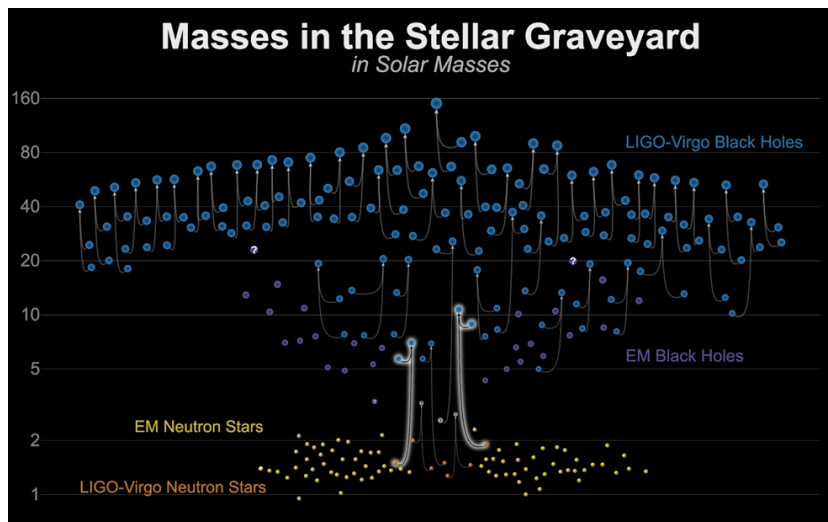


# NOVA FONTE DE ONDAS GRAVITACIONAIS: UMA ESTRELA DE NÊUTRONS E UM BURACO NEGRO

## O QUE DESCOBRIMOS?

Em 5 de Janeiro de 2020, o [Advanced LIGO](#), detector de [Livingston](#), Louisiana nos EUA e o [Advanced Virgo](#), o detector da Itália, observaram uma onda gravitacional consistente com uma fonte inédita nunca antes observada. Esse sinal foi produzido pela órbita mortal de dois dos mais extremos objetos do Universo: uma [estrela de nêutrons](#) (EN) e um [buraco negro](#) (BN). O LIGO e o Virgo observaram as últimas órbitas decadentes ([inspiral](#)), seguida da fusão desses objetos. Surpreendentemente, apenas dez dias depois, um segundo sinal de onda gravitacional de uma estrela de nêutrons com um buraco negro foi observado, desta vez pelos detectores do LIGO e pelo Virgo. Esta é a primeira vez que foram observadas ondas a partir de uma mistura de EN e BN (veja a Figura 1). Antes desta nova descoberta, ondas gravitacionais da fusão de pares de buracos negros e pares de estrelas de nêutrons já haviam sido observadas. Nossas novas descobertas foram apelidadas de **GW200105** e **GW200115**.

Essas duas descobertas representam a primeira detecção de um sistema binário formado por estrela de nêutron e buraco negro. Já se havia previsto a existência desses sistemas, mas sem nenhuma evidência observacional convincente. Com essas novas observações nós agora vimos todos os três tipos de sistemas binários que se podem formar a partir de buracos negros e estrelas de nêutrons, conhecidos como “binários compactos” ([compact binaries](#)). Essas novas descobertas, junto com observações futuras de binários compactos, irão esclarecer questões sobre o nascimento, vida e morte de estrelas, bem como sobre o meio em que se formam.



**Figura 1:** Vemos aqui uma carta (ou um cemitério estelar, se você preferir) com as massas de estrelas de nêutrons e buracos negros medidas por meio de ondas gravitacionais e observações eletromagnéticas. Os pontos marcados em amarelo e roxo representam as medições de massa feitas para estrelas de nêutrons e buracos negros usando o espectro eletromagnético, respectivamente, enquanto os marcadores laranja e azul são as medições correspondentes usando ondas gravitacionais. Nossos sinais, GW200105 e GW200115, são destacados como a fusão de estrelas de nêutrons com buracos negros. (Crédito da imagem: LIGO-Virgo & Frank Elavsky, Aaron Geller, Northwestern University)

## DETECTANDO SINAIS DE ONDAS GRAVITACIONAIS

A busca de sinais de ondas gravitacionais nos dados registrados pelos detectores usa a “filtragem combinada” ([matched filtering](#)). Esse método compara os dados observados repletos de ruído com os sinais previstos pela [Relatividade Geral](#) de Einstein. O [matched filtering](#) pode detectar os sinais de ondas gravitacionais de dados ruidosos de uma forma semelhante a como podemos distinguir instrumentos individuais em uma peça musical. Nós consideramos que **GW200115** é um sinal de ondas gravitacionais de origem astrofísica com uma confiança muito alta. A chance de que **GW200105** seja gerada por algum ruído aleatório nos dados é menor que é menor que **1 em 100.000 anos**. Determinar a origem astrofísica do sinal estatisticamente é ainda um desafio, mas ele também se destaca claramente frente aos efeitos de ruído que já vimos, além de considerarmos que a probabilidade de esse sinal ocorrer devido a algum ruído ser menor que **1 vez a cada 2,8 ano**.

Visite nossos sites:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



As fusões e binários BN-EN podem, em princípio, produzir luz em todo o [espectro eletromagnético](#). Infelizmente, a direção das fontes no céu só pôde ser medida de forma muito imprecisa, uma área entre 2.400 e 29.000 vezes o tamanho da lua cheia. Somando isso com a grande distância até a fonte (discutida em mais detalhes abaixo), a observação de luz eletromagnética acabou sendo improvável e nenhuma foi observada. Observações futuras de fusões BN-EN podem produzir luz, o que poderia revelar o buraco negro “rompendo por força de maré” (rasgando) a estrela de nêutrons. Isso poderia fornecer informações sobre a forma extrema de matéria que constitui as estrelas de nêutrons.

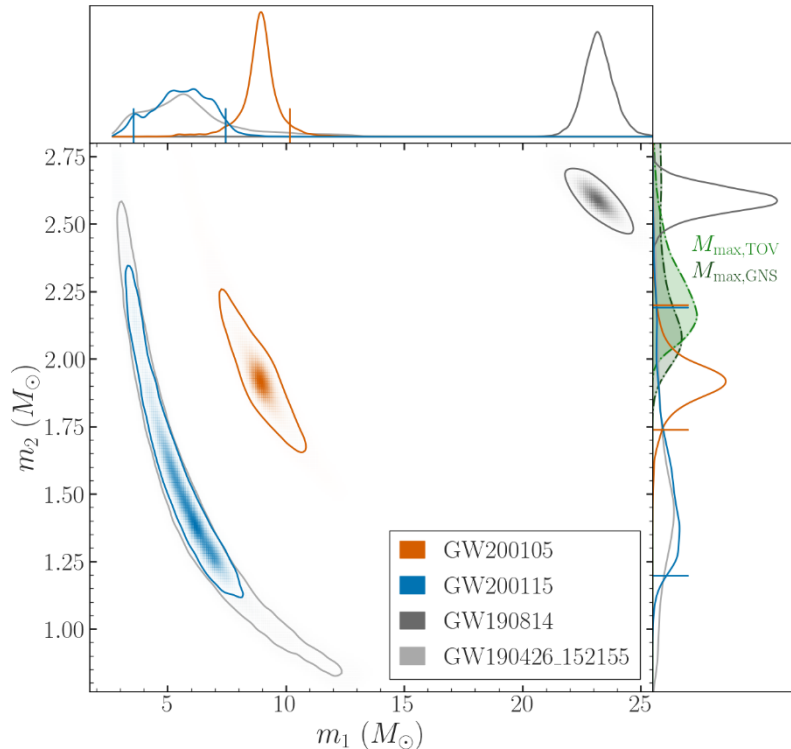
## PROPRIEDADES DAS FONTES

As ondas gravitacionais codificam informações valiosas sobre sua origem como, por exemplo, as massas dos dois objetos que se fundiram. O buraco negro (BN) e a estrela de nêutrons (EN) que criaram GW200105 são cerca de 8,9 vezes e 1,9 vezes mais massivos que nosso Sol ( $M_{\odot}$ ), respectivamente. A GW200105 ocorreu a cerca de 800 milhões de anos atrás, centenas de milhões de anos antes da aparição dos primeiros dinossauros da Terra. Já para GW200115, estima-se que o BN possuía uma massa de  $5.7 M_{\odot}$  e  $1.5 M_{\odot}$  para a EN, tendo ocorrido a fusão há quase um bilhão de anos. As massas estão representadas na **Figura 2**.

Descobrimos que o spin do buraco negro para GW200105 pode estar entre 0 e até 30% da taxa de rotação máxima para buracos negros, enquanto para GW200115, o spin fica entre 0 e 80% da taxa máxima. Não temos fortes evidências de rotação de estrela de nêutrons porque nossas medições não são sensíveis a ela (veja a **Figura 3**).

Por que achamos que observamos a fusão de EN-BN? Para produzir as ondas gravitacionais observadas, os objetos têm que ser muito compactos e densos se comparado com estrelas típicas, do contrário, eles se desmanchariam antes de se fundirem. A massa dos objetos mais massivos são de  $8.9 M_{\odot}$  e  $5.7 M_{\odot}$  e os únicos objetos conhecidos

com essas massas são buracos negros. As massas dos objetos menos massivos são de  $1.9 M_{\odot}$  e  $1.5 M_{\odot}$ , o que é muito menor que qualquer buraco negro conhecido. Essas massas são consistentes com as estrelas de nêutrons conhecidas, como aquelas observadas na [Via Láctea](#) ou detectadas por ondas gravitacionais (como [GW170817](#)). As massas dos buracos negros são consistentes com as previsões de modelos de formação e evolução estelar.



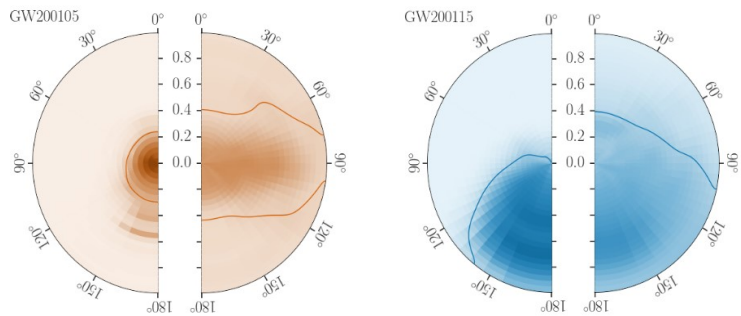
**Figura 2:** Resumo do nosso conhecimento das massas dos componentes dos objetos que produziram GW200105 e GW200115. O eixo horizontal representa a massa do objeto mais pesado (os buracos negros), enquanto o eixo vertical representa a massa do objeto mais leve (as estrelas de nêutrons). O sombreamento de cor indica combinações de massa consistentes com os dados, laranja para o primeiro evento e azul para o segundo. Um sombreamento mais escuro indica uma melhor concordância, ou seja, uma probabilidade mais alta para tais combinações de massa. O painel superior resume as informações sobre a massa do buraco negro, com - por exemplo, a curva azul mostrando que o buraco negro em GW200115 tinha uma massa em algum lugar entre  $\sim 3.5 M_{\odot}$  e  $\sim 7.5 M_{\odot}$ . O painel direito resume as informações sobre a massa da estrela de nêutrons - por exemplo, a curva laranja neste painel indica que a estrela de nêutrons do GW200105 tinha uma massa entre  $1.75 M_{\odot}$  e  $2.2 M_{\odot}$ . Os sombreados verdes no painel direito resumem o conhecimento astronômico atual sobre a massa de estrelas de nêutrons, mostrando que nossos objetos observados têm massas pequenas o suficiente para serem estrelas de nêutrons. A figura também mostra informações sobre duas descobertas anteriores de ondas gravitacionais: GW190814, que é provavelmente a fusão de um buraco negro de  $23 M_{\odot}$  com outro de  $2.5 M_{\odot}$  (o mais leve já observado); e GW190426\_152155, um sinal que se parece com um sistema EN-BN, mas é tão fraco que não está claro se é de origem astrofísica.

# COMO ELES SE FORMAM E O QUÃO FREQUENTEMENTE ISSO ACONTECE?

Então como esses sistemas NSBH se formaram? Existem duas possibilidades. Uma delas começa com duas estrelas orbitando uma a outra. As estrelas têm massas que, quando envelhecem, acabam explodindo em supernovas, uma estrela deixando para trás um buraco negro e a outra deixando uma estrela de nêutrons. Isso é chamado de “evolução binária isolada”. A outra possibilidade é que as estrelas de nêutrons e os buracos negros se formem separadamente em explosões de supernovas não relacionadas e só depois se encontrem. Isso é chamado de “interação dinâmica” e pode ocorrer em ambientes estelares densos, como [aglomerados globulares](#). Para distinguir entre essas duas possibilidades, as orientações de spin dos buracos negros fornecem uma boa dica. Na evolução binária isolada, a direção de rotação dos BN tende a se alinhar com a órbita do sistema, ou seja, esperamos que a EN orbite no plano equatorial do BN. Em contraste, o cenário de interação dinâmica não prefere uma direção particular do spin e, portanto, a órbita da EN pode ter qualquer orientação em relação ao plano equatorial do BN.

Os spins do BN inferidos de GW200105 não nos permitem distinguir qualquer um desses cenários de formação. No entanto, para GW200115, descobrimos que a direção de rotação do BN é provavelmente oposta à direção da órbita do sistema binário. Por exemplo, se a EN orbita BN no sentido horário, o BN giraria em seu eixo no sentido anti-horário. Isso sugere que a origem do GW200115 pode ter se formado em um ambiente denso, como um aglomerado globular.

Quantos sistemas BN-EN no Universo se fundem em um determinado período de tempo? A observação dos dois sistemas NSBH nos dizem que de 5 a 15 desses sistemas se fundem por ano a uma distância de um bilhão de anos-luz. Além disso, essa taxa de fusão estimada pode ser explicada pela evolução binária isolada ou pela interação dinâmica em aglomerados de estrelas jovens, mas não podemos destacar um cenário específico para explicar essa taxa.



**Figure 3:** A magnitude do spin inferida com a direção dos buracos negros (hemisférios esquerdos) e estrelas de nêutrons (hemisférios direitos) de GW200105 e GW200115. O raio do disco indica a magnitude do spin e varia de 0 (sem spin) a 1 (taxa de rotação máxima dos buracos negros). A direção do giro é mostrada como um ângulo, que varia de 0° (objetos giram na mesma direção da órbita do sistema binário) a 180° (objetos giram na direção oposta da órbita do sistema binário). O sombreamento indica os valores prováveis da magnitude e direção do spin. O hemisfério mais à esquerda tem sombreamento que atinge o pico próximo ao centro, indicando que o BH de GW200105 tem um spin que é provavelmente pequeno. O segundo sombreamento do hemisfério direito se estende para baixo, indicando que o BH de GW200115 pode estar girando em uma direção oposta ao movimento orbital.

## SAIBA MAIS

Visite nossos sites: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu), [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

Você pode ler o artigo em preprint [aqui](#) e mais sobre ondas gravitacionais [aqui](#).

**Traduzido para o Português por Juliédson Artur Malaquias Reis.**

Você pode ler o original (em inglês) [aqui](#).

## GLOSSÁRIO

**Inspirar:** O movimento orbital de objetos em um sistema binário, como um binário estrela de nêutron-buraco negro. À medida que o binário perde energia ao emitir ondas gravitacionais, a estrela de nêutrons e o buraco negro orbitam cada vez mais rápido e se aproximam cada vez mais até que finalmente se fundem.

**Estrela de Nêutrons:** remanescente de uma estrela massiva que atingiu o fim de sua vida. Quando uma estrela massiva esgota seu combustível nuclear, ela morre de forma catastrófica - uma supernova - que geralmente resulta na formação de uma estrela de nêutrons: um objeto tão massivo e denso que os átomos não podem sustentar sua estrutura como normalmente os percebemos na terra. Essas estrelas são quase tão massivas quanto o nosso Sol, mas têm apenas algumas dezenas de quilômetros de diâmetro.

**Buracos Negros:** Uma região do espaço-tempo com uma gravidade tão intensa que nada consegue escapar, mesmo a luz. [Buracos negros](#) são de diferentes tamanhos: [buracos negros estelares](#) são orundos do colapso de estrelas e suas massas vão de algumas massas solares até 65 massas solares. [Buracos negros de massa intermediária](#) vão de 100 massas solares até 10<sup>5</sup> massas solares. Finalmente, [buracos negros supermassivos](#) vão de 10<sup>6</sup> massas solares até 10<sup>9</sup> massas solares.

**Binário Compacto:** um sistema de dois remanescentes estelares compactos, como EN e BN orbitando muito próximos uns dos outros.

**Matched filtering:** Uma técnica para detectar sinais ocultos em dados ruidosos. Os modelos de formas de onda gravitacionais calculados a partir da relatividade geral são varridos nos dados e soam quando padrões correspondentes são encontrados nos dados.

**Relatividade Geral:** A teoria da gravidade proposta por Albert Einstein em 1915. Nessa teoria, o espaço e o tempo são como um tecido maleável que se deforma na presença de matéria e energia, e os objetos seguem trajetórias neste espaço curvo.

**Aglomerado Globular:** um grupo muito denso de estrelas unidas pela gravidade.

**Espectro eletromagnético:** a luz visível se estende do vermelho ao violeta, mas fora da faixa que nossos olhos podem ver, esse espectro continua. Além da luz vermelha há infravermelho, microondas e ondas de rádio, e além da violeta há ultravioleta, raios X e raios gama. Este é o espectro da radiação eletromagnética, e os astrônomos usam cada parte do espectro para aprender mais sobre o Universo. Toda radiação eletromagnética assume a forma de ondulações em campos elétricos e magnéticos e diferem em sua frequência ou comprimento de onda.

**Ano-luz:** uma unidade de distância equivalente à distância que a luz viaja em um ano. Um ano-luz é aproximadamente igual a 9,46 trilhões de quilômetros.

**M<sub>⊙</sub> (massa solar):** é a massa do Sol (cerca de 2x10<sup>30</sup> quilogramas). É uma unidade de massa comum em Astronomia.

**Lacuna de massa:** Uma lacuna na população de buracos negros sugerida pela escassez de observações de objetos compactos com massas entre 2.5M<sub>⊙</sub> e 5M<sub>⊙</sub>.