fantástica e tudo no sentido de otimizar ao máximo detecção e o sucesso da empreitada”. (Dr. Odylio Aguiar)

Detector Brasileiro



Detector de ondas gravitacionais do Instituto de Física doado ao Inpe
Foto: Marcos Santos/USP Imagens.

Motivo: Falta de profissionais qualificados. O detector opera em temperaturas abaixo de -150 graus Celsius, a partir de gases como nitrogênio, hélio e oxigênio em seus estados liquefeitos.

Detector Brasileiro

- O Brasil tem um detector de ondas gravitacionais desde 2000, o Mário Schenberg, apoiado em 90% pela FAPESP.
- No entanto, o equipamento que ainda não tem a sensibilidade do LIGO.
- Investimentos dos países envolvidos no LIGO: US\$ 600 milhões.
- No aparelho brasileiro, nem US\$ 1 milhão foi investido nestes 16 anos.
- Mesmo assim, ele está em um estágio avançado de sensibilidade.

Referência: M. Cattani, J. M. F. Bassal

Rev. Bras. Ensino Fís., vol.38, n.4, São Paulo, Epub Oct 10, 2016.

SPECIAL SECTION - GRAVITATIONAL WAVES

Gravitational waves observation: brief comments

- [1] K.S. Thorne, Rev. Mod. Phys. **52**, 285 (1980).
- [2] C.W. Misner, K.S. Thorne and J.A. Wheeler, *Gravitation* (Freeman, San Francisco, 1970).
- [3] M. Cattani, <http://arxiv.org/abs/1001.2518> (2009).
- [4] M. Cattani, <http://arxiv.org/abs/1003.2105> (2010).
- [5] M. Cattani, <http://arxiv.org/abs/1004.2470> (2010).
- [6] I.R. Kenyon, *General Relativity* (Oxford University Press, Oxford, 1990).
- [7] H.C. Ohanian, *Gravitation and Spacetime* (W.W. Norton, New York, 1976).