

Astronomia de ondas gravitacionais

Riccardo Sturani

Instituto Internacional de Física - UFRN - Natal

riccardo@iip.ufrn.br

Física em casa - 4 Junho 2020

O que são as ondas gravitacionais?

- ▶ Oscilações do espaço-tempo, tiram energia (e momento angular) das fontes
- ▶ As oscilações acontecem no plano perpendicular à direção de propagação
- ▶ Não precisam de um meio para se propagar e viajam a velocidade da luz
- ▶ São geradas pela matéria acelerada
- ▶ Têm interação muito fraca:



não são absorvidas



difícil de observar

Um pouco de história

- ▶ Novembro 1915: A. Einstein publica artigo: **Relatividade Geral**
- ▶ H. Weyl (1918) e A. Eddington (1922) mostram que as ondas gravitacionais propagam com a velocidade da luz
- ▶ Em 1936 um artigo com N. Rosen nega existência das ondas, mas consegue corrigir o erro antes da publicação final graças a H. P. Robertson e L. Infeld



Einstein e Infeld



Quando o cientistas se convenceram da realidade das ondas gravitacionais? Só em 1955!

H. Bondi



J. A. Wheeler



R. P. Feynman

Se existem como detectá-las? Interferômetros!

Rainer Weiss (MIT),
Kip S. Thorne, Barry Barish (Caltech)

T. 318, L3/
s. J. 528, 19
the discov-
erhaps four
v called the

Schomm-
id. 370, 455
.A. 72, 2473

. Astrophys
n M101: W
L83 (1988).

. J. 387, 47
reskin, As-
. 807 (1988).
Phys. J. Lett.
1 (1991): 89).

(1991): G.

id., in press,
on Scale S.
Astrophys.
p. 146.

Phys. J., in
id. 318, 507

8. 1 (1988).
9). J. Masals
bid 351, L5

ale McGraw
Hill, Eds.

. Astrophys.

. R. Astron.
id., A. Yalin,

A. Dressler,
200).

I. ibid. 379.

astrophys. J.

istic Astrophysics, M. Usher, ed. (World Scientific,
Singapore, 1987), p. 1.

in part by the National Aeronautics and Space
Administration and the Smithsonian Institution.

LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

Alex Abramovici, William E. Althouse, Ronald W. P. Drever,
Yekta Gürsel, Seiji Kawamura, Frederick J. Raab,
David Shoemaker, Lisa Sievers, Robert E. Spero,
Kip S. Thorne, Rochus E. Vogt, Rainer Weiss,
Stanley E. Whitcomb, Michael E. Zucker

The goal of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) Project is to detect and study astrophysical gravitational waves and use data from them for research in physics and astronomy. LIGO will support studies concerning the nature and nonlinear dynamics of gravity, the structures of black holes, and the equation of state of nuclear matter. It will also measure the masses, birth rates, collisions, and distributions of black holes and neutron stars in the universe and probe the cores of supernovae and the very early universe. The technology for LIGO has been developed during the past 20 years. Construction will begin in 1992, and under the present schedule, LIGO's gravitational-wave searches will begin in 1998.

Einstein's general relativity theory describes gravity as due to a curvature of space-time (1). When the curvature is weak, it produces the familiar Newtonian gravity that governs the solar system. When

the curvature is strong, however, it should behave in a radically different, highly nonlinear way. According to general relativity, the nonlinearity creates black holes (curvature produces curvature without the aid of any matter), governs their structure, and holds them together against disruption (2). Inside a black hole, the curvature should nonlinearly amplify itself to produce a space-time singularity (2), and near some singularities the nonlinearity should force the curvature to evolve chaotically (3). When an object's curvature varies rapidly (for example, because of pulsations, colli-

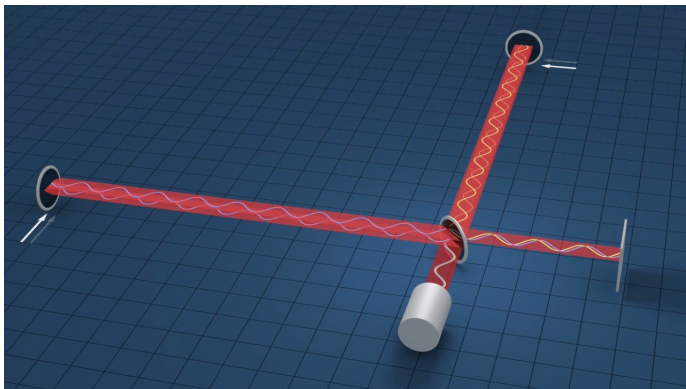
The authors are the members of the LIGO Science Steering Group: A. Abramovici, W. E. Althouse (Chief Engineer), R. W. P. Drever, S. Kawamura, F. J. Raab, L. Sievers, R. E. Spero, K. S. Thorne, R. E. Vogt (Director), S. E. Whitcomb (Deputy Director), and M. E. Zucker are with the California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125. Y. Gürsel is at the Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA 91109. D. Shoemaker and R. Weiss are at the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139.

0895-2688/92/0000-0000\$04.00/0

Downloaded from on February 17, 2016

996

Uma régua muito precisa: LIGO e Virgo



Medida com precisão de **0.000000000000000001 cm** em 3-4 km

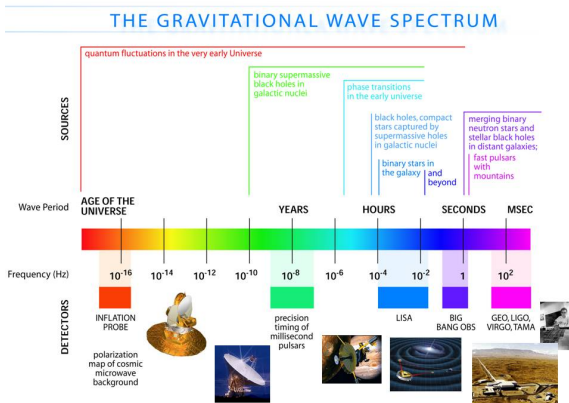
Os observatórios LIGO e Virgo



	LIGO	Virgo	<i>n.</i> dets
O1:	9/2015 - 1/2016	×	3
O2:	12/2016 - 8/2017	8/2017	7+1
O3:	4/2019 - 3/2020	✓	2+54

Em 4/2020 japonês KAGRA entrou em função (sensibilidade reduzida, como GEO), em 202? o indiano INDIGO entrará em funcionamento.

Ondas gravitacionais ao longo do espectro



Um xylophone de detectores de ondas gravitacionais

<http://www.astro.gla.ac.uk/users/martin/powersof60/future.html>

As ondas detectadas: alguns eventos

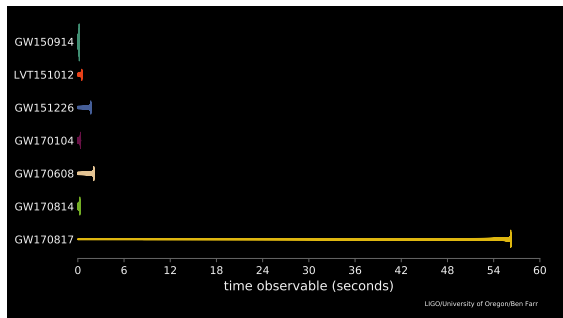
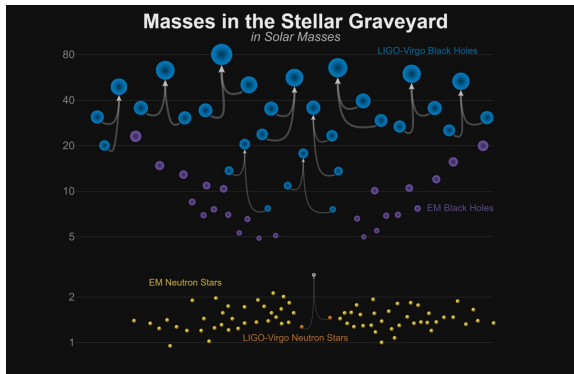


Image by Ben Farr, <http://www.ligo.org>

A dança dos pares de buracos negros durou milhões de anos, mas só emissões com frequências $\gtrsim 20\text{Hz}$ podem ser detectadas pelo LIGO/Virgo.

Objetos massivos $\nearrow \implies$ tamanho $\nearrow \implies$ max. frequência \searrow

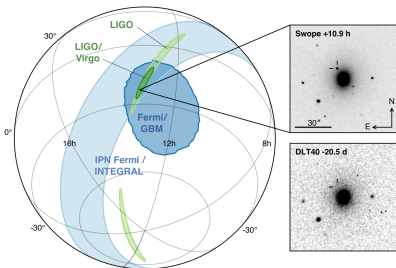
Massas dos buracos negros detectados em O1 e O2



1. GW190412: sistema mais assimétrico: $m_1/m_2 \sim 3$, massa total $\sim 40M_{\odot}$
2. GW190425: novo sistema binário de estrela de nêutrons

GW170817

- ▶ GW trigger no 17 Agosto 2017, terminado às 9h 41' 04.4" BST, em coincidência tripla, localizado numa area de ceu de $\sim 28 \text{ grau}^2$ (lua $\sim 1/4 \text{ grau}^2$)
- ▶ Gamma Ray Burst trigger detectado par Fermi-GBM 1.7" depois
- ▶ primeira imagen optica 10.87 hr depois, obtida pelo One-Meter Two Hemisphere team com telescopio Swope telescope em Las Campanas Observatory (Chile)
- ▶ raios X obtidos pelo X-Ray Telescope Swift 14.9 h depois (NuSTAR 16.8 h)
- ▶ radio emission ($\sim 3, 6 \text{ GHz}$) obtido pelo VLA 16 dias depois o evento gravitacional



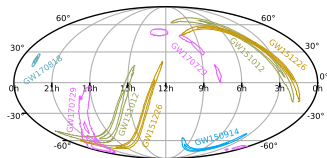
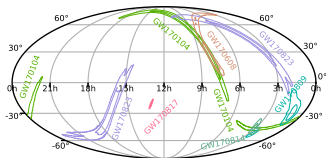
Um exemplo de imagem optica “Brasileira”



Transient Optical Robotic Observatory of the South

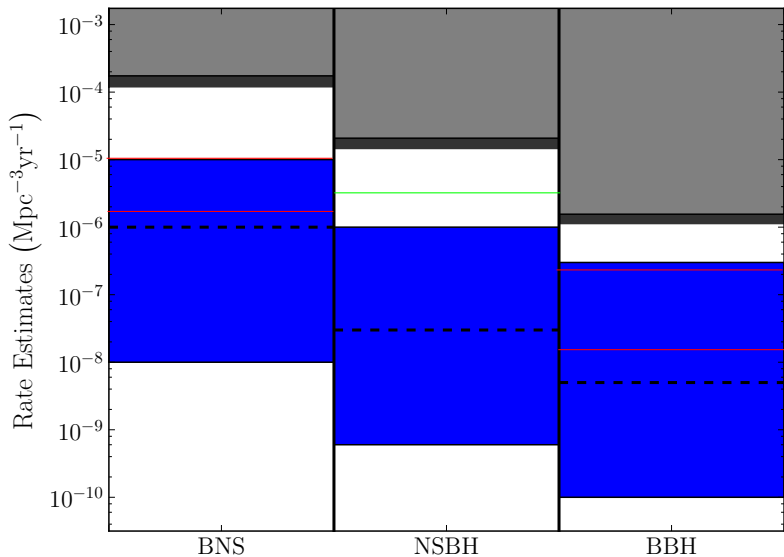


De onde elas vieram?



Distâncias entre 40 e ~ 2800 Mpc ($\pm 20\%$), por confronto nossa galaxia tem diâmetro de 30 kpc (prefixo $M=1$ milhão, $k=mil$)

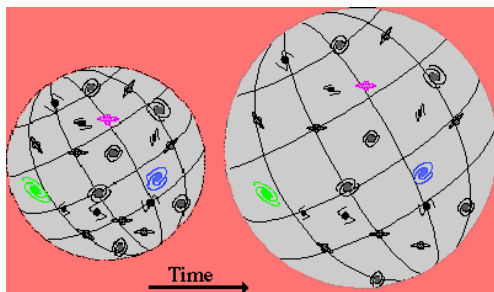
Image by Leo Singer, <http://www.ligo.org>



Predições astrofísicas, limites superiores de S5/6/O1 e observações from O1/O2

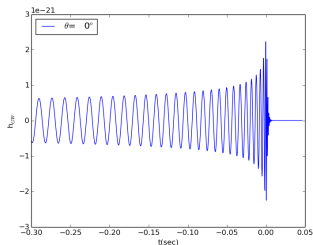
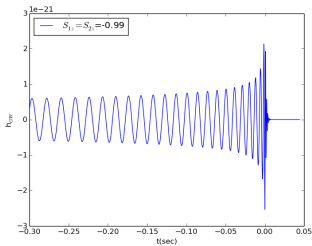
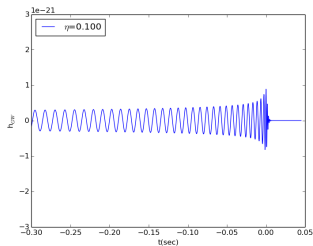
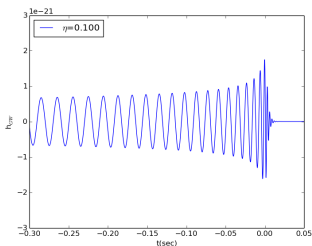
Onde os colocamos no Universo?

Objetos inter-estelar estão se afastando uns dos outros: observando a luz duma estrela não podemos observar imediatamente sua distância, mas seu red-shift ($1 + z$), i.e. seu deslocamento para frequência menores, como no efeito Doppler



Nas ondas gravitacionais medimos diretamente a amplitude \rightarrow distância

Improntas digitais dos sistemas binários



Podemos conhecer amplitude emitida, comparando com amplitude medida obtemos a distância: **sirenes padrões**

O que sabemos sobre as fontes?

Número de galáxias em $1 Gpc^3 \sim 10^8 = 100$ milhões

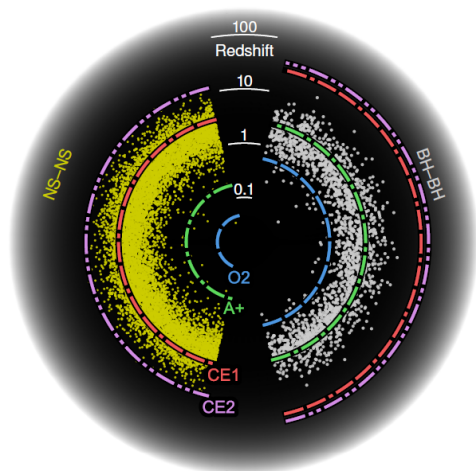
Taxa de eventos estimada entre 10 e 150 por Gpc^3 por ano

Sistema binários são bastante comuns, mas normalmente fusão acontece numa escala de tempo **comparavel com a idade do Universo**

2 métodos de formação esperados:

1. Sistema binário de estrelas passa por uma fase de “common envelope”: uma estrela engolhe outra, depois acontece colapso gravitacional (com/sem supernova)
2. 3 objetos compactos se encontram, o mais leve é expulso baixando a energia dos restantes \rightarrow reduzindo o tamanho da órbita

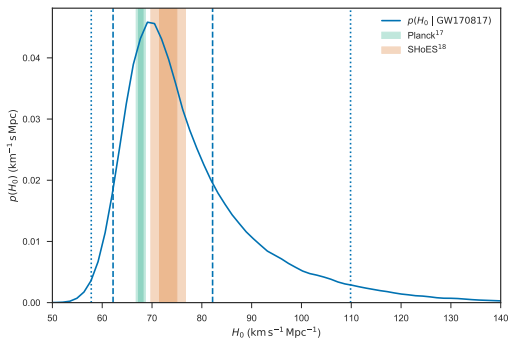
Quantos mais podemos esperar?



arXiv:1903.04615

A importância de conhecer distância e redshift

Cosmologia: medição de $H_0 = \frac{z}{D}$

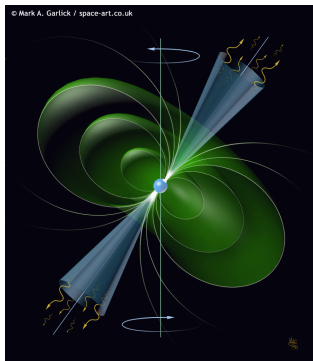
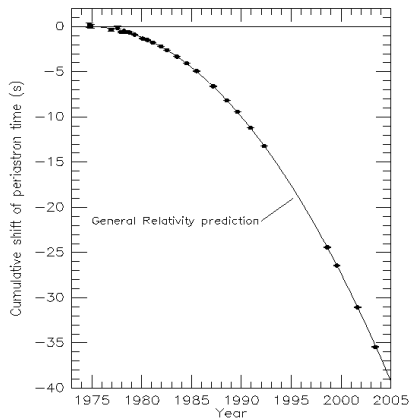


LIGO/Virgo Nature 551 '17 7678, 85

E se não precisasse construir um detector?

A existência é prevista pela Relatividade Geral, confirmada pela observação da perda da energia do sistema binário das **estrelas de nêutrons**

Estrelas de nêutrons **pulsares** são fontes de ondas rádio

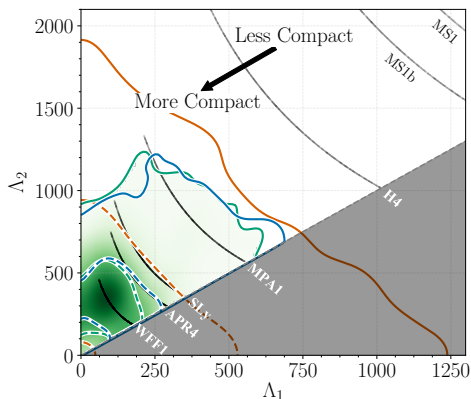


Diferença entre a previsão teórica e a observação menor que 0.1%!

9 sistemas binários de pulsares conhecidos na nossa galáxia hoje com período de algumas horas, a 100 milhões de anos da coalescência

Estrelas de nêutrons não são rígidas

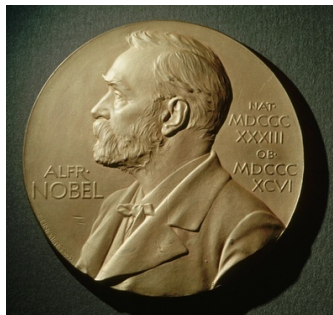
Em presença dum segundo objeto podem se deformar, absorvendo energia de legame gravitacional e **acelerando** a fusão



LIGO/Virgo collaboration, arXiv:1805.11581

Primeira janela observacional sobre o **interior** duma estrela de nêutrons!

O prêmio Nobel



R. Weiss

K. Thorne, Barry Barish



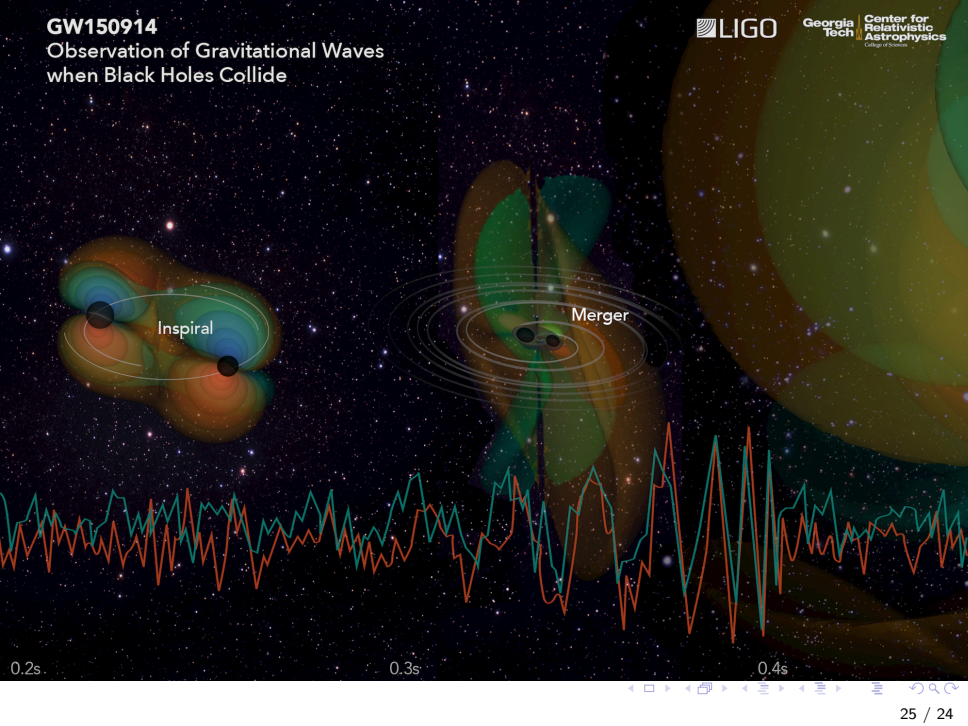


THE END



GW150914

Observation of Gravitational Waves when Black Holes Collide



Inspiral

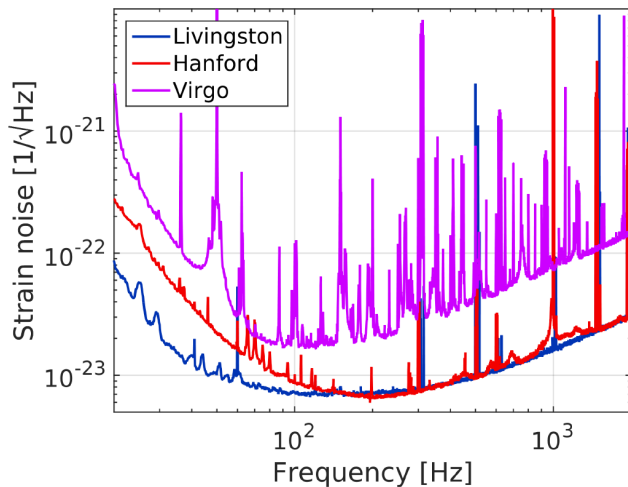
Merger

0.2s

0.3s

0.4s

Ruído de O2



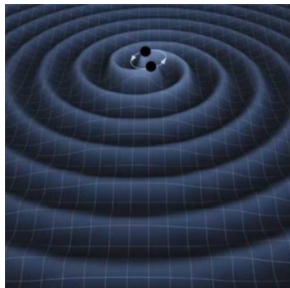
LIGO/Virgo PRL(2017) 141101

Ondas gravitacionais e buracos negros

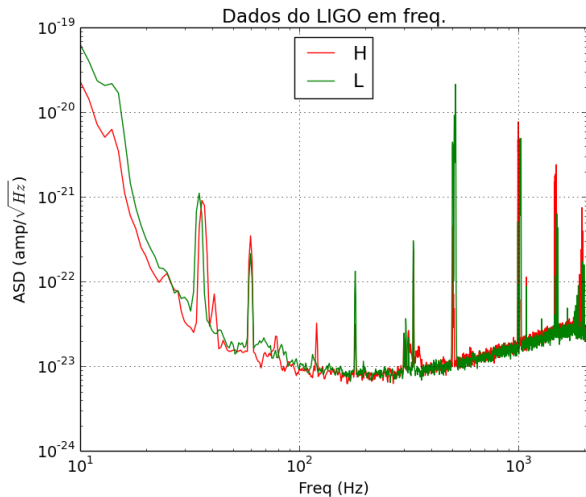
- ▶ Existem os buracos negros? **Sim!**
- ▶ Se são negros, como se observam?
Pela a luz emitida pelos objetos astrofísicos quem caem dentro deles (até a semana passada)
- ▶ Qual é a massa dos buracos negros?
Os mais comuns pesam **3-50** vezes o sol, mas o centro da nossa galáxia hospeda um buraco negro de **1 milhão** de massas solares. Estima-se que as galáxias distantes possuem um buraco negro central de até **1 bilhão** de vezes mais pesado que o nosso sol



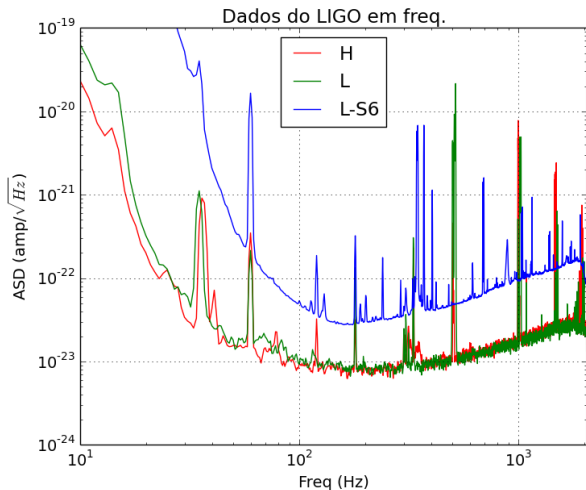
- ▶ Qual é o tamanho de um buraco negro?
Se o sol fosse um buraco negro teria um **raio de 3 km**
(estrelas de nêutrons têm raios $\sim 10\text{km}$)
O buraco negro no centro da nossa galáxia tem raio de **10 milhões de km**
Sistema binários de buracos negros (o de estrelas de nêutrons) ao final da vida podem ter órbitas de **alguns quilômetros** e velocidade próxima da velocidade da luz (300.000 km/sec) e portanto períodos menor que 1 seg.
Todas massas aceleradas emitem ondas gravitacionais, também o sistema terra-sol, mas para que houvesse frequências menores de 1Hz seria necessário que estes objectos fossem compactos



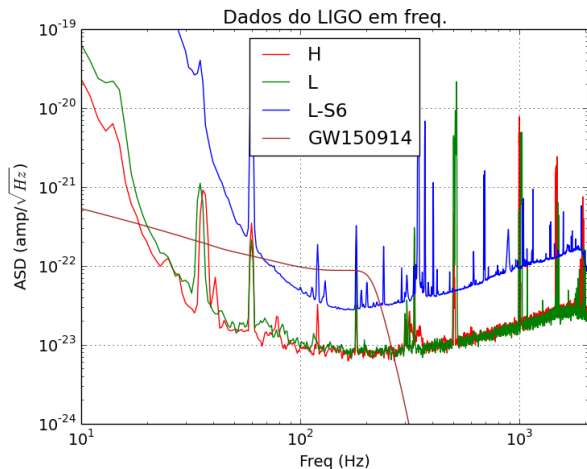
Por que não vimos antes?



Por que não vimos antes?

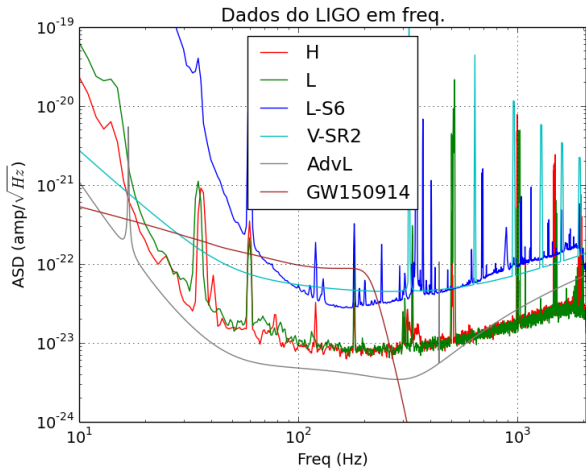


Por que não vimos antes?



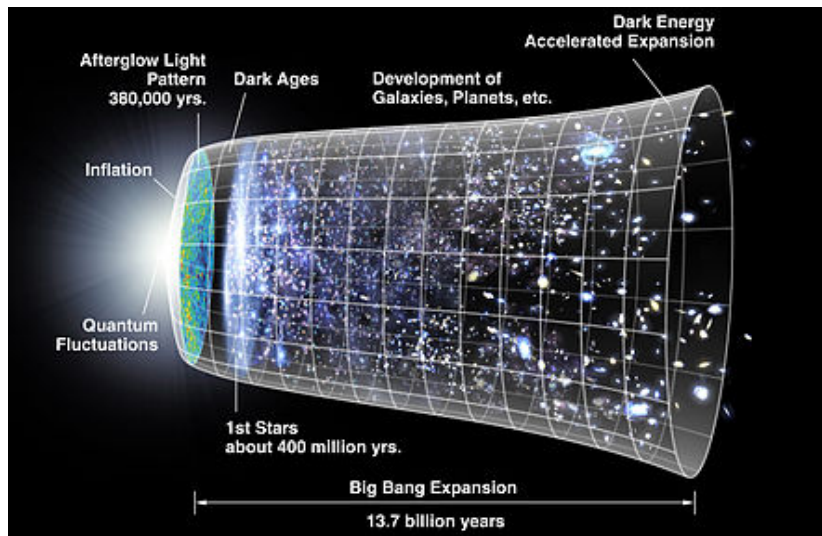
www.losc.ligo.org

Por que não vimos antes?



Muito forte!

Ondas gravitacionais e o Universo primordial



NASA/WMAP Science Team