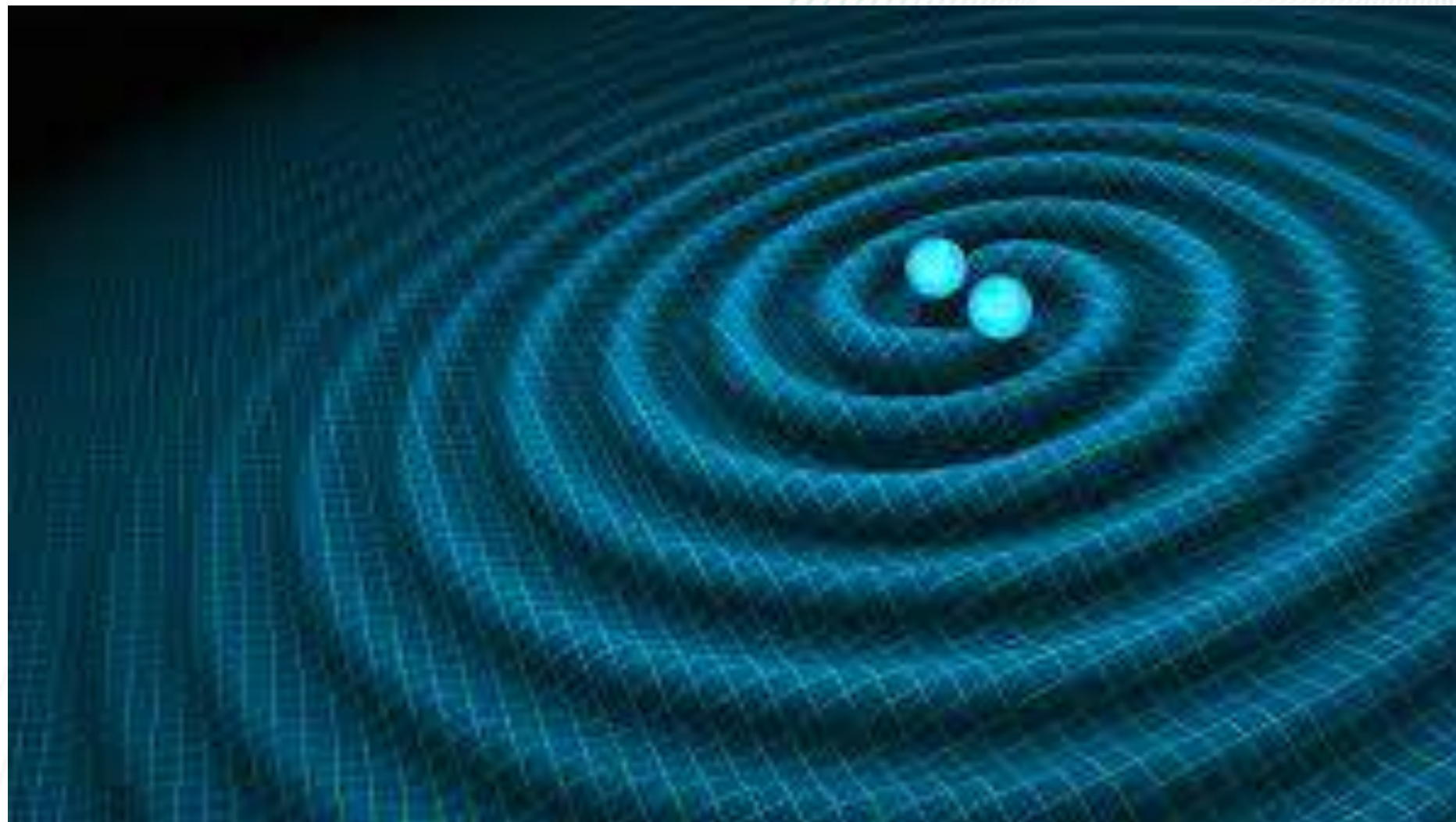




O universo desconhecido: as novidades das ondas gravitacionais



Cecilia Chirenti

Física em Casa, ICTP-SAIFR, 17/06/2021

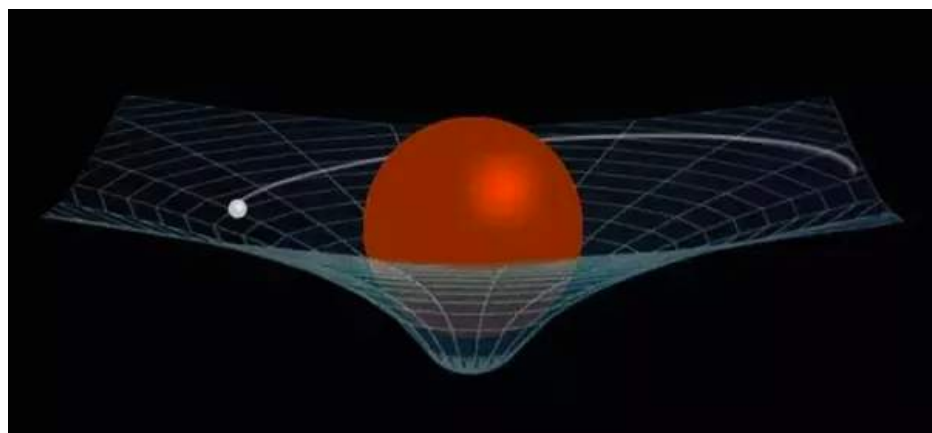
6 Fatos sobre as ondas gravitacionais (da Enciclopédia Britânica)



1. Ondas gravitacionais são oscilações do espaço-tempo
2. Ondas gravitacionais são geradas por objetos muito pesados
3. O efeito das ondas gravitacionais é muito, muito pequeno
4. Medir ondas gravitacionais é muito difícil
5. O detector LIGO* é muito preciso
6. A astronomia de ondas gravitacionais nos permite ver o universo de uma maneira totalmente diferente

*Laser Interferometer Gravitational Wave Antenna

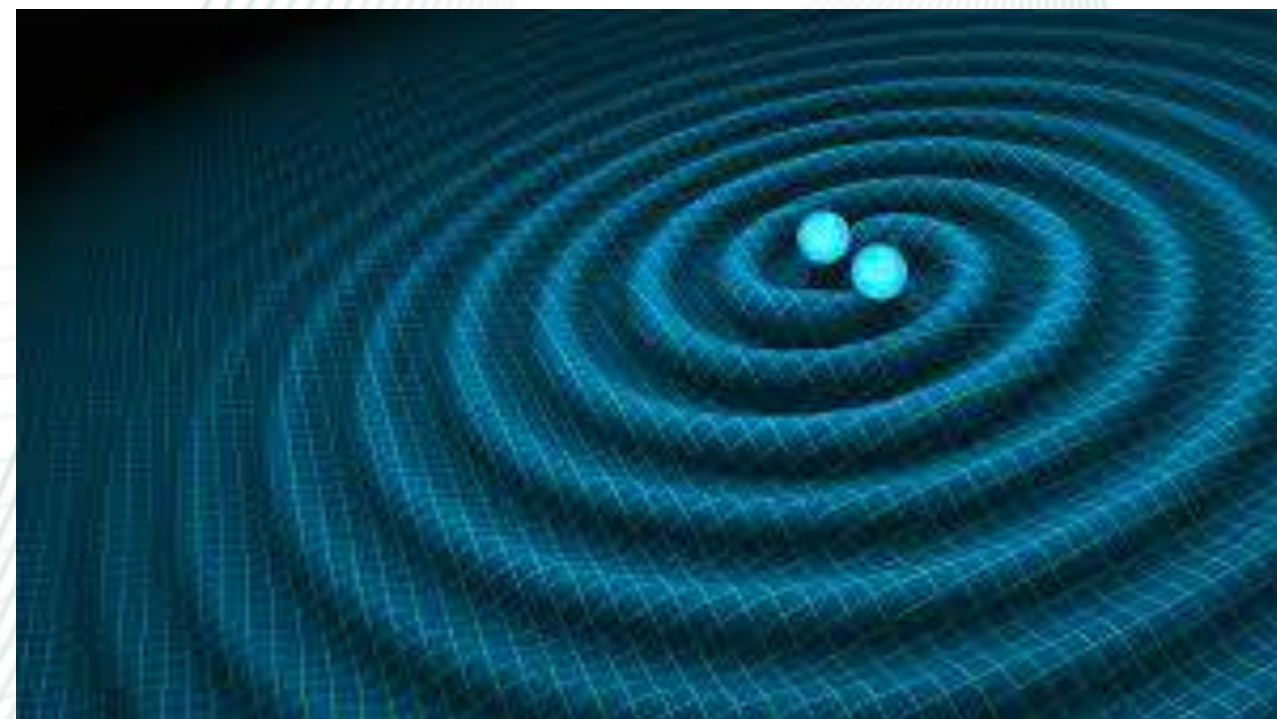
Relatividade geral e espaço-tempo curvo



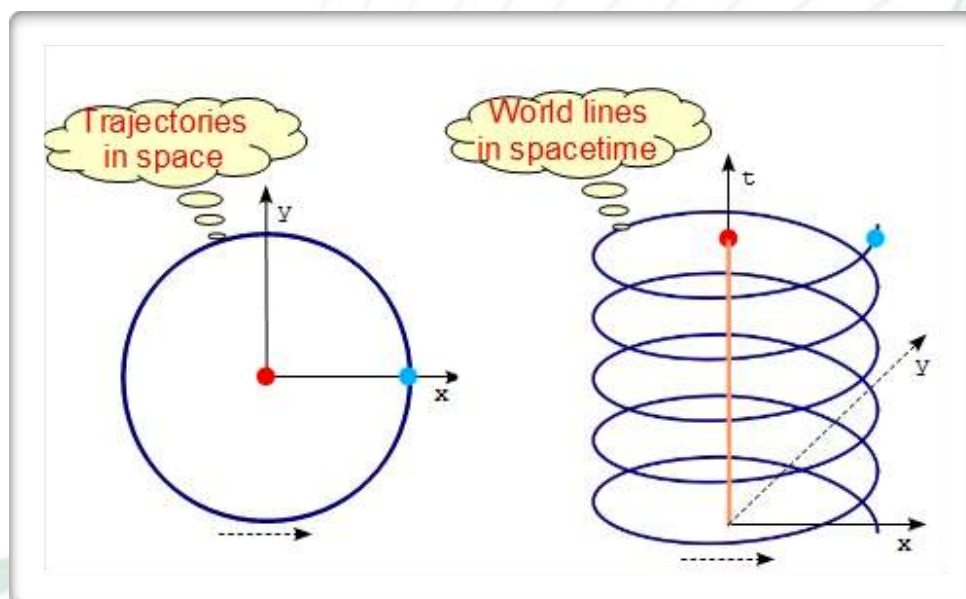
força
gravitacional



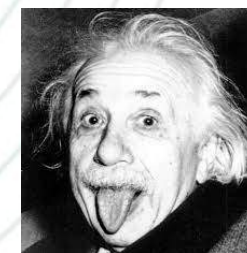
curvatura do
espaço-tempo



geometria em 4 dimensões

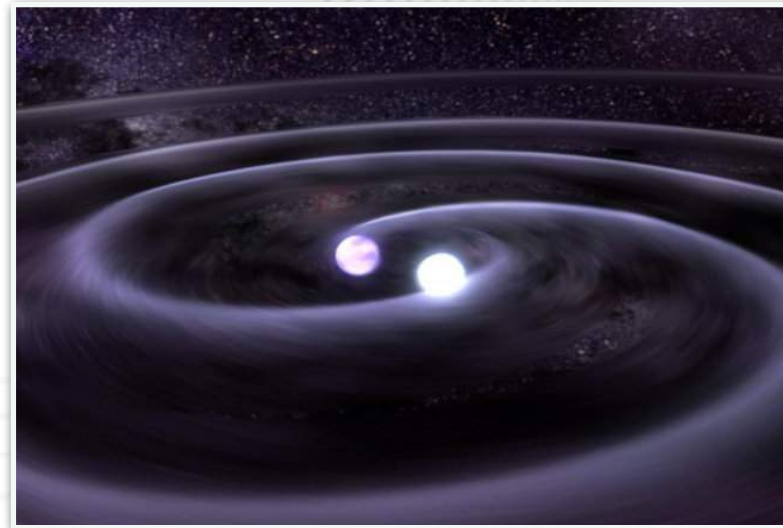


ondas gravitacionais são
oscilações do espaço-tempo



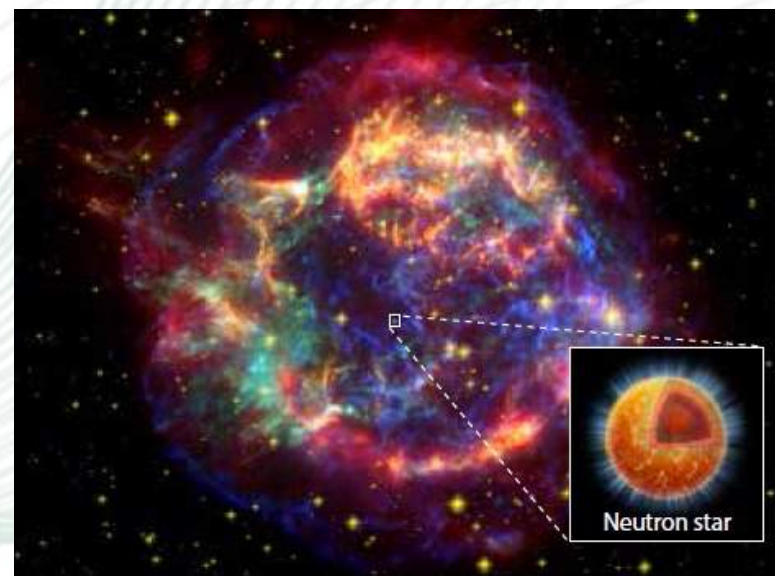
Tive que trabalhar durante 10 anos para
terminar essa teoria em 1915...

Possíveis fontes de ondas gravitacionais



sistemas binários
de objetos
compactos

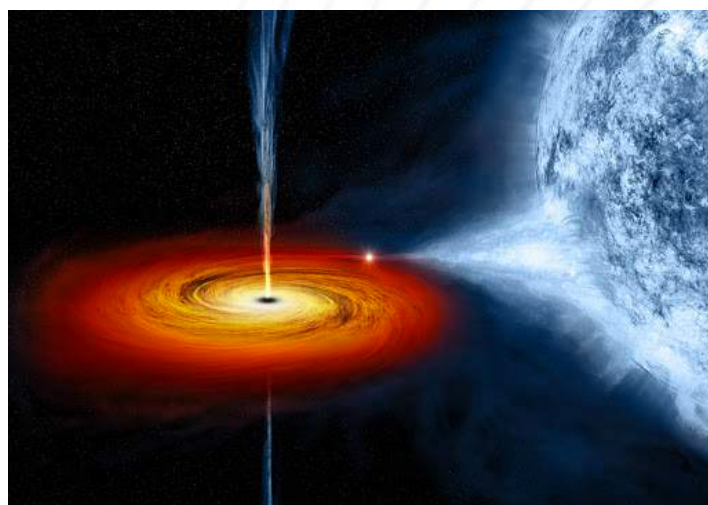
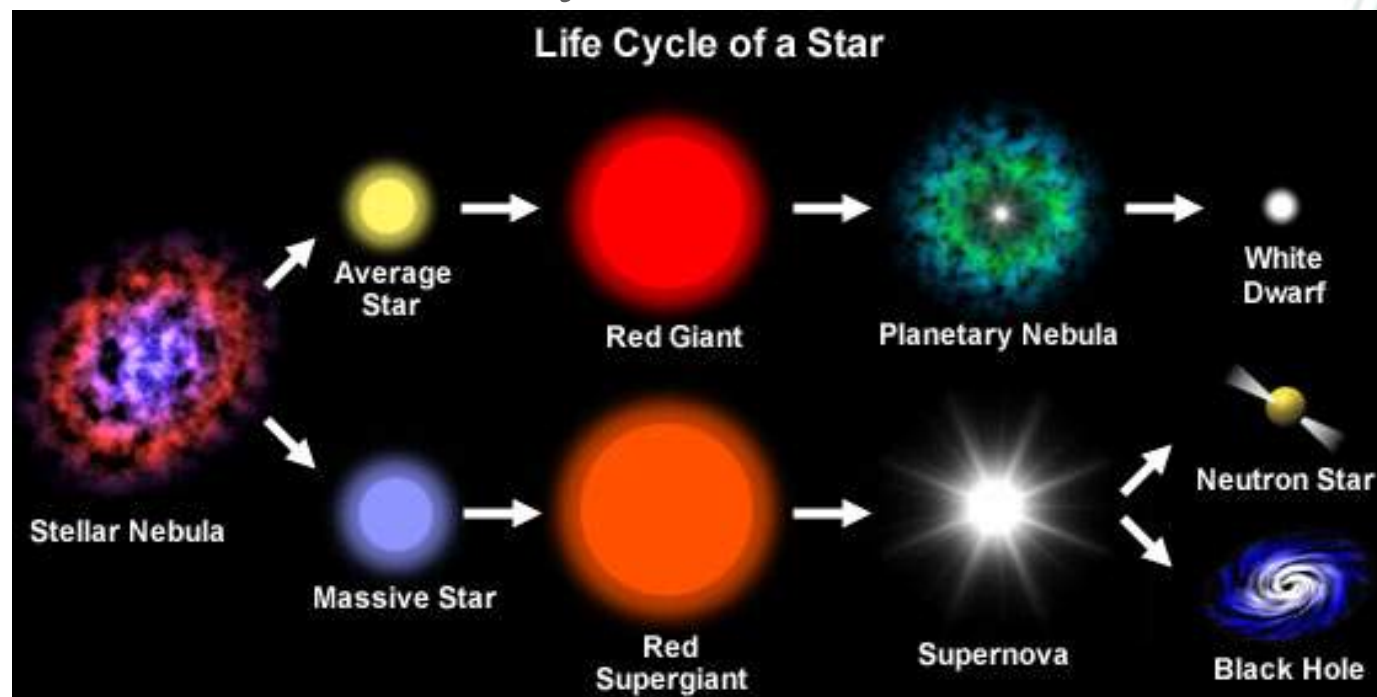
supernovas



pulsares

Objetos compactos: estrelas de nêutrons e buracos negros

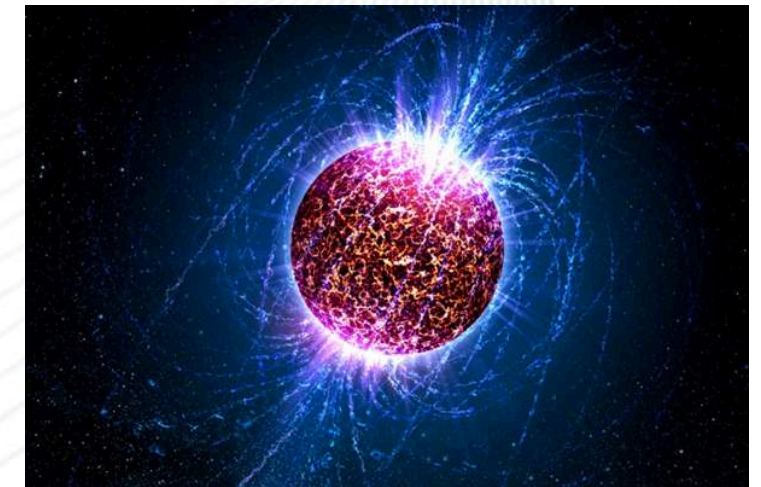
evolução estelar



buraco negro + estrela



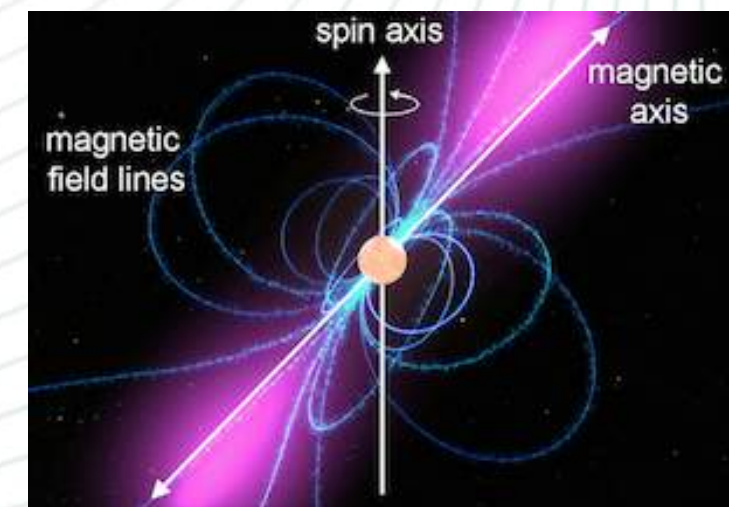
estrelas de nêutrons



Massa $\sim 1.4 M_{\odot}$

Raio ~ 12 km

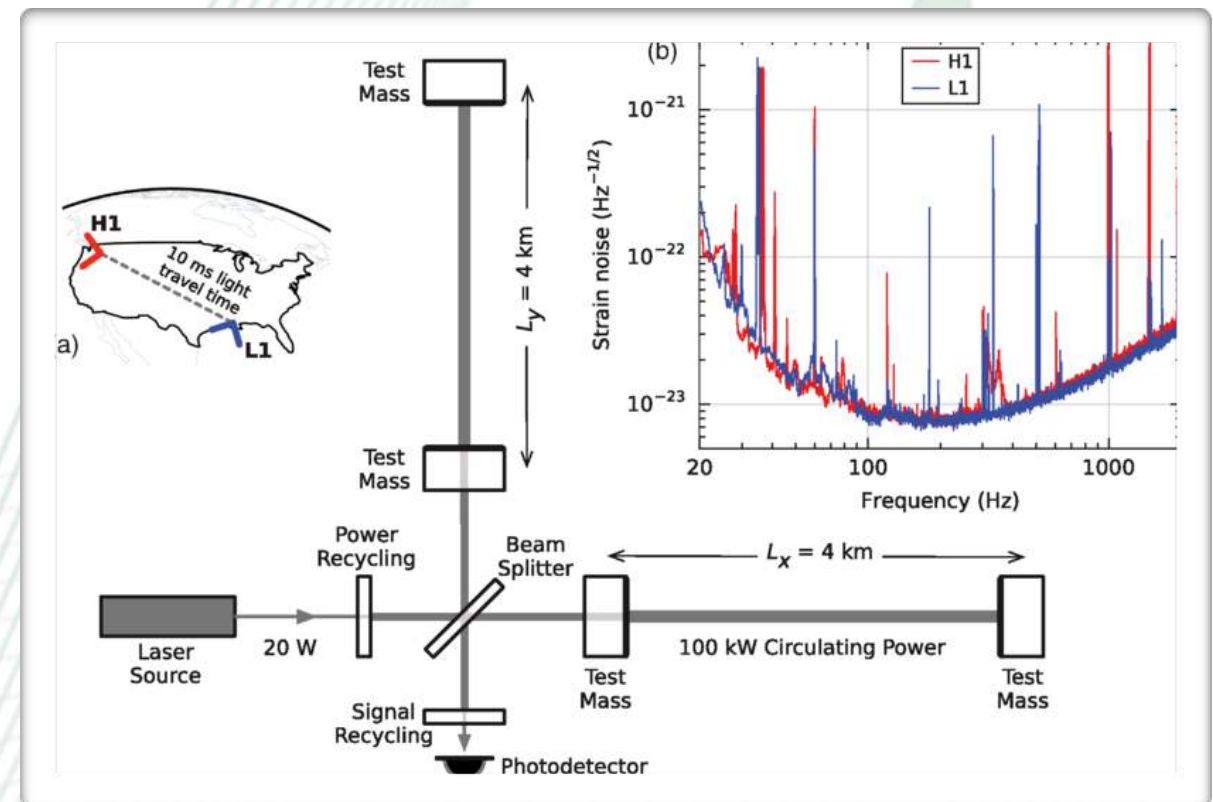
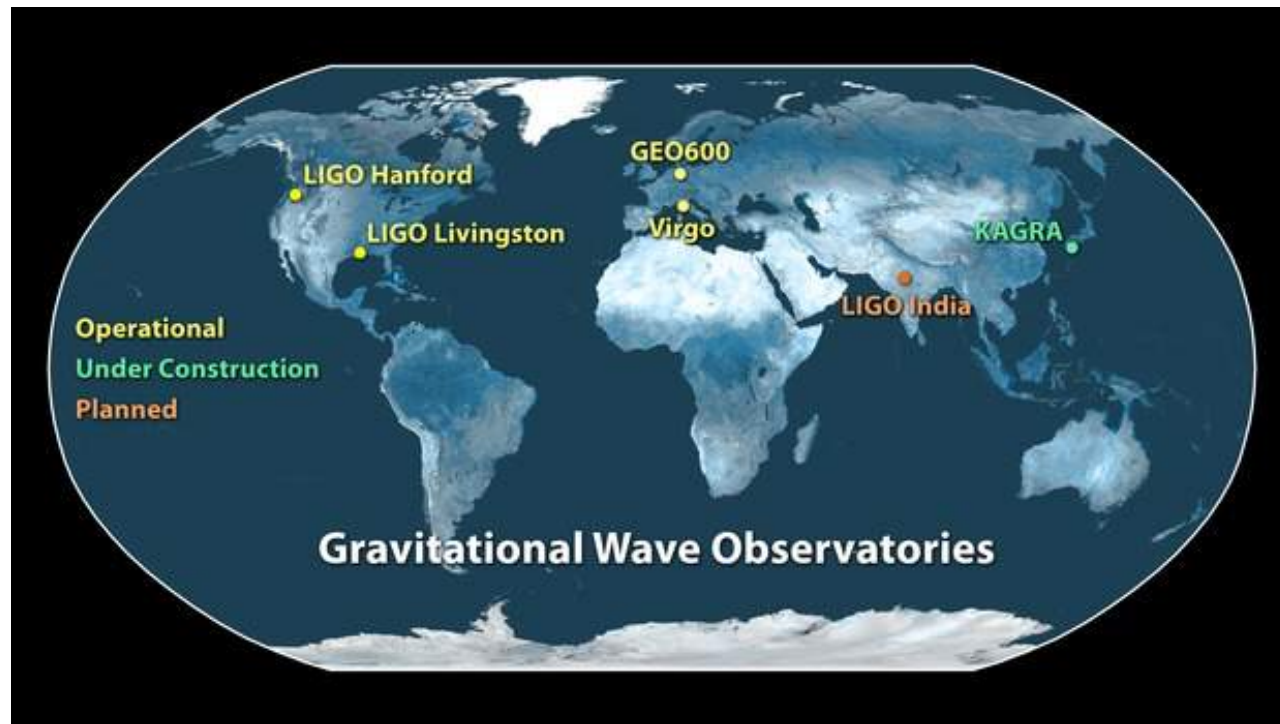
(Massa máxima $\sim 2.2 - 3 M_{\odot}$)



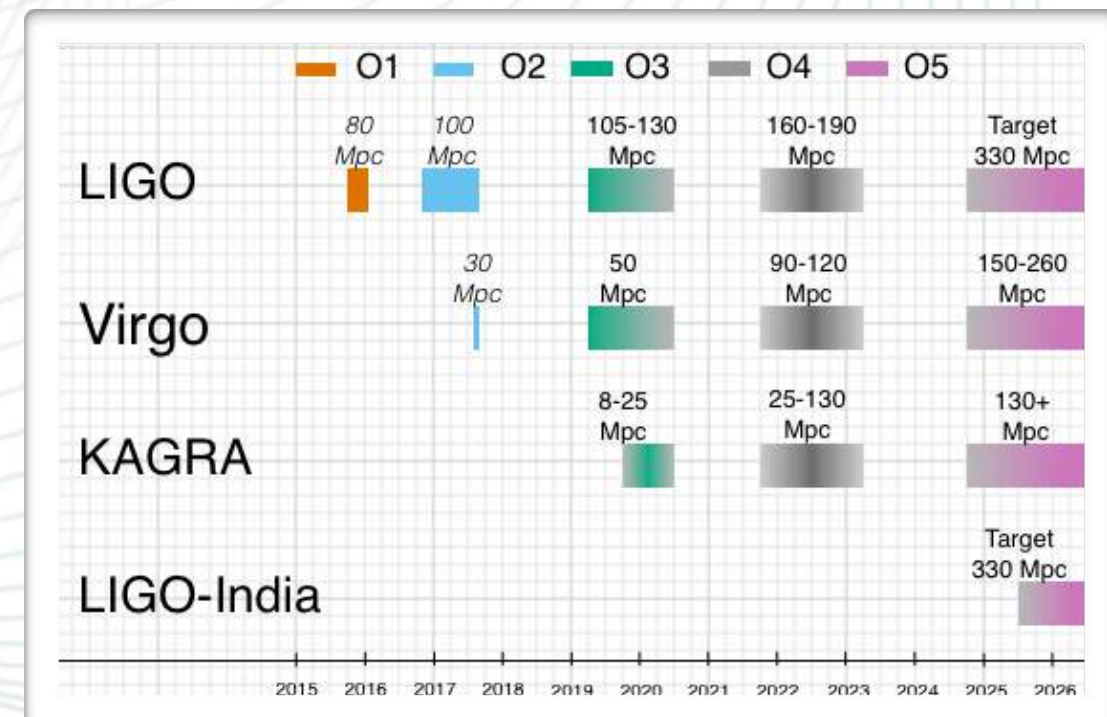
pulsares

(e magnetars, sGRBs, FRBs, etc)

Detetores de ondas gravitacionais



KAGRA



Contribuição Brasileira



Odylio Aguiar e seu grupo
INPE - São José dos Campos

Participação
na colaboração
LIGO



Riccardo Sturani
IIP - Natal

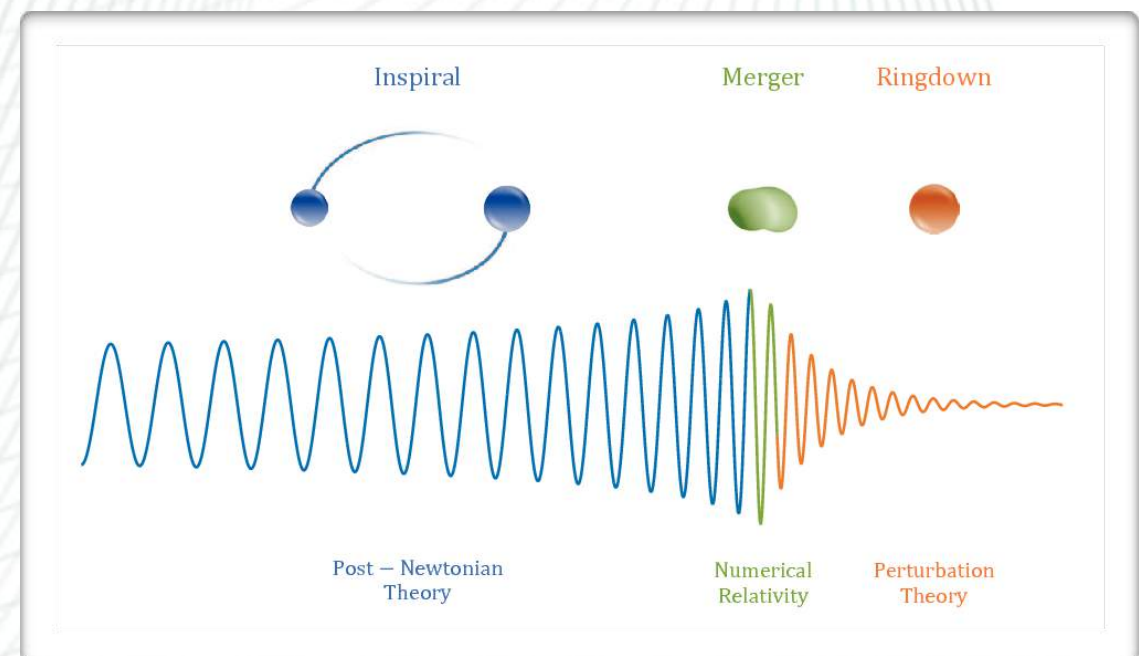
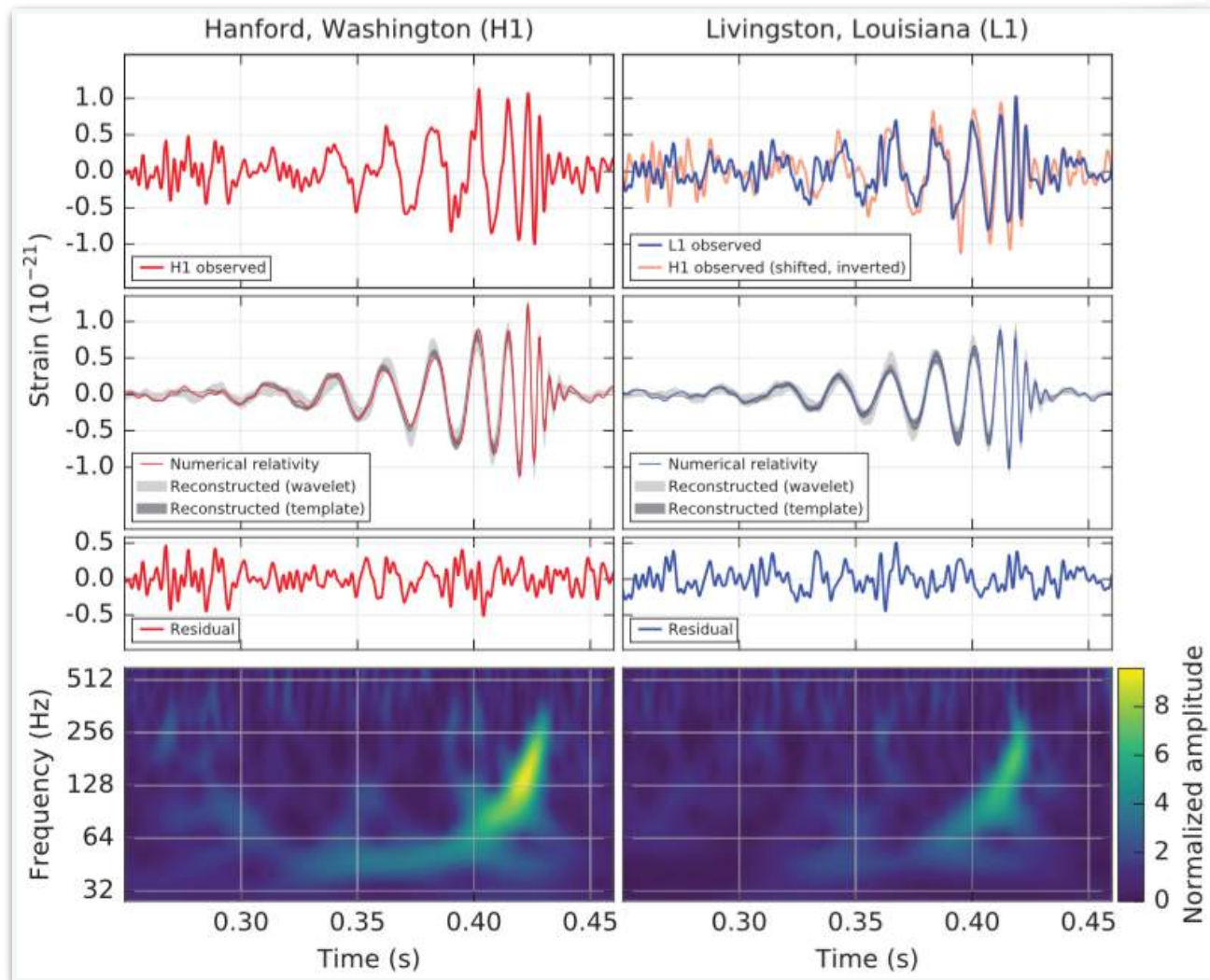
Projeto pioneiro
Detector Mario Schenberg



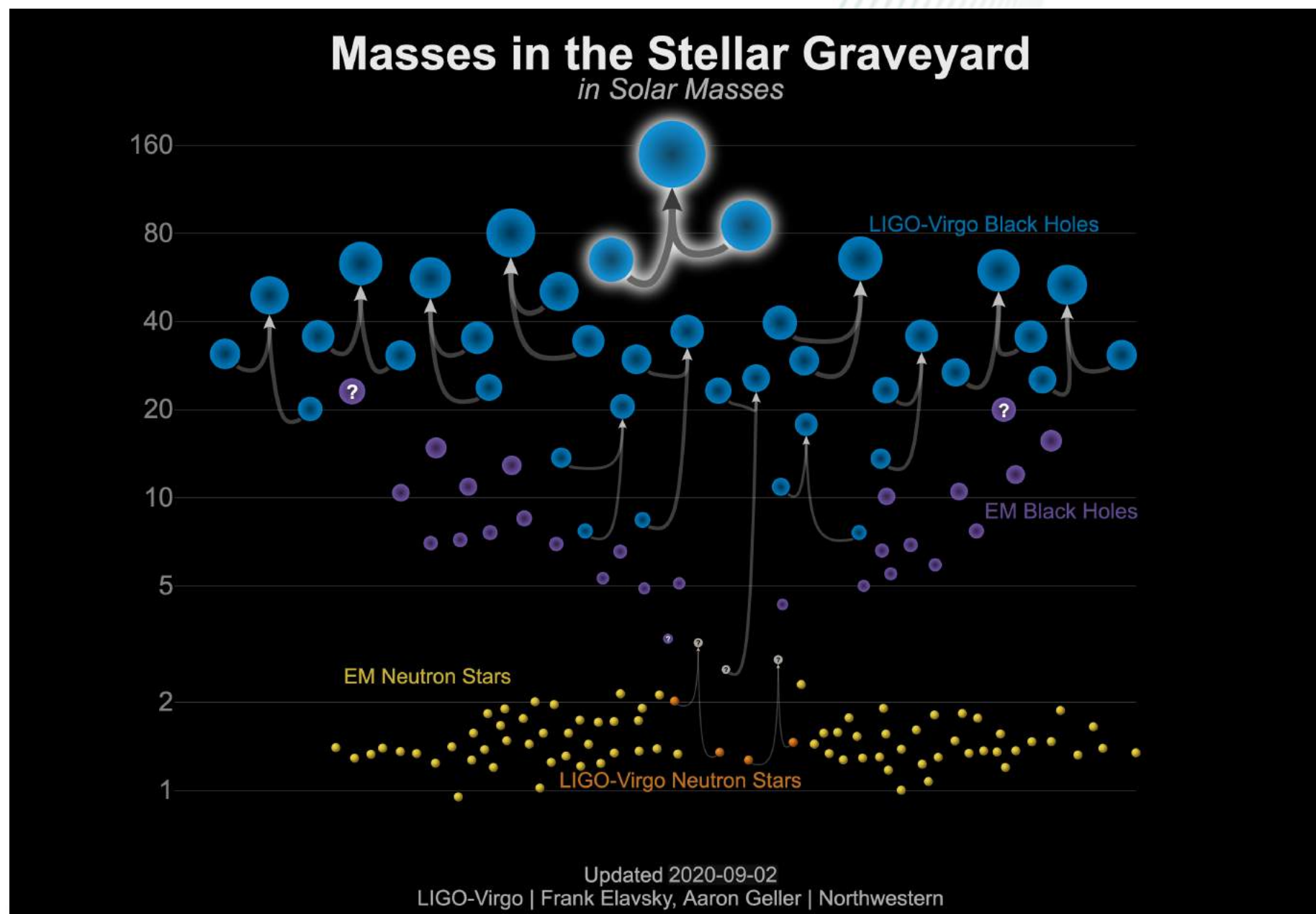
“Inspiral-Merger-Ringdown”

Exemplo: Primeira Detecção GW₁₅₀₉₁₄ (ano-mês-dia)

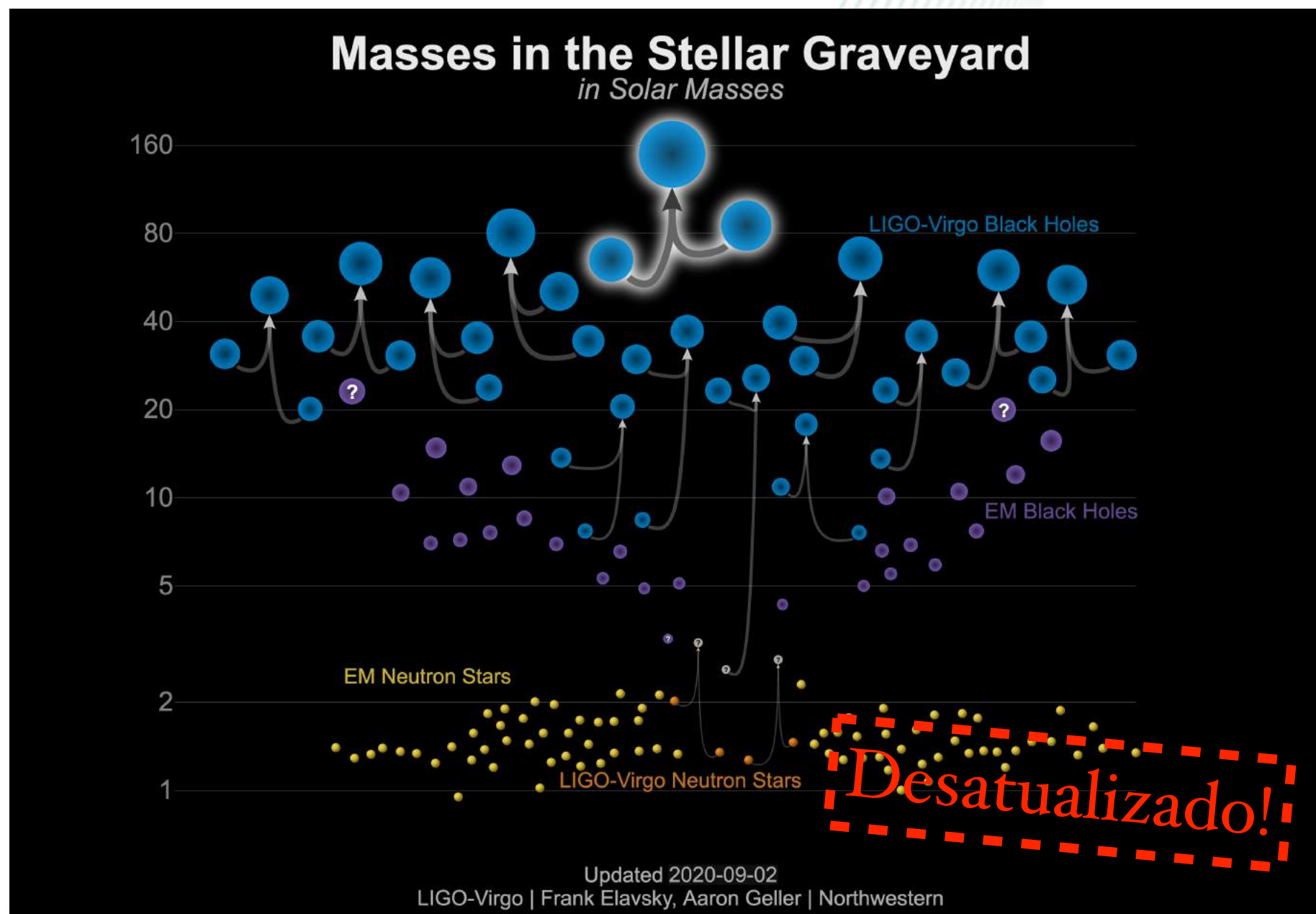
3 estágios:



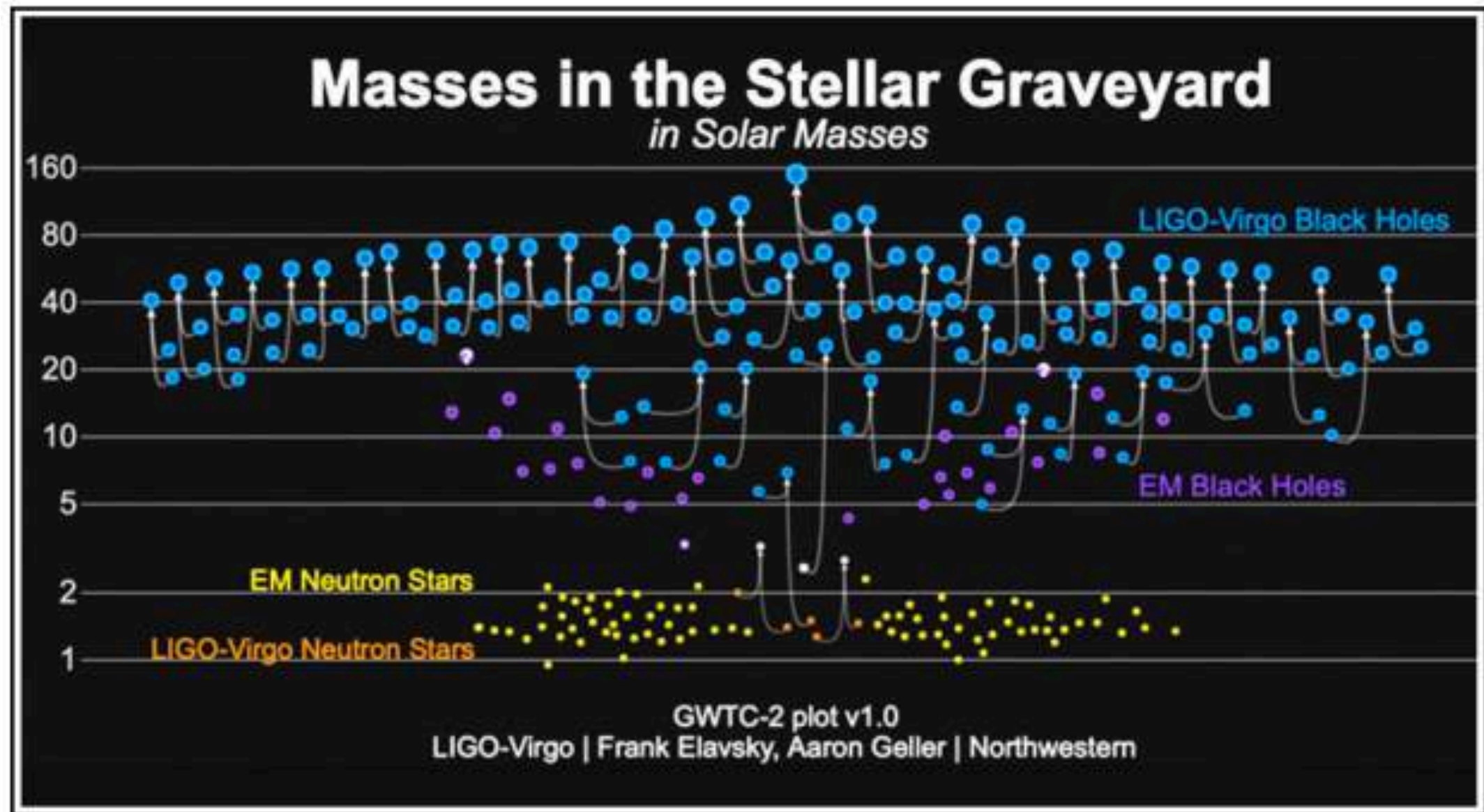
Observações realizadas até agora

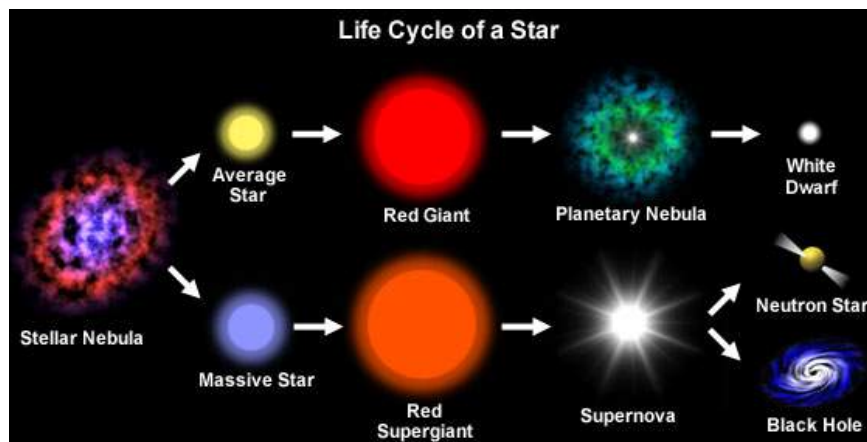


Temos cada vez mais eventos...



Já são 50 eventos anunciados!





O que nós aprendemos?

O que nós ainda não sabemos?

1. Massas dos buracos negros

Por que os buracos negros observados em ondas gravitacionais possuem massas maiores?

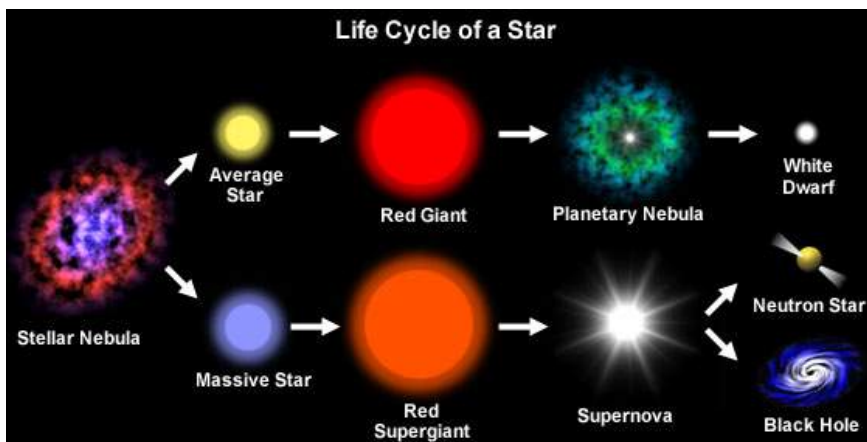
(Viés observacional??)

E como eles são formados?

Buracos negros com massas entre $\sim 20 - 50 M_{\odot}$ podem ser formados pelo colapso de estrelas com baixa metalicidade

Tabela periódica para um astrônomo

Tabela periódica

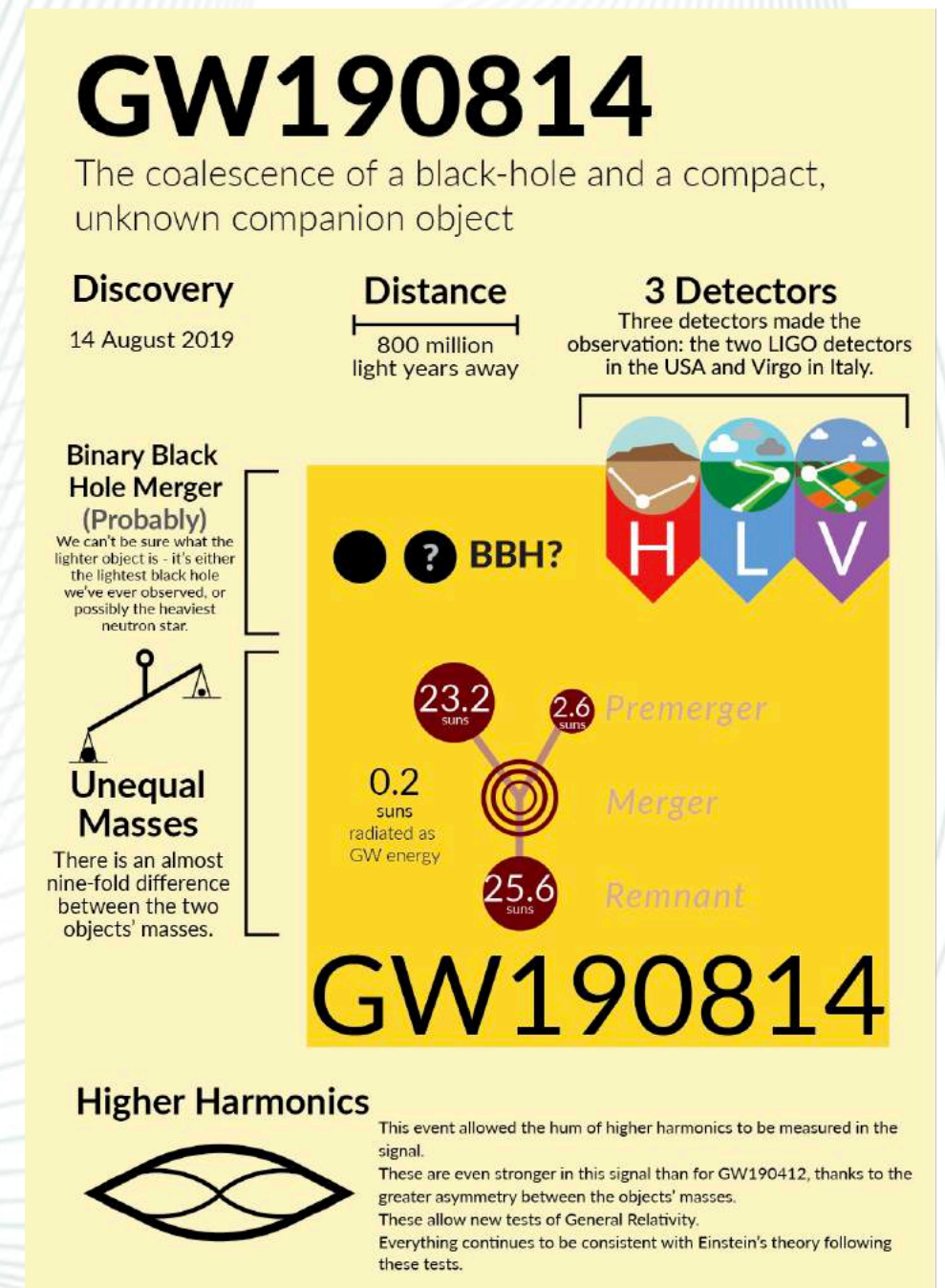


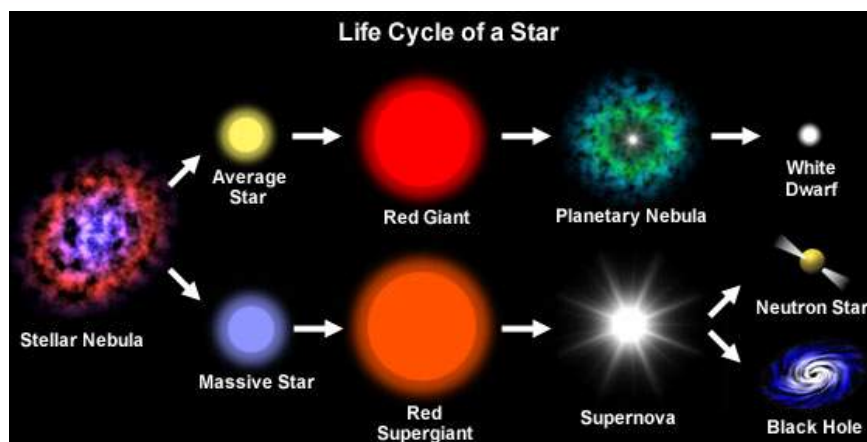
O que nós aprendemos?
O que nós ainda não sabemos?
2. Massa mínima?

Qual a menor massa possível para um buracos negro?
E qual a maior massa possível para uma estrela de neutrons?

O objeto com $2.6 M_{\odot}$ é uma estrela de nêutrons muito pesada, ou um buraco negro muito leve?

Pode ser um buraco negro formado pela colisão de duas estrelas de nêutrons!



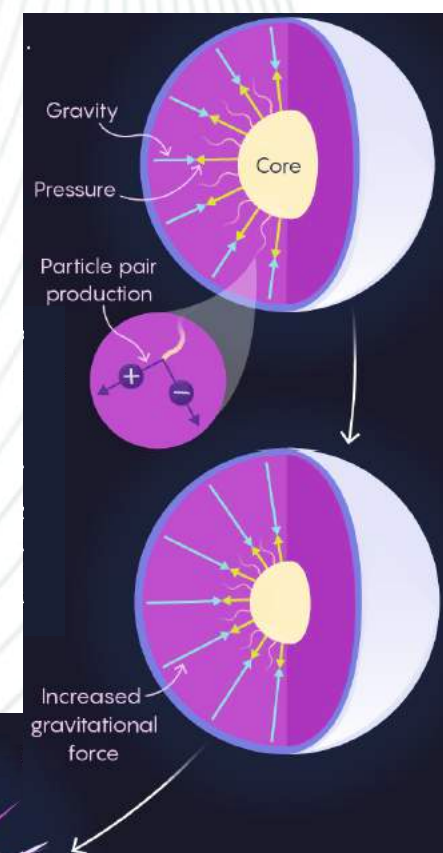


O que nós aprendemos?
O que nós ainda não sabemos?
3. Massas “proibidas”?

Pair Instability
Supernova:

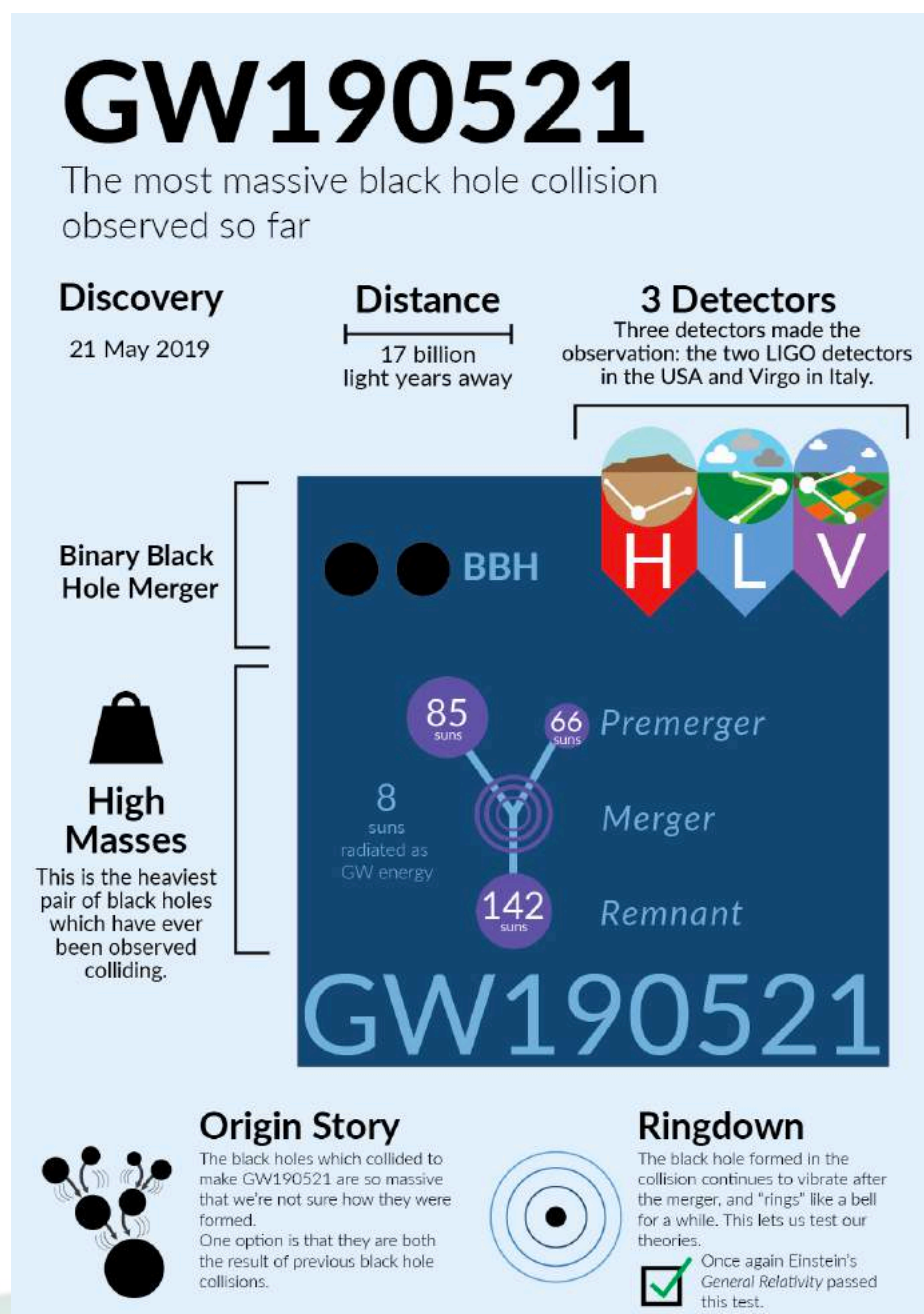
estrelas entre
 $\sim 150 - 230 M_{\odot} \dots$

... não produzem
buracos negros com
massas entre
 $\sim 50 - 70 M_{\odot}$ e
 $\sim 130 - 160 M_{\odot} \dots$



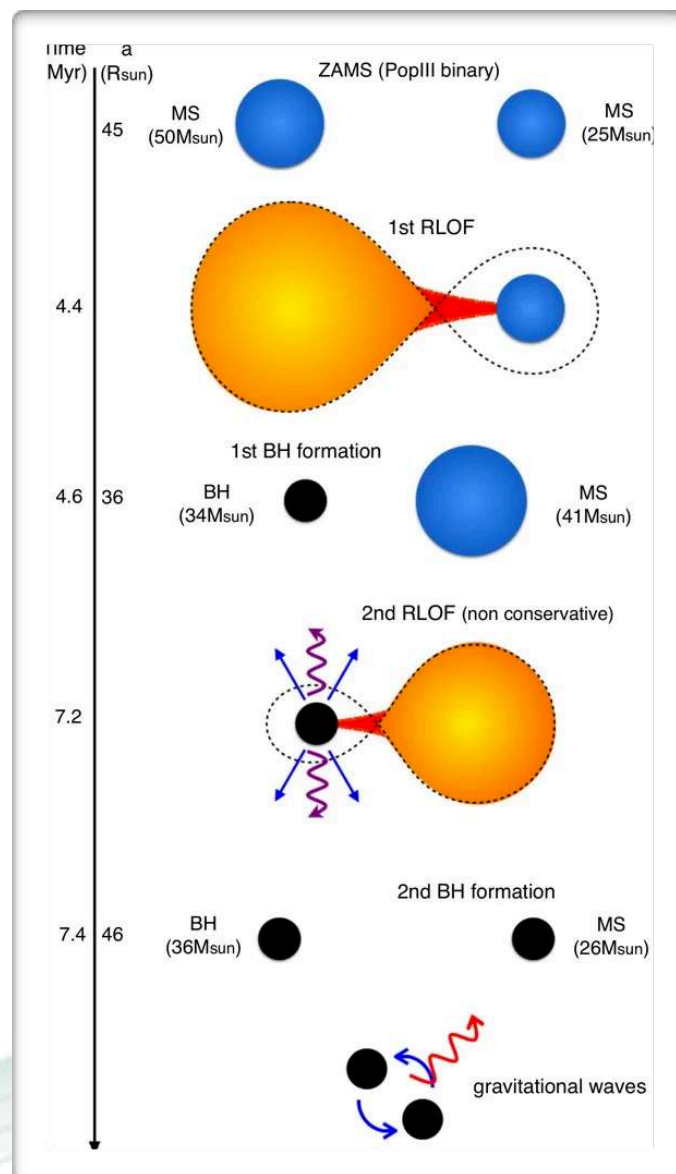
a explosão destrói
completamente a
estrela!

... mas buracos negros
com essas massas
podem ser formados a
partir de buracos
negros menores!

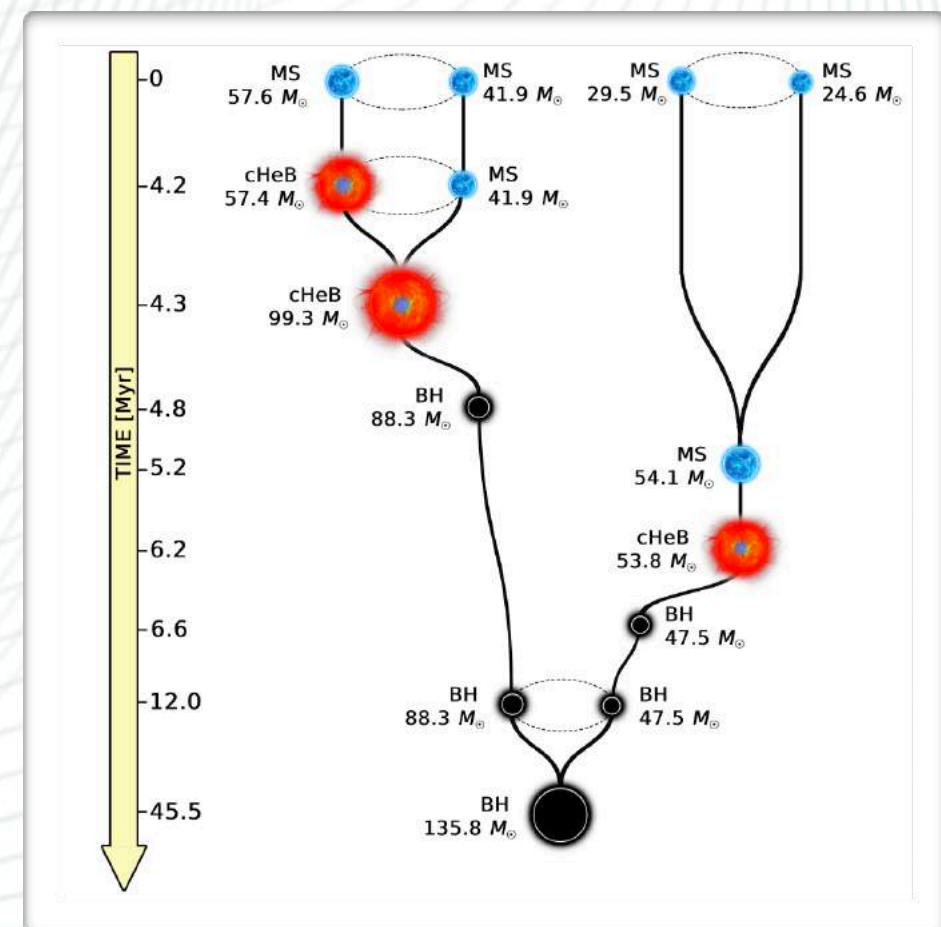


Como são formados os sistemas binários de buracos negros/estrelas de nêutrons?

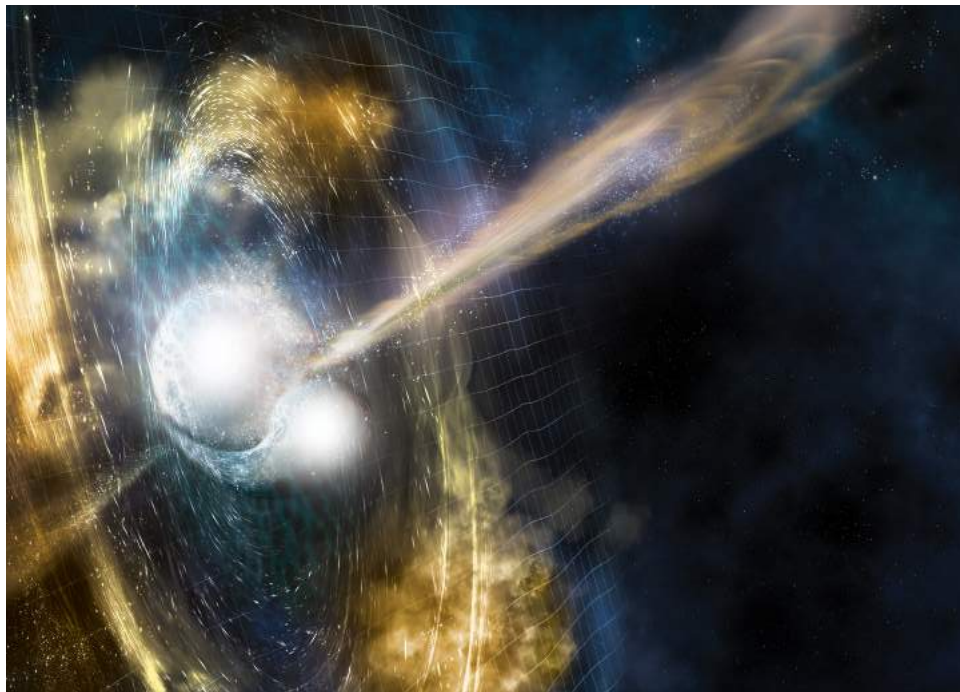
Possibilidade 1: evolução de um sistema binário isolado



Possibilidade 2: formação dinâmica do sistema binário



Colisões de estrelas de nêutrons



GW170817

Binary neutron star merger

A LIGO / Virgo gravitational wave detection with associated electromagnetic events observed by over 70 observatories.



Distance
130 million light years

Discovered
17 August 2017

Type
Neutron star merger

12:41:04 UTC

A gravitational wave from a binary neutron star merger is detected.

gravitational wave signal
Two neutron stars, each the size of a city but with at least the mass of the sun, collided with each other.

gamma ray burst

A short gamma ray burst is an intense beam of gamma ray radiation which is produced just after the merger.

+ 2 seconds

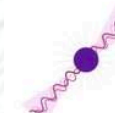
A gamma ray burst is detected.



GW170817 allows us to measure the expansion rate of the universe directly using gravitational waves for the first time.



Detecting gravitational waves from a neutron star merger allows us to find out more about the structure of these unusual objects.



This multimessenger event provides confirmation that neutron star mergers can produce short gamma ray bursts.



The observation of a kilonova allowed us to show that neutron star mergers could be responsible for the production most of the heavy elements, like gold, in the universe.



Observing both electromagnetic and gravitational waves from the event provides compelling evidence that gravitational waves travel at the same speed as light.

kilonova

Decaying neutron-rich material creates a glowing kilonova, producing heavy metals like gold and platinum.

+10 hours 52 minutes

A new bright source of optical light is detected in a galaxy called NGC 4993, in the constellation of Hydra.

+11 hours 36 minutes

Infrared emission observed.

+15 hours

Bright ultraviolet emission detected.

+9 days

X-ray emission detected.

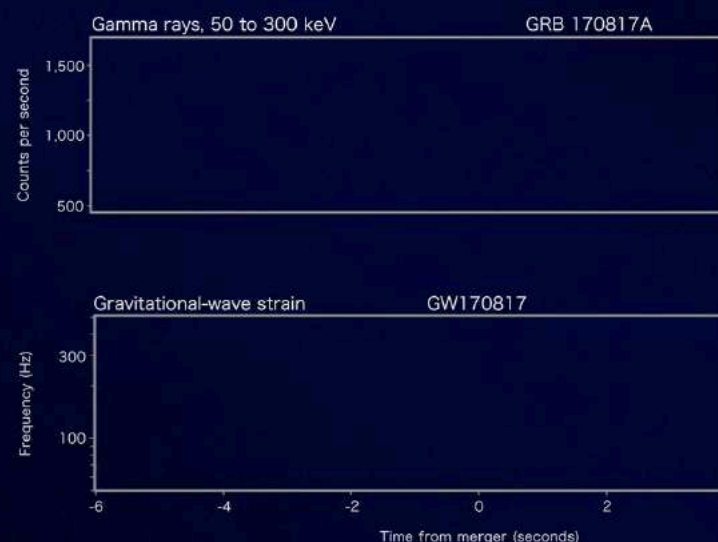
+16 days

Radio emission detected.

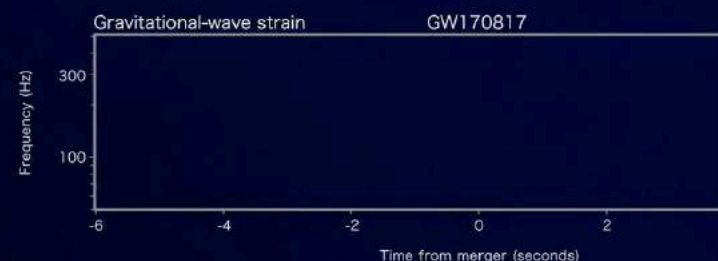
radio remnant

As material moves away from the merger it produces a shockwave in the interstellar medium - the tenuous material between stars. This produces emission which can last for years.

Fermi

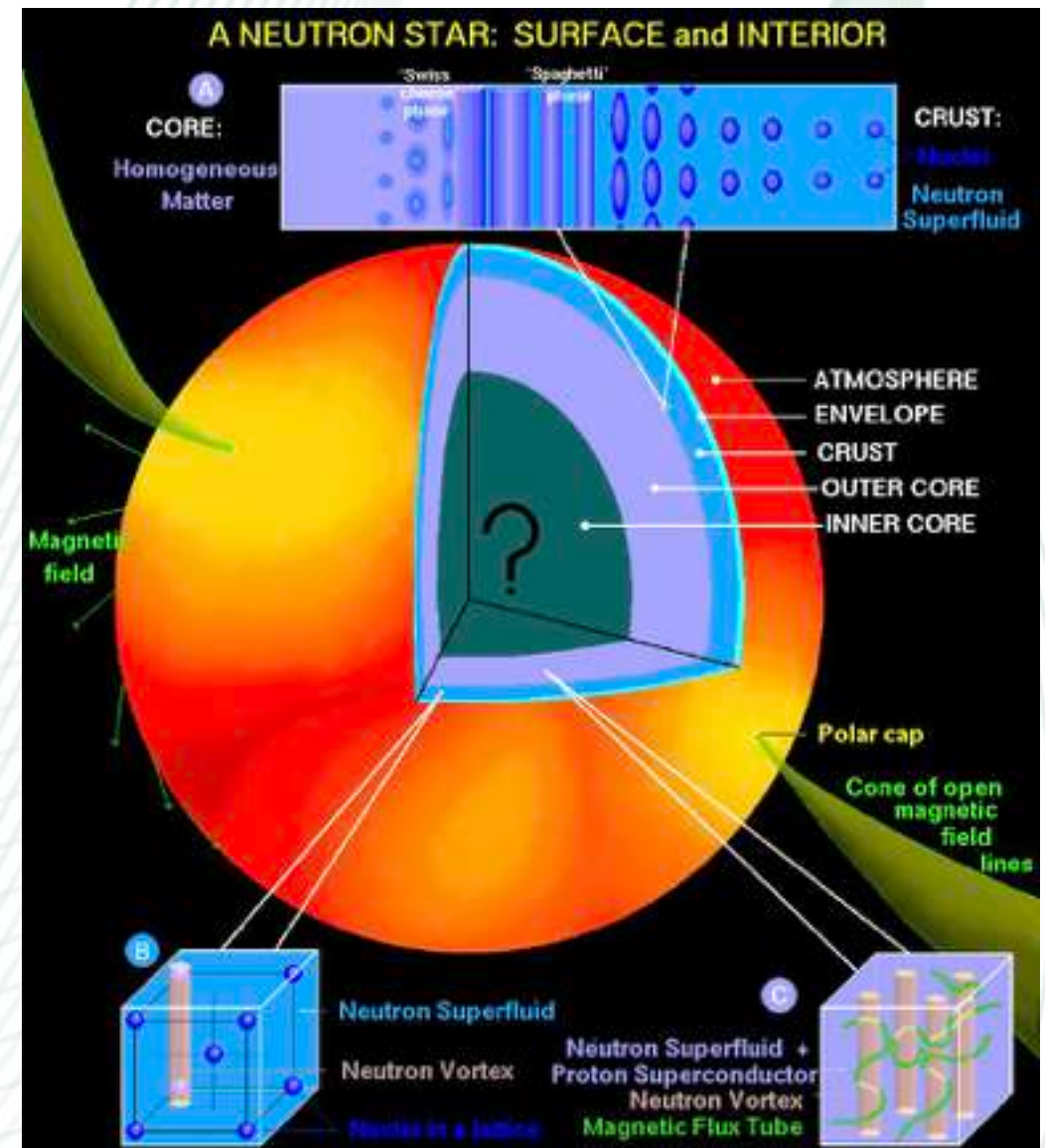
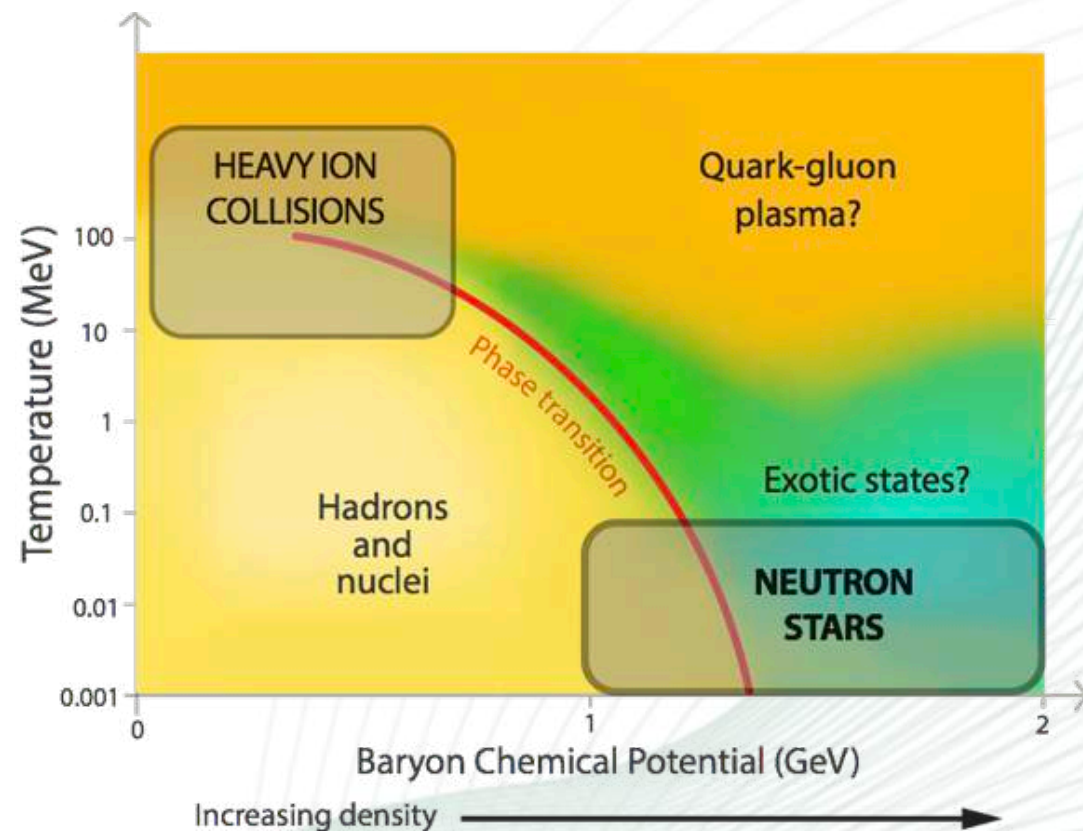


LIGO



Dentro de uma estrela de nêutrons

A densidade do núcleo de uma estrela de nêutrons é maior do que a densidade do núcleo do átomo



A composição é desconhecida:

- * Núcleons?
- * Matéria estranha?
- * Matéria de quarks?
- * Condensados?

O que acontece quando estrelas de nêutrons colidem?

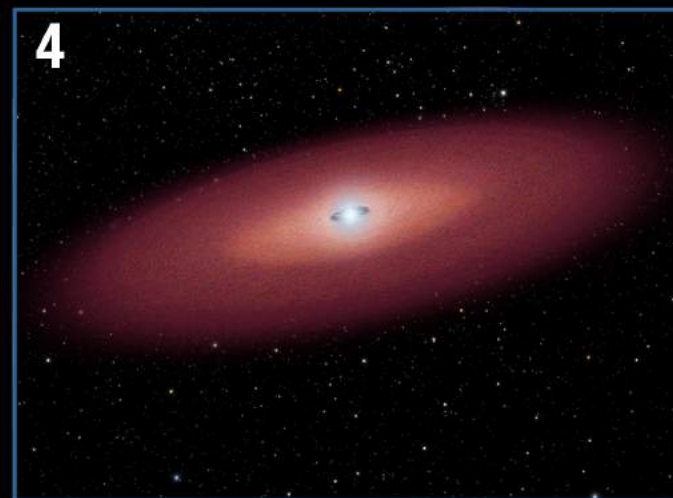
Inspiral



Short gamma-ray burst

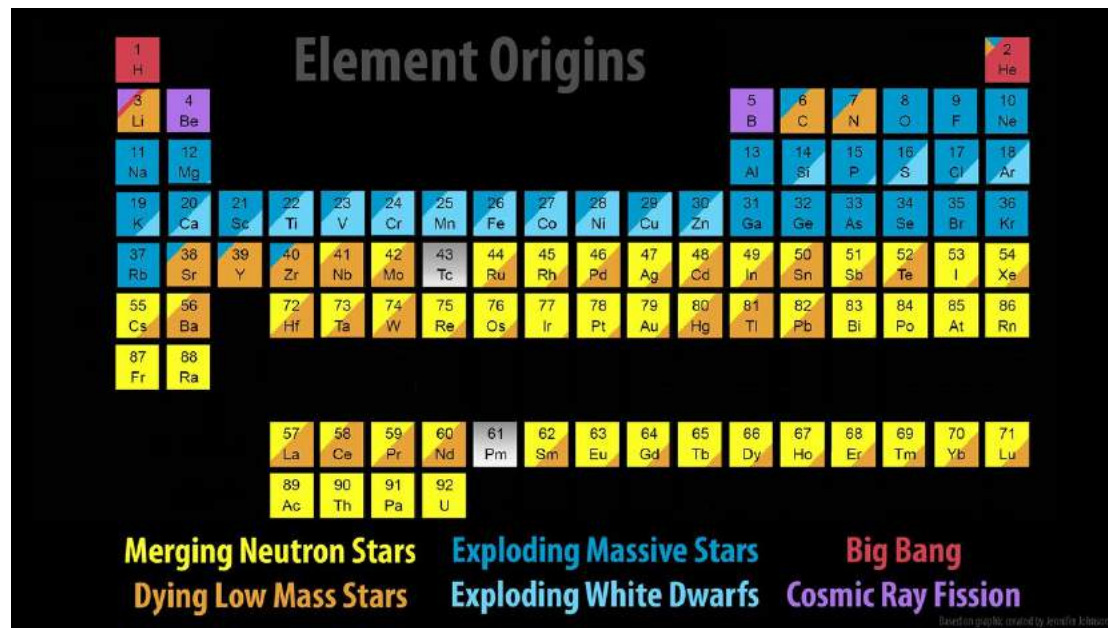


Kilonova

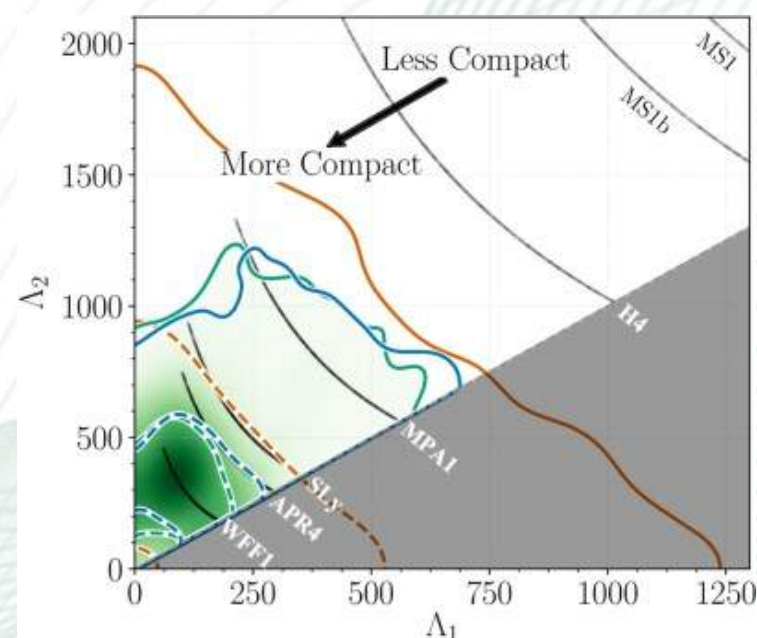


Remanescence + disco

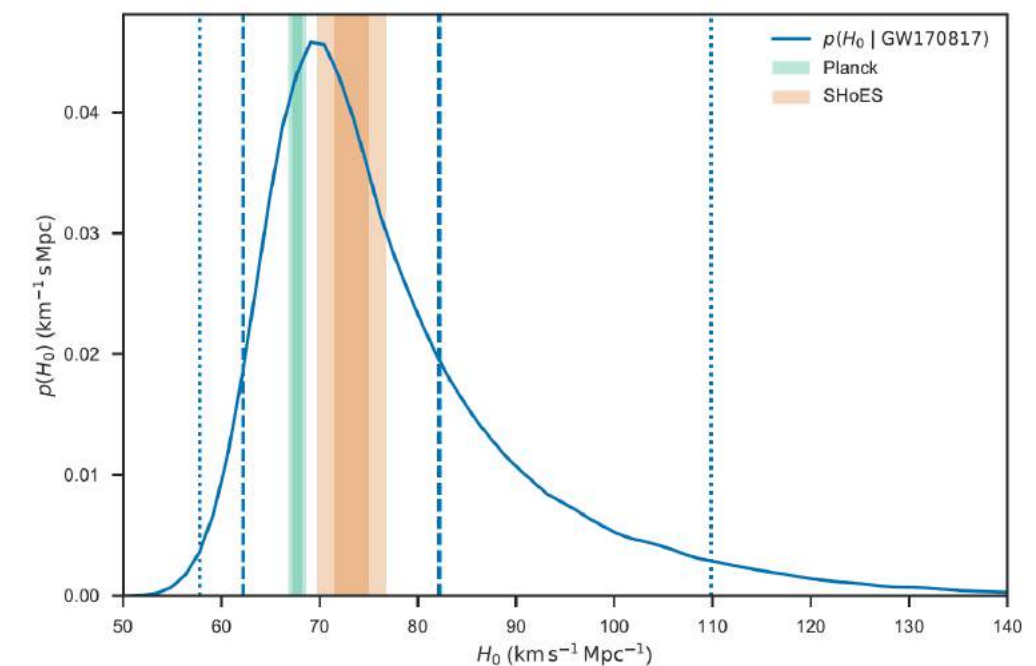
O que nós aprendemos com colisões de estrelas de nêutrons



Formação dos elementos pesados



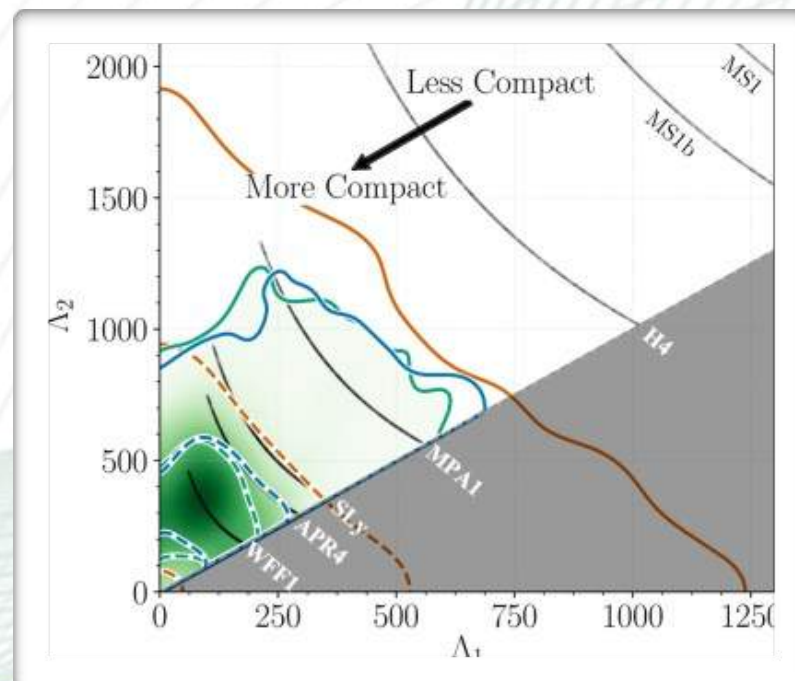
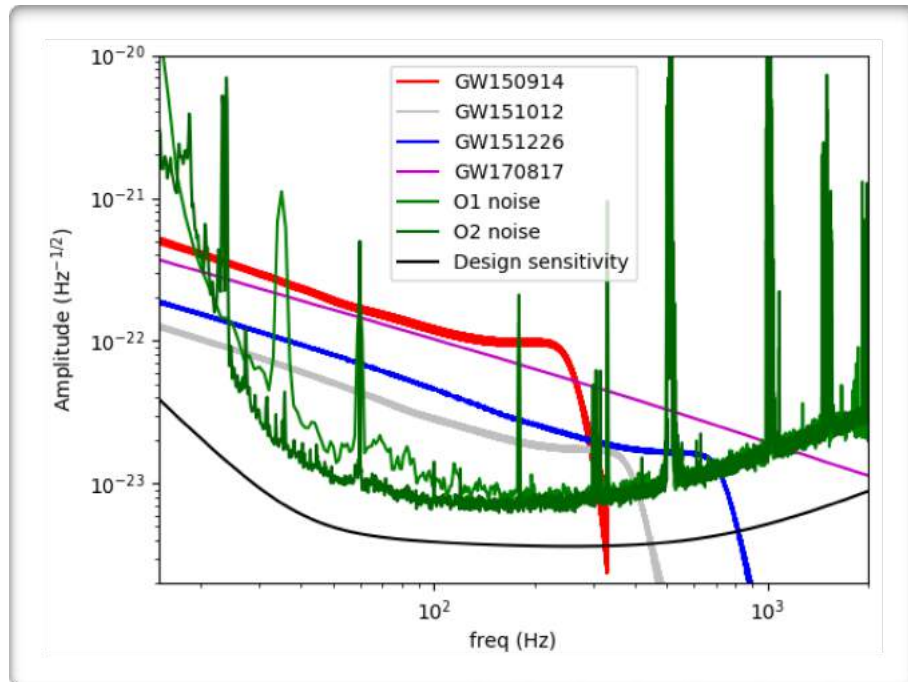
Determinação da constante de Hubble



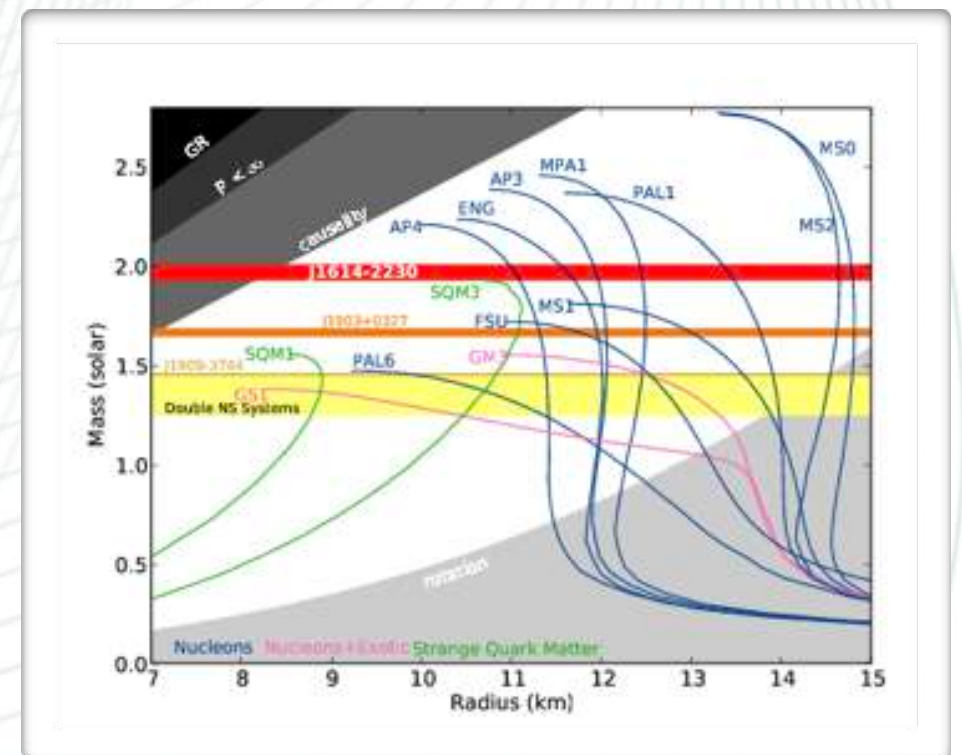
Composição das estrelas de nêutrons

Composição de uma estrela de nêutrons

Durante o inspiral, $f_{\max} \sim \sqrt{\frac{GM}{\pi^2 R^3}} \sim 1.2 \text{ kHz}$
Precisamos de mais sensibilidade nas altas frequências!



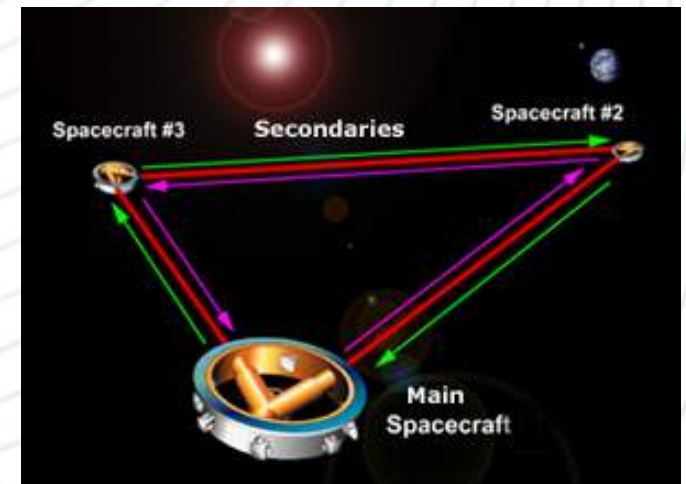
Deformação por forças de maré faz as estrelas colidirem mais cedo!



Estrelas menos compactas possuem raios maiores e são mais deformáveis

Conclusões

- Fiquem ligados! Mais novidades sobre ondas gravitacionais podem aparecer a qualquer momento...
- Um novo tipo de astronomia
- Objetos compactos: buracos negros, estrelas de nêutrons, e...?
- Futuro: nova geração de detectores, mais dados e, com certeza, mais surpresas!



LISA

Determinação de H_0

medido
desconhecido

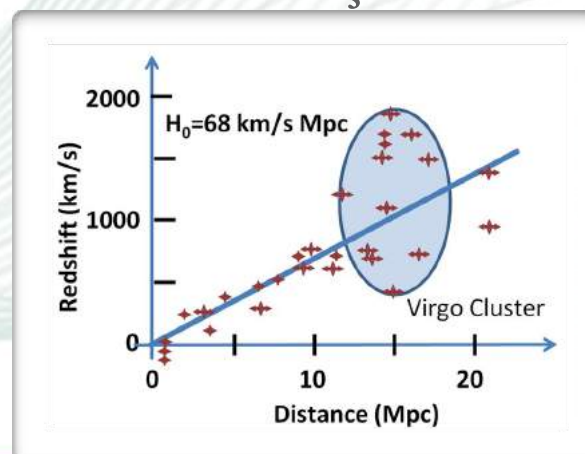
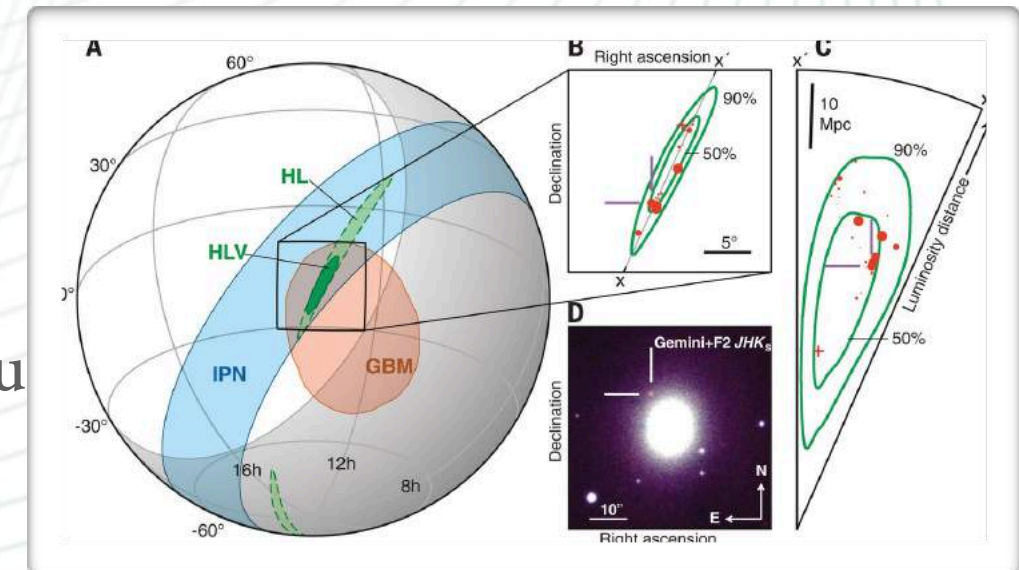
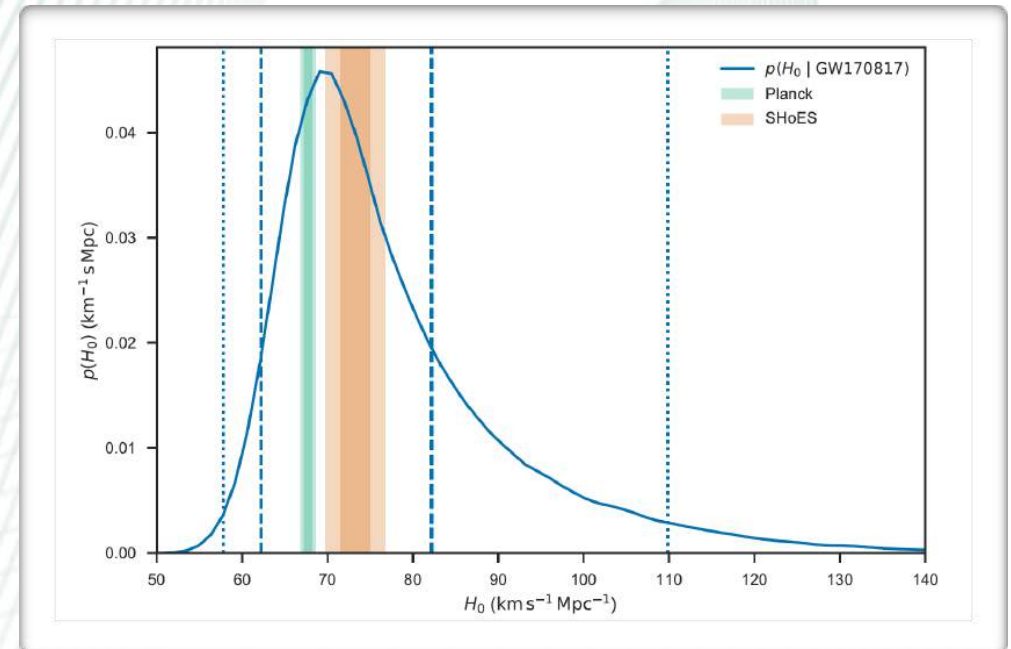
* Massa de Chirp $\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$

* Amplitude $A \propto \frac{\mathcal{M}^{5/3}}{D_L} F(\cos(i))$
ângulo de inclinação

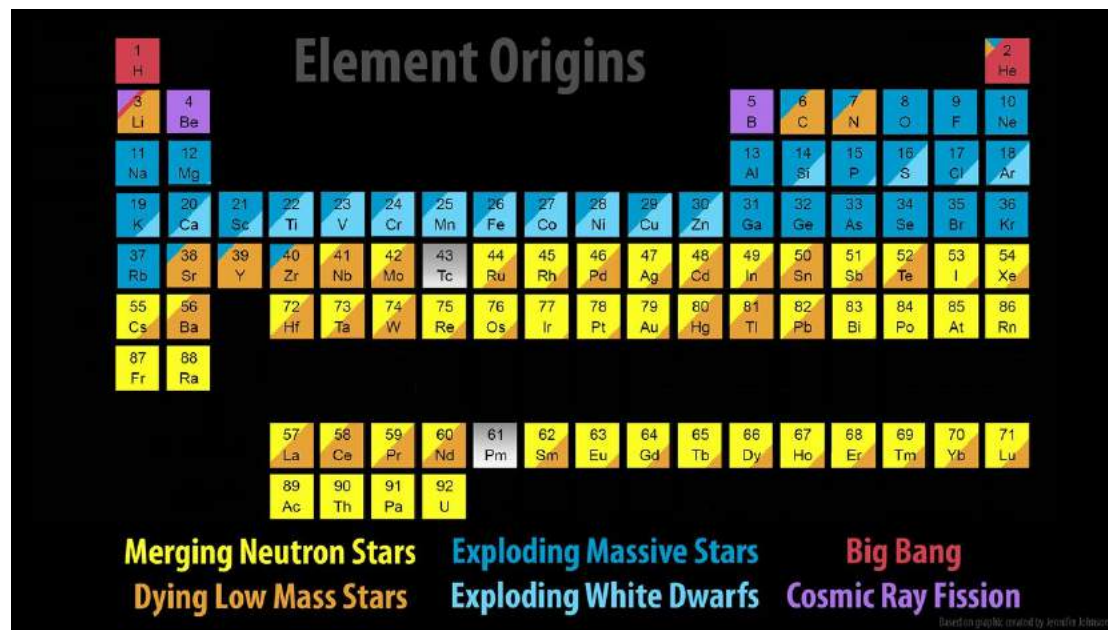
* Frequência $f \propto \mathcal{M}^{5/3} f^{11/3}$

* Distância de luminosidade D_L + localização no céu
permite obter o redshift z

Lei de Hubble $z \simeq \frac{H_0 D_L}{c}$



Formação de elementos pesados



GW170817 produziu o equivalente de 200 massas da Terra em ouro!

De onde vem os elementos formados pelo processo r?

Supernovas

Colisões de estrelas de nêutrons

Mais frequente

Menos frequente

Quantidade menor

Quantidade maior

