

# SISTEMAS BINÁRIOS DE BURACOS NEGROS NOS FALAM DA EXPANSÃO DO UNIVERSO

O universo em que vivemos está se expandindo. Isso faz com que galáxias distantes e outros objetos se afastem de nós. A constante de Hubble é um dos números fundamentais que descrevem o universo como o vemos hoje. Ela nos diz quão rápido os objetos no universo estão se afastando de nós e, portanto, quão rápido está o universo se expandindo. Geralmente se coloca em unidades de quilômetros por segundo por megaparsec. Quer isto dizer que, quanto mais distantes, mais rápidos os objetos se afastam de nós. Foi na década de 1920 que cientistas como [Alexander Friedmann](#), [Georges Lemaître](#) e [Edwin Hubble](#) teorizaram e verificou-se que as galáxias locais seguem esta “lei”; e agora, ~ 100 anos depois, os astrofísicos refinaram a estimativa original do Hubble para ~ 70 km / s / Mpc. Duas das abordagens tradicionais de medição da constante de Hubble, entretanto, começaram a discordar, dando origem a um desafio conhecido como [tensão de Hubble](#). É aqui que as abordagens de ondas gravitacionais recentemente implementadas para medir a expansão do universo podem ajudar.

Em 17 de agosto de 2017, os interferômetros LIGO-Virgo detectaram pela primeira vez o sinal de onda gravitacional de uma fusão de estrela de nêutrons binária, GW170817. Notícias desta detecção circularam rapidamente para observatórios eletromagnéticos que foram capazes de identificar com segurança a galáxia à qual o sinal pertencia. Este evento então permitiu uma nova medição da constante de Hubble sugerida pela primeira vez em um artigo de 1986 por Bernard Schutz.

A detecção da onda gravitacional por si só nos diz a que distância o sinal está, mas as medições eletromagnéticas da galáxia hospedeira nos dizem o quão rápido ele está se afastando de nós, também conhecido como desvio para o vermelho (*redshift*). Com essas duas informações, de objetos que estão razoavelmente próximos de nós como GW170817, apenas 40 Megaparsecs, somos capazes de medir diretamente a constante de Hubble. A incerteza nas medições de distância são grandes, em grande parte devido à nossa falta de conhecimento de como a órbita do sistema está orientada em relação à nossa visão do sinal. Podemos restringir a constante de Hubble a uma precisão de ~ 15% com GW170817. Esta medição está de acordo com todas as estimativas principais atuais (o que é reconfortante), mas ainda não desafia nenhuma delas.

A poderosa demonstração de GW170817 para cosmologia de ondas gravitacionais foi apenas o começo. Potencialmente, cada sinal de coalescência binária compacta detectado por meio de ondas gravitacionais pode fornecer sua própria medição independente da constante de Hubble. Quando combinadas, essas medições reduzem nossa incerteza porque o ruído estatístico dominante pode ser medido.

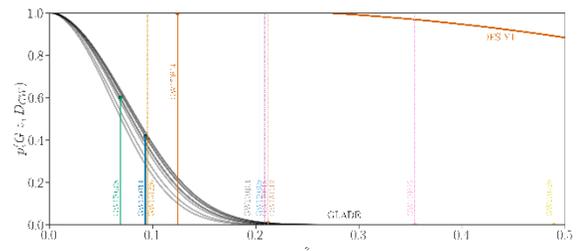
Desde o início da era de detecção avançada de ondas gravitacionais, a Colaboração LIGO-Virgo relatou a detecção de 10 sinais binários de buracos negros observados na primeira e na segunda execuções de observação ( [GWTC-1](#) ). A análise dos dados da primeira metade da terceira corrida observacional revelou 39 detecções de ondas gravitacionais adicionais ( [GWTC-2](#) ); muitos outros eventos candidatos preliminares estão presentes nos dados da segunda metade da terceira corrida de observação. No artigo apresentado aqui, mostramos como todos os buracos negros binários GWTC-1 podem ser combinados para melhorar nossa estimativa inicial da constante de Hubble GW170817. A parte difícil e nova desta análise é que para nenhum dos outros eventos temos uma galáxia hospedeira (única) identificada. Nesses casos, seguimos o exemplo do artigo original de Bernard Schutz e usamos as informações de localização do céu fornecidas por cada uma das detecções de ondas gravitacionais. Quando uma coalescência é detectada em vários detectores é possível determinar a localização no céu de onde o sinal se originou. Para os sistemas mais pesados, como de buracos negros, a incerteza de localização nos permite restringir a origem a uma área que varia de algumas dezenas a alguns milhares de graus quadrados (a lua cheia cobre ~ 0,2 graus quadrados). Podemos então fazer uso de catálogos de galáxias existentes para selecionar aquelas galáxias que poderiam ser possíveis hospedeiros dentro da região de incerteza. Para cada *redshift*, podemos calcular uma constante de Hubble e, em seguida, fazer a média de todas as galáxias possíveis. Esta média amplia nossa incerteza final sobre a constante de Hubble obtida de cada evento de onda gravitacional, mas nos permite combinar todos os eventos de fusão de buracos negros. Ao combinar várias medições, começa-se a reduzir a incerteza geral que, com eventos suficientes, compensa o problema de calcular a média de possíveis galáxias hospedeiras.

## MAIS DETALHES

Um dos principais problemas da análise é o dos efeitos da seleção. Esses são os casos em que as limitações de um dispositivo de medição afetam as propriedades da população de sinal que você mede. Tanto para os detectores de ondas gravitacionais quanto para os telescópios eletromagnéticos, os sinais muito distantes se tornam muito fracos para serem detectados. Para detectores de ondas gravitacionais, também somos mais sensíveis a sistemas de massa elevada, com a exceção de que sistemas muito pesados se fundem em frequências muito baixas para serem detectadas. Por outro lado, os catálogos de galáxias obtidos com telescópios convencionais podem naturalmente incluir apenas galáxias até um certo limite de brilho.

## FIGURAS DA PUBLICAÇÃO

Para maiores informações, você pode encontrar e ler o artigo em [preprint](#) disponível gratuitamente.



**Figura 1** (Fig. 1 no artigo): Comparando a localização dos eventos GW com dois catálogos de galáxias usados em nossa análise, esta figura mostra a probabilidade de que a galáxia hospedeira do evento seja incluída no catálogo, em função de redshift. Para o catálogo de galáxias GLADE, essa probabilidade é mostrada para cada evento individual, mostrada como curvas pretas. Para o catálogo de galáxias DES-Y1, apenas uma curva (laranja) é mostrada, válida para o pedaço de céu que cobre GW170814. Cada curva é independente do valor da constante de Hubble ( $H_0$ ). As linhas verticais mostram o desvio para o vermelho médio estimado para cada evento, assumindo um modelo cosmológico correspondente aos resultados de 2015 da sonda Planck. Para exemplificar, essas linhas são desenhadas grossas e sólidas até onde cruzam a curva do catálogo de galáxias, depois são finas e tracejadas.

Visite nossos Sites:

<http://www.ligo.org>

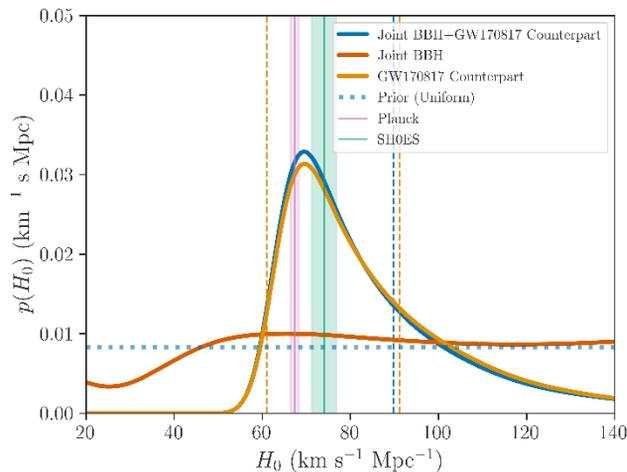
<http://www.virgo-gw.eu>



Um dos principais problemas abordados nesta análise é como podemos fazer uma medição imparcial se sabemos que há uma boa chance de que a galáxia hospedeira de uma fonte de onda gravitacional em particular seja muito fraca para ser incluída em nosso catálogo de galáxias eletromagnéticas. Este é o caso de quase todas as nossas detecções de buracos negros binários. O objetivo final da cosmologia de ondas gravitacionais é fazer medições de parâmetros cosmológicos com precisões que correspondam ou excedam aquelas feitas apenas por observações eletromagnéticas. Devemos, portanto, considerar cuidadosamente os efeitos de seleção estatística muito sutis que estão presentes.

## MAIS DETALHES AINDA

Esta última análise usa todos os 11 eventos de coalescência detectados com segurança encontrados com os detectores LIGO-Virgo durante a primeira e a segunda execuções de observação. Todos, exceto um, eram sinais de buracos negros binários e exigiam o uso da abordagem estatística para obter estimativas de constantes de Hubble. O outro evento, a fusão de estrelas de nêutrons, se destacou como o mais informativo de todas as abordagens estatísticas de detecções para obter estimativas de constantes de Hubble, pela razão principal de ter um sinal de contrapartida eletromagnética que nos permite medir o *redshift* da galáxia única hospedeira. Por esta razão, a estimativa da constante de Hubble de GW170817 domina o resultado combinado. No entanto, um dos eventos de buraco negro binário, GW170814, descoberto apenas 3 dias antes da estrela de nêutrons binária, também faz uma contribuição significativa para o resultado final. Este evento foi um dos mais fortes detectados e também teve uma região de localização no céu particularmente pequena, uma vez que foi detectado usando todos os 3 detectores avançados (LIGO Hanford, LIGO Livingston e Virgo). Isso significava que a incerteza extra de muitas galáxias hospedeiras possíveis foi reduzida (uma vez que uma área menor contém menos galáxias). Além disso, também aconteceu de estar localizado no topo da mesma região do céu observada pela DES (Dark Energy Survey) no eletromagnético. Esta pesquisa foi extremamente sensível e, portanto, inclui galáxias muito distantes e muito fracas para *redshifts* além do esperado para este evento. Isso conseqüentemente melhora a qualidade de nossa informação de *redshift* para esta fonte e resulta em uma estimativa melhorada de forma semelhante (em comparação com os outros buracos negros binários) da constante de Hubble.



**Figura 3** (Fig. 4 do artigo): A medição de  $H_0$  por meio de ondas gravitacionais (azul escuro) a partir das detecções combinadas nas duas primeiras corridas observacionais do LIGO e Virgo, novamente mostrado como curvas de distribuição de probabilidade posterior. A estimativa da fusão de estrelas de nêutrons binárias GW170817 (laranja) vem da identificação de sua galáxia hospedeira (NGC4993). A contribuição adicional para a curva azul ligeiramente mais íngreme vem de buracos negros em associação com catálogos de galáxias. Para GW170814, usamos o catálogo de galáxias DES-Y1, enquanto para os cinco pares de buracos negros restantes, GW150914, GW151226, GW170104, GW170608 e GW170809, usamos o catálogo GLADE. Os intervalos contendo 68% da probabilidade posterior para cada distribuição são indicados com linhas tracejadas verticais. Todos os resultados novamente assumem um prior em  $H_0$  uniforme no intervalo [20,140] km/s/Mpc (linha horizontal azul pontilhada). Também mostramos os mesmos resultados de comparação de Planck (Aghanim et al. 2020) e observações de supernova (SHOES: Riess et al. 2019) como na figura anterior.

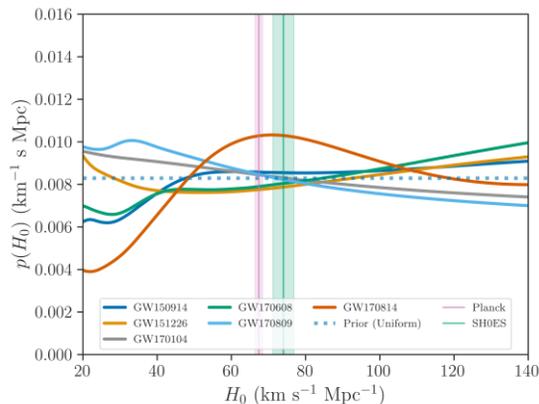
## SAIBA MAIS

Visite nossos websites: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

Leio o artigo gratuitamente e online [aqui](#)

Explore o catálogo de dados [aqui](#) no [Gravitational Wave Open Science Center](#)

Traduzido para o Português por Juliédson Artur Malaquias Reis. Você pode ler o original (em inglês) [aqui](#).



**Figura 2** (Fig. 3 no artigo): Estimativas individuais da constante de Hubble ( $H_0$ ) das seis detecções de fusão de buracos negros mais íntensas selecionadas para esta análise. Os resultados são apresentados como curvas de distribuição de probabilidade posterior. A análise começou assumindo que  $H_0$  está limitado ao intervalo [20, 140] km/s/Mpc e igualmente provável de assumir qualquer valor neste intervalo (linha horizontal azul pontilhada rotulada "Prior (Uniform)") e fez certas suposições sobre as propriedades populacionais de fusão de buracos negros em sistemas binários no universo. Para comparação, também mostramos as estimativas independentes de  $H_0$  de duas medições convencionais de ondas não gravitacionais: a RCF com o satélite Planck (Aghanim et al. 2020) e observações de supernova (SHOES: Riess et al. 2019). Os resultados GW de eventos individuais de buracos negros binários são relativamente amplos, mas consistentes com esses outros resultados.

## RESUMO

O resultado final desta nova análise melhora a medição da constante de Hubble inferida da fusão de estrelas de nêutrons binárias GW170817, reduzindo nossa incerteza em 4%. A estimativa que inclui todos os eventos da primeira e da segunda execução de observação é que a constante de Hubble  $H_0 = 69_{-8}^{+16}$  km/s/Mpc e ainda é consistente com as medições feitas com observações da radiação cósmica de fundo em micro-ondas e supernovas. No entanto, é claro que os buracos negros binários, uma vez que não identificaram contrapartidas no eletromagnético, nos fornecem informações cosmológicas mais fracas em comparação com estrelas de nêutrons. No entanto, fica claro a partir desta análise que todos os eventos de fusão, embora informativos, podem ser combinados para melhorar a medição final. Com novas detecções chegando cada vez mais frequentemente após cada atualização ou expansão da rede de detectores de ondas gravitacionais, é apenas uma questão de tempo antes que as medições cosmológicas de ondas gravitacionais se tornem competitivas com outras abordagens e comecem a fornecer uma visão independente e valiosa.

## GLOSSÁRIO

**Buraco negro:** uma região do espaço-tempo causada por uma massa extremamente compacta onde a gravidade é tão intensa que impede que qualquer coisa escape, incluindo a luz.

**Estrela de nêutrons:** um remanescente extremamente denso do colapso de uma estrela massiva.

**Megaparsec (Mpc):** Um milhão de parsecs. Um parsec é uma unidade astronômica de comprimento correspondente a aproximadamente 3 anos-luz ou 30 trilhões de quilômetros.

**Redshift:** Aumento no comprimento de onda (de som, luz ou ondas gravitacionais) devido ao movimento da fonte em relação ao observador. Devido à expansão cosmológica do universo, objetos como galáxias estão se afastando de nós, e a luz e outras radiações eletromagnéticas provenientes deles têm um comprimento de onda maior.

**Probabilidade posterior:** a probabilidade de certos valores de uma determinada propriedade física após a análise de nossos dados, estimados por meio de um processo conhecido como inferência bayesiana.