

ÚLTIMAS RESTRIÇÕES À EXPANSÃO CÓSMICA E À RELATIVIDADE GERAL COM ONDAS GRAVITACIONAIS

Numa nova publicação [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK), atualizamos o que sabemos sobre a velocidade a que o Universo se está a expandir e testamos se a gravidade se comporta conforme previsto pela [teoria da relatividade geral de Einstein](#). Com a mais recente divulgação de dados de LVK, o GWTC-5.0 (Catálogo de Transientes de Ondas Gravitacionais, *Gravitational Wave Transient Catalog* em inglês, versão 5.0), temos agora 236 [deteções de ondas gravitacionais \(OGs\)](#) que podem ser usadas para explorar o que acontece no Universo nas suas maiores escalas. Isto perfaz mais 94 deteções do que as usadas na nossa publicação de cosmologia anterior, baseada no [GWTC-4.0](#), disponibilizado em agosto de 2025. Um dos nossos principais objetivos ao usar estes dados é medir a [constante de Hubble](#), H_0 , que indica a rapidez com que o Universo se está a expandir atualmente. O valor preciso desta taxa de expansão ainda é incerto, uma vez que diferentes métodos de medição apresentam resultados (frequentemente muito) diferentes. A nossa medição atualizada de $H_0 = 71,0^{+9,0}_{-7,1}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹ é agora 25,7% mais precisa do que a do GWTC-4.0. No entanto, estas medições ainda são menos precisas do que as obtidas através de métodos há muito consolidados, que utilizam apenas observações de [radiação eletromagnética](#). O nosso outro objetivo principal é testar se as ondas gravitacionais realmente se comportam de acordo com a relatividade geral. Até agora, não encontramos qualquer indício de desvios em relação à relatividade geral. Contudo, no futuro, esperamos que as deteções de OGs permitam realizar testes de cosmologia e gravitação cada vez mais competitivos em relação a outros métodos, fornecendo novas e importantes formas de melhorar a nossa compreensão do Universo.

CONTEXTO CIENTÍFICO

Graças aos incríveis avanços tecnológicos ao longo do último século, a cosmologia desenvolveu-se numa disciplina científica madura. Esta estuda o Universo nas suas maiores escalas e tem como objetivo responder a questões fundamentais como: Como é que o Universo começou? Como mudou ao longo do tempo? De que forma a matéria, a energia e a gravidade moldam a sua evolução?

Hoje em dia, o modelo teórico padrão usado para descrever o Universo é conhecido como “[modelo Lambda de Matéria Escura Fria](#)” (LCDM, do inglês *Lambda Cold Dark Matter*). Baseado na [relatividade geral](#) de Einstein, este modelo explicou com sucesso uma vasta gama de observações astronómicas numa imagem única e coerente. Contudo, permanecem muitas questões em aberto, sugerindo que o LCDM poderá não fornecer uma descrição completa do Universo, deixando em aberto a possibilidade de novas e empolgantes descobertas.

Um dos maiores enigmas por explicar na cosmologia é o valor da [constante de Hubble](#) H_0 , a taxa de expansão do Universo. Desde a década de 1920 que sabemos que [o Universo está em expansão](#) – todos os objetos no Universo estão a ser subtilmente afastados uns dos outros, como pontos na superfície de um balão em expansão (ver [Figura 1](#)). Ao longo do último século, muitos cientistas têm tentado medir exatamente a que velocidade o Universo se tem expandido com resultados contraditórios até aos dias de hoje. As medições da nossa [vizinhança cósmica](#) dão-nos um valor para a taxa de expansão, mas medições independentes, baseadas em [sinais emitidos perto do início do Universo](#), apontam com segurança para um valor diferente. Após muito debate, é provável que a diferença entre estas duas medições não possa ser explicada apenas por erros de medição. Esta discrepância, conhecida como [tensão de Hubble](#), é um indício de que o modelo LCDM poderá não ser um modelo completo e de que uma física desconhecida poderá ser responsável por esta divergência. É aqui que as OGs entram em cena. Ao utilizá-las, podemos efetuar uma nova medição da constante de Hubble e de outros parâmetros cosmológicos totalmente independente, acrescentando uma nova voz ao debate sobre a tensão de Hubble e, no futuro, talvez ajudando a resolvê-la.

As OGs dão-nos uma forma direta de medir distâncias no Universos, sem depender da complexa “escada de distâncias cósmicas” utilizada para a medição de distâncias na nossa vizinhança cósmica. À medida que estas ondas viajam pelo espaço, enfraquecem com a distância. Ao analisar o sinal e compará-lo com as previsões da relatividade geral, podemos estimar a sua intensidade no momento em que foi emitido e compará-lo com o que observamos na Terra, de forma a determinar a que distância a fonte se encontra.

Por este motivo, as fontes de OGs são frequentemente apelidadas de “sirenes padrão” – uma referência às “velas padrão” (objetos com luminosidade intrínseca conhecida, como as supernovas do tipo Ia) que os astrónomos usam há muito tempo para medir distâncias cósmicas. Com a expansão do Universo faz com que as galáxias distantes se afastem de nós, podemos combinar a distância de uma fonte de OGs com informações sobre a velocidade a que a sua galáxia hospedeira se está a afastar. Isto permite-nos estimar a taxa de expansão do Universo. Mais do que isso, as OGs permitem-nos testar se a relatividade geral funciona como esperamos, mesmo às maiores distâncias possíveis. Por exemplo, algumas teorias alternativas da gravitação preveem pequenas alterações na forma como as OGs viajam pelo espaço. Estas alterações poderiam afetar a intensidade com que os sinais nos parecem chegar e, conseqüentemente, a forma como inferimos as distâncias. No nosso estudo, testámos várias teorias desse tipo.

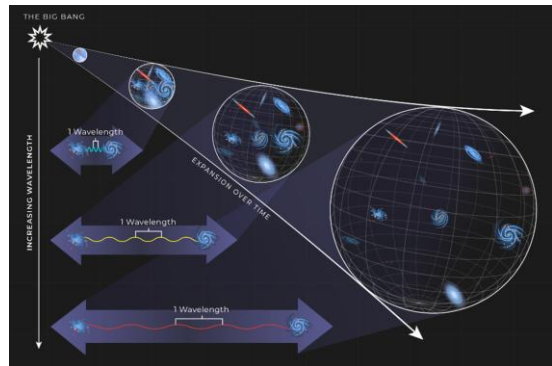


Figura 1: Ilustração de como a expansão do Universo alonga a luz e as ondas gravitacionais ao longo do tempo. Movendo-nos da esquerda para a direita, o Universo aumenta de tamanho e as galáxias ficam cada vez mais afastadas umas das outras. Ao mesmo tempo, as ondas que viajam pelo espaço (mostradas na parte inferior) são esticadas para comprimentos de onda maiores, como indicado pelo eixo “comprimento de onda crescente” à esquerda. Este efeito, conhecido como [desvio para o vermelho](#), aplica-se tanto à luz como às OGs emitidas por fontes distantes. [Crédito: NASA Scientific Visualization Studio]

MÉTODOS

Embora um sinal de OG nos permita calcular a distância à sua fonte, não é tão fácil descobrir a que velocidade essa fonte se está a afastar de nós (o que chamamos “velocidade de recessão”). A melhor forma de determinar a velocidade de recessão de um objeto é através da medição do seu [desvio para o vermelho](#), uma consequência do desvio de Doppler sofrido pela luz ou por outra radiação devido à expansão cósmica. Isto exigiria que identificássemos a localização exata da galáxia que alberga a fonte da OG e a observássemos utilizando um telescópio com um instrumento especializado chamado [espectrógrafo](#).

Apenas conseguimos identificar com sucesso a fonte exata de um sinal de OG uma única vez: no caso do evento [GW170817](#), observado a 17 de agosto de 2017. Este evento foi provocado pela colisão de duas [estrelas de neutrões](#), resultando tanto num sinal de OG como numa explosão (chamada kilonova) que foi visível a partir da Terra. Assim que a galáxia hospedeira ([NGC 4993](#)) foi identificada e o seu desvio para o vermelho medido, este evento foi usado para fazer a [primeira medição da constante de Hubble com OGs](#). A esta abordagem chamamos o método de “sirene brilhante”.

No entanto, na maioria dos casos, não sabemos qual a galáxia que alberga uma fonte de OG, mas o sinal indica-nos aproximadamente a sua origem no céu. Podemos então considerar todas as galáxias nessa região recorrendo a grandes catálogos, atribuindo a cada uma delas uma probabilidade de ser a fonte. Ao combinarmos os seus desvios para o vermelho, ponderados por essas probabilidades, conseguimos efetuar uma medição estatística da constante de Hubble. A isto dá-se o nome de método da “sirene escura” baseado em catálogos de galáxias.

Paralelamente aos catálogos de galáxias, é também importante modelar como as massas das fontes de OGs estão distribuídas. De forma crucial, a distribuição observada das propriedades das fontes difere da sua verdadeira população subjacente. Isto acontece, em parte, devido à natureza dos nossos detetores, que têm maior probabilidade de captar certas fontes (como as mais massivas ou as mais próximas) do que outras (mais leves ou mais distantes). Além disso, se a história da expansão do Universo ou as leis da gravitação fossem diferentes (por exemplo, se a [energia escura](#) tivesse propriedades inesperadas), isso alteraria a relação das propriedades das fontes entre as populações reais e as observadas. Ao comparar as propriedades esperadas para a população de fontes com as observadas, e contabilizando cuidadosamente a diferente probabilidade de deteção, ou “[viés de seleção](#)”, é-nos possível medir propriedades cosmológicas, como a constante de Hubble, mesmo sem utilizar catálogos de galáxias. A isto dá-se o nome de método da “sirene espectral”.

Quando combinamos os métodos espectral e de catálogos de galáxias, podemos utilizar a informação sobre as distribuições tanto de galáxias como de OGs para obtermos uma medição melhorada e unificada com base em sirenes escuras. Embora uma sirene escura individual forneça uma medição muito menos precisa do que o método da sirene brilhante, temos muito mais sirenes escuras do que brilhantes, o que significa que o nosso resultado combinado para as sirenes escuras atinge uma precisão semelhante. O nosso resultado final para a constante de Hubble combina todos estes métodos numa medição completa de sirenes padrão a partir de toda a informação de OGs disponível.

RESULTADOS

A [Figura 2](#) mostra as [distribuições de probabilidade a posteriori](#) para o valor de H_0 para diferentes combinações do conjunto de dados do GWTC-5.0. A curva a preto mostra o resultado mais preciso, combinando as sirenes escuras com a sirene brilhante GW170817. A partir da posição e largura do pico da curva, obtemos $H_0 = 71,0^{+9,0}_{-7,1}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹. Aqui, os números em subscripto e sobrescrito indicam o nosso erro nesta medição para um [nível de credibilidade](#) de 68%.

Os nossos resultados representam uma melhoria de 25,7% na precisão face à [nossa análise da anterior divulgação de dados LVK](#), principalmente devida à inclusão de um maior número de eventos. Os eventos adicionais permitem que a distribuição de massas das fontes de OGs seja restringida com muito maior rigor.

A melhoria com a inclusão dos catálogos de galáxias é de 7,4% adicionais em relação às sirenes espectrais, em linha com a melhoria comparável alcançada com os catálogos de galáxias no GWTC-4.0.

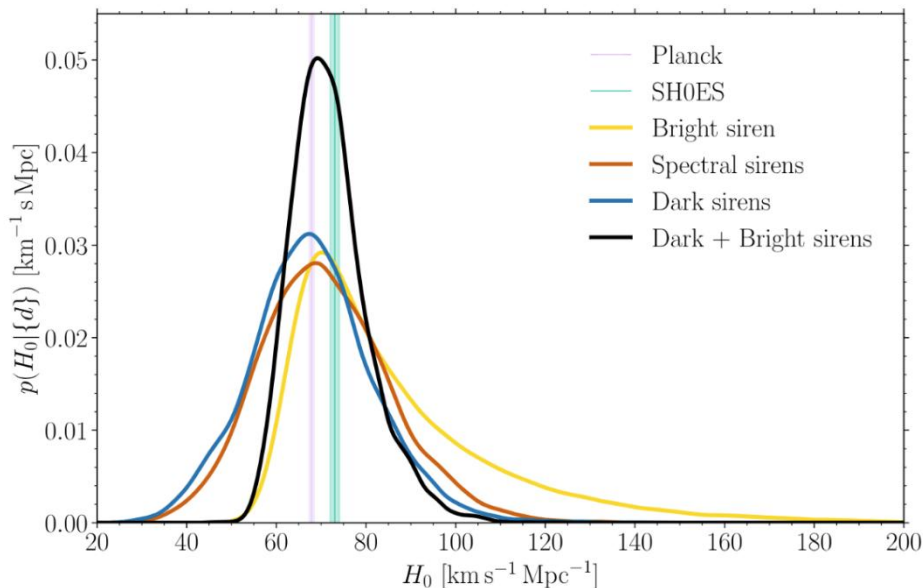


Figura 2. (Figura 4 da nossa publicação) A nossa medição da constante de Hubble (H_0). A melhor estimativa provém da combinação da análise de sirenes escuras com o resultado da sirene brilhante do evento GW170817 (a preto). Para comparação, são também apresentados os resultados apenas com sirenes escuras (a azul), com sirenes espectrais (a laranja) e com a única sirene brilhante (a amarelo).

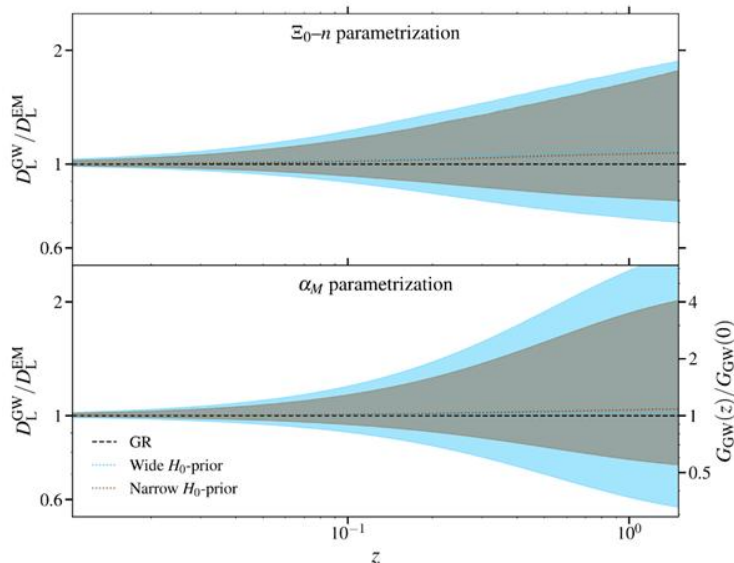
PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web:
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



A **Figura 3** apresenta as nossas restrições a possíveis desvios em relação à relatividade geral na forma como as OGs se propagam num universo em expansão. Especificamente, examinamos a razão entre a distância medida a partir da OG (assinalada como D_L^{GW}) e a distância que seria medida a partir de uma deteção luminosa associada (associada como D_L^{EM}). Se a relatividade geral estiver correta, estas duas medidas de distância deverão coincidir exatamente, pelo que a sua razão deverá ser igual a um para todos os desvios para o vermelho. Testamos esta razão utilizando dois modelos diferentes, que representam duas formas distintas de interação entre a gravidade e a energia escura, e estabelecemos limites para os respetivos parâmetros dos modelos. Os painéis superior e inferior da Figura 3 mostram os resultados para cada modelo, que se encontram em concordância entre si.

Figura 3. (Figura 7 da nossa publicação) Razão entre a distância medida a partir de fontes de OGs e a distância que seria medida a partir de uma emissão eletromagnética da mesma fonte, em função do desvio para o vermelho da fonte, para dois modelos diferentes que representam duas formas distintas de interação entre a gravidade e a energia escura. Os painéis superior e inferior referem-se a duas formas paramétricas diferentes adotadas para descrever este efeito, onde, se a teoria da relatividade geral for válida, se espera que as duas distâncias sejam iguais, de modo que a sua razão seria identicamente igual a um para todos os desvios para o vermelho (linha tracejada a preto). As faixas coloridas mostram as restrições obtidas a partir do GWTC-5.0 para um [nível de credibilidade](#) de 90%. As faixas a azul representam o caso em que não assumimos qualquer informação prévia (ou 'prior') sobre a constante de Hubble, ao passo que as faixas a castanho representam o caso em que assumimos que H_0 se encontra próximo dos seus valores medidos anteriormente. Os nossos resultados são consistentes para ambos os painéis, superior e inferior, e não encontramos indícios de desvios em relação à relatividade geral.



RESUMO E PERSPETIVAS FUTURAS

Utilizando o conjunto de dados do GWTC-5.0, obtemos uma nova e independente medição da constante de Hubble, juntamente com restrições melhoradas a possíveis desvios em relação à relatividade geral.

A nossa melhor estimativa para a constante de Hubble é $H_0 = 71.0^{+9.0}_{-7.1} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, que é 25,7% mais precisa do que a obtida com o GWTC-4.0. Este valor é totalmente consistente com medições há muito consolidadas, provenientes tanto da nossa vizinhança cósmica como do início do Universo, mas ainda não é suficientemente preciso para resolver a tensão entre essas medições.

O método da sirene espectral (que utiliza a distribuição de massas das fontes de OGs) é atualmente a principal fonte de precisão para as sirenes escuras. A informação adicional proveniente dos catálogos de galáxias melhora a medição em 7,4%, de forma semelhante ao alcançado no GWTC-4.0. A restrição aplicada às sirenes espectrais escala inversamente com a raiz quadrada do número de eventos, o que significa que cada evento adicional proporciona uma melhoria cada vez menor. Isto motiva a preparação de melhores catálogos de galáxias e de dados de OGs para a futura divulgação de dados, o GWTC-6.0.

O nosso estudo não encontra qualquer desvio em relação à relatividade geral nas maiores escalas, com restrições que são agora cerca de 20 a 50% mais rigorosas do que os limites anteriores, dependendo do modelo.

Estes resultados mostram que, com mais dados a caminho e métodos estatísticos robustos já implementados, a cosmologia de OGs está bem posicionada para abordar algumas das maiores questões em aberto na física moderna.

PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Lê uma pré-impressão de acesso livre do artigo científico [aqui](#) ou no [arxiv](#).

Os dados relativamente ao GWTC-5.0 foram publicados pelo Gravitational-Wave Open Science Centre [aqui](#).

Traduzido para o português por Tiago Fernandes e revista por Inês Rainho a partir da versão original em inglês disponível [aqui](#).

GLOSSÁRIO

- **Megaparsec (Mpc):** unidade de distância habitualmente usada em cosmologia. Um megaparsec é igual a um milhão de parsecs, em que um parsec equivale a cerca de três anos-luz e um quarto, ou $3,086 \times 10^{16}$ metros.
- **Constante de Hubble:** uma medida da rapidez com que o Universo se está a expandir. O seu valor atual é denotado pelo símbolo H_0 (onde o '0' indica o tempo presente). O seu valor medido é de cerca de $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, o que significa que por cada megaparsec (cerca de 3 milhões de anos-luz) de distância, uma galáxia parece afastar-se de nós cerca de 70 km s^{-1} mais rápido.
- **Desvio para o vermelho:** aumento do comprimento de onda (do som, da luz ou das ondas gravitacionais) devido ao movimento da fonte em relação ao observador. Devido à [expansão cosmológica do Universo](#), objetos como galáxias estão a afastar-se de nós, e a luz e outras radiações provenientes destes apresentam um comprimento de onda maior.
- **Distribuição de probabilidade a posteriori:** gráfico ou representação que mostra a probabilidade dos diferentes valores de uma dada grandeza física, após a análise dos nossos dados e tendo também em conta qualquer informação prévia (ou *prior*) disponível sobre essa grandeza, estimada através de um processo conhecido como [inferência Bayesiana](#).