

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

Numa publicação recente da [LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#), apresentamos novas medições da [constante de Hubble \(\$H_0\$ \)](#) e restrições sobre possíveis desvios da [teoria da relatividade geral](#) de Einstein em escalas cosmológicas. Usamos dados de 76 eventos de ondas gravitacionais recém-detetados na primeira parte do quarto período de observação LVK, adicionando-os aos catálogos anteriormente disponíveis, que juntos compõem o novo [Catálogo de Transientes de Ondas Gravitacionais GWTC-4.0](#). Ao analisar sinais de ondas gravitacionais de 142 fontes de [coalescência de binários compactos](#), medimos diretamente a [distância de luminosidade](#) de cada binário e as massas com desvio para o vermelho dos seus dois objetos compactos. Usando características da distribuição de massa de buracos negros e estrelas de neutrões, e a distribuição de potenciais galáxias hospedeiras do catálogo de galáxias [GLADE+](#) dentro do volume de localização de cada onda gravitacional, obtemos informações estatísticas sobre o [desvio para o vermelho](#) da fonte. A combinação dessas estimativas de distância e desvios para o vermelho fornece restrições independentes à constante de Hubble, livres da tradicional [escala de distâncias cósmicas](#). Além disso, estabelecemos novos limites para modificações na propagação das ondas gravitacionais que poderiam indicar uma física para além da relatividade geral. Esses resultados demonstram o crescente poder da cosmologia de ondas gravitacionais para medir independentemente a taxa de expansão do Universo e testar as leis fundamentais que o regem.

SIRENES PADRÃO, EXPANSÃO CÓSMICA E ENERGIA ESCURA

Na década de 1920, Georges Lemaître e Edwin Hubble fizeram a descoberta revolucionária de que o Universo está em expansão (ver [Figura 1](#)). Desde então, o estudo do Universo, conhecido como cosmologia, tornou-se uma disciplina rica e independente que visa explicar como o Universo se formou e evoluiu usando um modelo definido apenas por alguns parâmetros fundamentais. Hoje, este modelo é conhecido como “[Lambda CDM](#)” e é considerado o “Modelo Padrão” da cosmologia. Tem como base a [teoria da relatividade geral](#) de Einstein.

No entanto, ainda hoje, a cosmologia moderna enfrenta grandes questões em aberto. Um dos maiores enigmas diz respeito a um dos parâmetros-chave do Modelo Padrão da cosmologia: a constante de Hubble, ou H_0 . Este número (expresso em unidades de quilômetros por segundo por [Megaparsec \(Mpc\)](#), $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$) descreve a rapidez a que o Universo local está a expandir — em termos simples, mede a rapidez com que objetos distantes se afastam uns dos outros. No entanto, medições obtidas com métodos diferentes e independentes dão respostas diferentes para o seu valor. Se olharmos para o rescaldo do Big Bang — a radiação cósmica de fundo em micro-ondas, ou [CMB](#) — encontramos um valor de cerca de $68 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$.

Mas quando medimos distâncias locais usando estrelas em explosão próximas, chamadas [supernovas do tipo Ia](#) e estrelas [variáveis Cefeidas](#), obtemos cerca de $74 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$. Atualmente, a diferença entre estes dois valores não pode ser explicada apenas por erros de medição. A chamada “[tensão de Hubble](#)” tornou-se um dos enigmas mais prementes da cosmologia moderna.

Entretanto, outro mistério paira: [a expansão do Universo está a acelerar](#), como foi detetado pela primeira vez em 1998 através de medições de supernovas do tipo Ia. Esta aceleração da taxa de expansão cósmica obriga-nos a acrescentar um novo componente ao Universo, designado por [energia escura](#), e compreender a verdadeira natureza dessa energia é uma das grandes missões da cosmologia moderna. Mapeamentos de galáxias realizados com grandes telescópios terrestres ou espaciais, como o [DESI](#) e o [Euclid](#), estão neste momento a mapear a distribuição das galáxias pelo cosmos com uma precisão excepcional. Isto permitirá testar se a distribuição das galáxias pode ser totalmente explicada pela teoria de Einstein — ou se, nas maiores escalas do Universo, há algo de novo em jogo.

Neste contexto, as ondas gravitacionais (OGs) surgiram recentemente como uma poderosa sonda cósmica. Previstas pela primeira vez por Einstein há um século, as OGs são ondulações que se propagam no espaço-tempo, produzidas por eventos cataclísmicos no Universo como pares de [buracos negros](#) ou [estrelas de neutrões](#) que espiralam uma em direção à outra até se fundirem. De acordo com a Relatividade Geral, as OGs propagam-se livremente pelo Universo à velocidade da luz, causando pequenas variações nas distâncias relativas entre massas em queda livre na Terra — um efeito [detetado pela primeira vez em 2015](#) pela colaboração LIGO-Virgo. Ao contrário de outros indicadores de distância cósmica, as OGs fornecem uma [forma direta de medir a distância de um evento](#), sem depender da “escala de distâncias cósmicas” usada para supernovas e Cefeidas. As nossas medições de distâncias usando OGs baseiam-se em cálculos precisos da forma esperada do sinal observado pelos detetores de ondas gravitacionais na Terra, de acordo com a Relatividade Geral. Comparando a amplitude e a fase do sinal observadas com as previsões, podemos determinar diretamente a distância de cada fonte. As fontes de OGs são portando chamadas “[sirenes padrão](#)” — uma referência às “velas padrão” (objetos com um brilho intrínseco conhecido, como supernovas do tipo Ia) que os astrónomos usam há décadas. Ao combinar a distância medida a partir de uma sirene padrão com informações sobre a velocidade de afastamento da sua galáxia hospedeira, podemos obter uma medição independente da constante de Hubble.

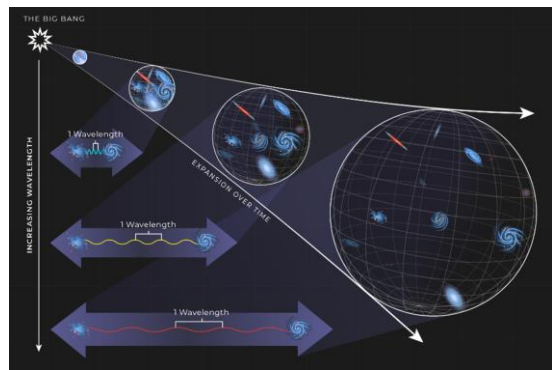


Figura 1. Esquema que ilustra a expansão cósmica e o desvio para o vermelho cosmológico. À medida que o Universo se expande, as galáxias afastam-se umas das outras, de forma análoga aos pontos na superfície de um balão a encher, e a luz das galáxias distantes parece esticar-se para comprimentos de onda mais longos e mais vermelhos. Este desvio para o vermelho também afeta as ondas gravitacionais emitidas por fontes distantes. [Crédito: NASA Scientific Visualization Studio]

Mas há mais: as OGs podem também ajudar a testar se a teoria de Einstein se mantém válida nas maiores escalas cosmológicas. Se uma nova física — como um campo de energia escura desconhecido — estiver por detrás da expansão acelerada do Universo, isso poderá alterar a forma como as OGs se propagam através de grandes distâncias cósmicas e, em particular, como a sua amplitude (o seu tamanho) varia durante a propagação. Este efeito implica que a distância inferida a partir das OGs seria diferente da distância inferida a partir da luz emitida pela mesma fonte, se a gravidade não seguir a relatividade geral de Einstein. Crucialmente, os parâmetros que descrevem este fenómeno podem ser restringidos usando os mesmos métodos aplicados para determinar a constante de Hubble. Isto significa que as OGs podem ser usadas para atacar duas das maiores questões em aberto da cosmologia em simultâneo — com uma abordagem que é também independente dos métodos historicamente usados para medir a expansão cósmica.

Neste estudo, a [colaboração LVK](#) utilizou observações de OGs não apenas para refinar as medições da constante de Hubble, mas também para impor restrições sobre como as OGs podem comportar-se de forma diferente das previsões de Einstein.

MÉTODOS

Ao contrário da medição direta da distância, os sinais de OGs não fornecem medições diretas do [desvio para o vermelho](#) da sua fonte. Tal como a luz de uma galáxia em afastamento é esticada para comprimentos de onda mais longos (mais vermelhos), as massas dos buracos negros em fusão parecem maiores do que realmente são devido à expansão do Universo. Isto significa que não conseguimos distinguir se estamos a observar um objeto realmente mais massivo ou um objeto que se afasta de nós mais rapidamente — pelo menos não a partir do sinal de OGs isoladamente.

No entanto, espera-se que algumas fontes emitam um clarão de luz associado — em particular, fusões que envolvem pelo menos uma estrela de neutrões. Quando esse clarão é detetado em coincidência com o sinal de ondas gravitacionais, os astrónomos conseguem identificar a galáxia hospedeira e medir diretamente o seu desvio para o vermelho. Estas fontes são, por isso, designadas “sirenes brilhantes”. Foi o que aconteceu com a primeira fusão de estrelas de neutrões binárias detetada por observatórios de ondas gravitacionais, [GW170817](#), que também produziu um sinal eletromagnético brilhante. Esse sinal permitiu a rápida identificação da sua galáxia hospedeira ([NGC 4993](#)) e, combinando o seu desvio para o vermelho com a distância obtida a partir dos dados de ondas gravitacionais, forneceu [a primeira medição da constante de Hubble através de uma sirene padrão](#).

Infelizmente, não foram encontradas novas estrelas de neutrões binárias com sinais eletromagnéticos coincidentes na primeira parte do quarto período de observação LVK. Para todas as outras fontes — principalmente binários de buracos negros — recorremos a métodos estatísticos para estimar o desvio para o vermelho. Estes métodos utilizam algum conhecimento externo, ou “prévio”, sobre a população global de fontes. Importa sublinhar que a distribuição observada das propriedades das fontes difere da população verdadeira subjacente. Isto acontece em parte devido à natureza dos nossos detetores, que têm maior probabilidade de detetar certas fontes (como as mais massivas ou mais próximas) do que outras (menos massivas ou mais distantes). Além disso, se a história da expansão do Universo ou as leis da gravidade fossem diferentes — por exemplo, se a energia escura tivesse propriedades inesperadas — isso alteraria a relação entre as populações verdadeira e observada. Comparar as propriedades esperadas da população de fontes com as observadas e ter em conta, cuidadosamente, a diferente probabilidade de deteção, ou “viés de seleção”, permite assim impor restrições às propriedades do Universo, como a sua história de expansão.

Utilizamos uma abordagem estatística que explora simultaneamente duas fontes complementares de informação sobre as propriedades da população subjacente — globalmente conhecida como o método da “sirene escura”.

A primeira fonte de informação está relacionada com a distribuição de massas dos binários de buracos negros, também conhecida como o método da “sirene espectral”. Suponha-se que os buracos negros no Universo se formam preferencialmente em torno de uma certa massa, devido a processos astrofísicos específicos. Por exemplo, a teoria prevê que os buracos negros de massa estelar devem ter uma massa máxima, porque estrelas extremamente massivas explodem de forma tão violenta (através do que se designa por [supernova de instabilidade de pares](#)) que não deixam nenhum buraco negro para trás. Ao comparar a escala de massa máxima prevista com o que observamos — e sabendo como a expansão cósmica desloca essas massas — podemos inferir a taxa de expansão. Em particular, e pela primeira vez numa publicação de cosmologia da LVK, utilizamos aqui um modelo que abrange toda a gama de massas das fontes, o qual inclui diferentes tipos de fusões, nomeadamente binários de buracos negros, binários de estrelas de neutrões e sistemas formados por um buraco negro e uma estrela de neutrões.

A segunda fonte de informação provém da distribuição de galáxias — também chamada de método do “catálogo de galáxias”. Assumindo que os buracos negros se formam nas galáxias, comparamos a distribuição de galáxias na região onde cada fusão provavelmente ocorreu com grandes catálogos de galáxias, de forma a identificar possíveis galáxias hospedeiras. Como os mapas celestes das ondas gravitacionais são imprecisos, esta associação da galáxia hospedeira é probabilística: podem existir centenas ou milhares de galáxias candidatas, cada uma com uma probabilidade diferente de ser a verdadeira. A probabilidade depende da constante de Hubble e das propriedades da energia escura, que relacionam distância e desvio para o vermelho, mas também pode depender de propriedades intrínsecas da galáxia, como a sua massa ou luminosidade. Assumimos que a probabilidade de uma galáxia hospedar uma fusão que emite ondas gravitacionais é proporcional à sua luminosidade na [luz infravermelha](#). Verificamos que esta suposição não afeta significativamente os resultados finais. Importa ainda corrigir o facto de que os mapeamentos de galáxias são incompletos — algumas galáxias ténues ou distantes podem estar completamente ausentes.

Por fim, como os nossos detetores são mais sensíveis a certas massas e distâncias de buracos negros, devemos corrigir cuidadosamente estes efeitos de seleção para evitar enviesamento. Isto significa que precisamos de estimar *simultaneamente* as propriedades da população de buracos negros e a história da expansão cósmica, tendo também em conta a informação de desvio para o vermelho proveniente dos catálogos de galáxias. Neste trabalho, damos um passo importante em relação a análises LVK anteriores, nas quais estas peças de informação eram combinadas em etapas separadas como um compromisso entre precisão e custo computacional. Graças a melhorias nas nossas *pipelines* de análise de dados, realizamos agora uma medição completa e simultânea — a forma estatisticamente correta de obter os resultados mais precisos.

PARA SABER MAIS:

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



RESULTADOS

A **Figura 2** mostra a nossa medição da constante de Hubble (H_0). A melhor estimativa resulta da combinação da análise da sirene escura com o resultado da sirene brilhante GW170817. A partir da posição e largura do pico da curva, obtemos $H_0 = 76,6^{+13,0}_{-9,5}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹. Aqui, os números em índice e expoente indicam o erro nesta medição ao [nível de confiança](#) de 68%. Análises anteriores da LVK utilizando catálogos de galáxias assumiam um modelo fixo da população de objetos compactos, o que tornava as restrições sobre H_0 irrealisticamente apertadas. O método utilizado neste trabalho atinge precisão semelhante, mas é estatisticamente mais robusto, uma vez que os parâmetros que descrevem a população de objetos compactos, como a posição de escalas preferenciais na distribuição de massas, são agora medidos em conjunto com os parâmetros cosmológicos.

Os nossos resultados indicam que a utilização de um modelo abrangente para a distribuição de massas das fusões de binários compactos conduz a uma melhoria de 50% em relação às restrições obtidas com sirenes escuras usando apenas fusões de binários de buracos negros, apesar da inclusão de apenas cinco eventos adicionais contendo pelo menos uma estrela de nêutrons. A estimativa obtida apenas a partir das sirenes escuras continua ligeiramente mais ampla do que o resultado obtido com a única sirene brilhante GW170817, o que sublinha a importância de detetar mais [fontes multi-mensageiras](#); contudo, a medição da constante de Hubble obtida usando sirenes espectrais representa uma melhoria de 60% em comparação com resultados anteriores da colaboração LVK.

A **Figura 3** apresenta as nossas restrições a possíveis desvios da relatividade geral de Einstein na forma como as OGS se propagam num universo em expansão. Em particular, medimos a razão entre a distância medida a partir da amplitude das ondas gravitacionais (denotada D_{L}^{GW}) e a distância que seria medida a partir de uma contraparte eletromagnética (denotada D_{L}^{EM}). Se a relatividade geral estiver correta, estas duas distâncias devem coincidir exatamente, pelo que a razão deverá ser igual a um para todos os desvios para o vermelho (linha preta tracejada). Testamos isto utilizando duas parametrizações diferentes do efeito e impomos limites aos parâmetros correspondentes. Os painéis superior e inferior da figura mostram os resultados para cada modelo, que apresentam boa concordância entre si. As bandas coloridas indicam os intervalos de credibilidade de 90% a partir do GWTC-4.0. Não encontramos evidências de desvios da relatividade geral, sendo que a nossa melhor medição restringe tais desvios ao nível de 60% (intervalo de credibilidade de 68,3%), melhorando cerca de 40% as restrições anteriores não-LVK. A sirene brilhante GW170817 não contribui significativamente neste caso porque este efeito se acumula durante a propagação e apenas as fontes com desvios para o vermelho não negligenciáveis são informativas — GW170817, com um desvio para o vermelho $z \approx 0,01$, está demasiado próxima.

Por fim, os dados do GWTC-4.0 não impõem quaisquer restrições nem ao conteúdo de matéria escura do Universo nem à [equação de estado da matéria escura](#). O efeito mais relevante da energia escura manifesta-se, em vez disso, através da propagação modificada das ondas gravitacionais.

RESUMO E PERSPETIVAS FUTURAS

Os resultados mais recentes da colaboração LIGO-Virgo-KAGRA fornecem uma nova medição independente da constante de Hubble, bem como restrições atualizadas sobre possíveis desvios da relatividade geral de Einstein em escalas cosmológicas. A melhor estimativa da constante de Hubble, combinando os dados estatísticos das “sirenes escuras” com a única sirene brilhante conhecida, GW170817, é $76,6^{+13,0}_{-9,5}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹ — consistente com medições anteriores baseadas em ondas gravitacionais, mas obtida com tratamento estatístico melhorado. A análise mostra que incluir uma gama mais completa de tipos de fontes conduz a restrições significativamente mais rigorosas do que usar apenas binários de buracos negros, mesmo não tendo sido encontradas novas sirenes brilhantes durante este período de observação.

A presença de características distintas na distribuição de massa de buracos negros — escalas de massa preferenciais onde os buracos negros tendem a formar-se — é atualmente a maior fonte de informação cosmológica para eventos sem contraparte eletromagnética. A informação adicional proveniente dos catálogos de galáxias hospedeiras melhora a medição apenas em cerca de 8,6%, principalmente devido à cobertura incompleta do catálogo GLADE+ usado e à localização celeste relativamente imprecisa dos eventos detetados até agora no quarto período de observação. Espera-se que ambos os fatores melhorem em breve: o aumento da sensibilidade do detetador Virgo na restante parte do quarto período de observação deverá conduzir a eventos mais bem localizados, e um catálogo mais completo, UpGLADE, está a ser preparado.

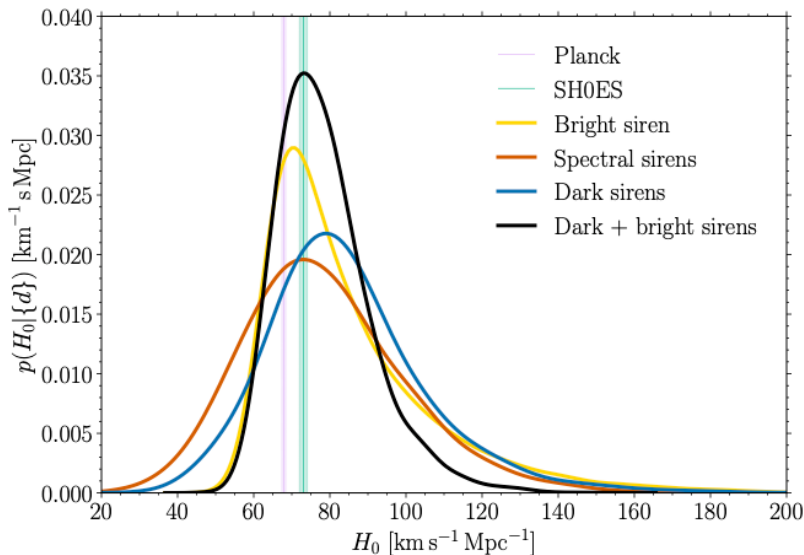


Figura 2. (Figura 5 da nossa publicação). Distribuições de probabilidade *a posteriori* para os valores da constante de Hubble (H_0) obtidos a partir de diferentes combinações do conjunto completo de dados GWTC-4.0. O melhor resultado é dado pela curva preta, que representa a combinação das “sirenes escuras” do GWTC-4.0 com a “sirene brilhante” GW170817. Para comparação, são também mostrados os resultados obtidos apenas com sirenes escuras (azul), sirenes espectrais (laranja), e a única sirene brilhante (amarelo).

O nosso estudo testa também se as ondas gravitacionais se podem propagar de forma diferente da prevista pela relatividade geral ao longo de distâncias cósmicas, constituindo uma ferramenta fundamental para investigar ideias relacionadas com a energia escura. Não se encontram desvios da relatividade geral, sendo que as restrições são agora cerca de 40% mais rigorosas que os anteriores limites de ondas gravitacionais não-LVK.

Estes resultados mostram que, com mais dados a caminho e métodos estatísticos robustos agora implementados, a cosmologia com ondas gravitacionais está bem posicionada para abordar algumas das maiores questões em aberto da física moderna.

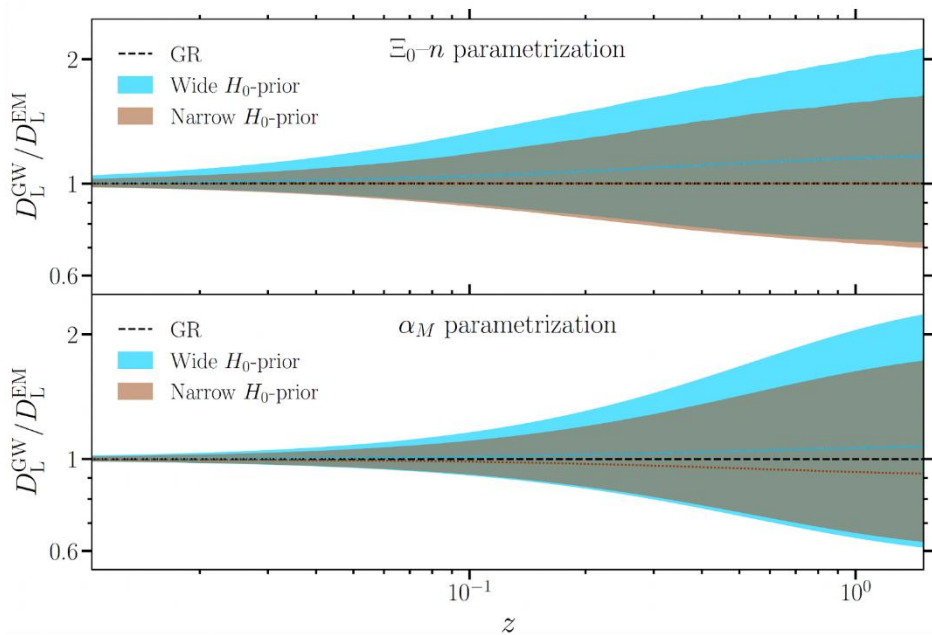


Figura 3. (Figura 10 da nossa publicação). Razão da distância medida a partir de fontes de OGs e a distância que seria medida a partir de uma emissão eletromagnética da mesma fonte, em função do desvio para o vermelho da fonte. Se a teoria da relatividade geral for válida, espera-se que as duas coincidam, pelo que a relação seria igual a um em todos os desvios para o vermelho. As bandas coloridas mostram a restrição obtida a partir do GWTC-4.0 ao nível de credibilidade de 90%. Não encontramos evidências de desvios da relatividade geral. O painel superior e inferior referem-se a duas diferentes formas paramétricas usadas para descrever este efeito, as quais apresentam resultados consistentes entre si.

GLOSSÁRIO

GLADE: nova e alargada compilação de catálogos de galáxias, contendo dados de cerca de 22 milhões de galáxias, utilizada para fornecer informação sobre o desvio para o vermelho das potenciais galáxias hospedeiras dos nossos eventos de OGs. Um artigo científico de acesso livre que descreve o catálogo original GLADE está disponível [aqui](#).

Megaparsec: unidade de distância habitualmente usada em cosmologia. Um megaparsec é igual a um milhão de parsecs, sendo que um [parsec](#) corresponde a cerca de três anos-luz e um quarto, ou $3,086 \times 10^{15}$ metros.

Constante de Hubble: parâmetro usado para medir a taxa de expansão do Universo. O seu valor atual, denotado pelo símbolo H_0 , é aproximadamente $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Teoria do Big Bang: explicação para a origem e evolução do Universo observável, que descreve como o Universo começou à cerca de 14 mil milhões de anos e se expandiu a partir de um estado inicialmente muito quente e denso. A Teoria do Big Bang é amplamente aceite como explicação para muitas das propriedades observadas do Universo, incluindo a [abundância dos elementos químicos mais leves](#) e a existência da [radiação cósmica de fundo em micro-ondas](#).

Radiação cósmica de fundo em micro-ondas (CMB): radiação eletromagnética proveniente de uma fase inicial da evolução do Universo, quando este tinha cerca de 380 000 anos. O CMB é também conhecido como “radiação fóssil” deixada pelo Big Bang. Para mais informação, ver [aqui](#).

Supernova do tipo Ia: mecanismo específico de explosão de uma anã branca, que acumula material de uma estrela companheira, cuja massa se torna superior ao [limite de Chandrasekhar](#) de 1,4 vezes a [massa solar](#). As distâncias de supernovas do tipo Ia podem ser estimadas de forma fiável, uma vez que todas explodem com um brilho (ou [luminosidade](#)) máximo intrínseco bastante semelhante – tornando-as úteis como [velas padrão](#).

Cefeida: tipo de estrela variável pulsante que sofre alterações periódicas no seu raio e temperatura, levando a mudanças regulares e periódicas na sua [luminosidade](#). Medindo o seu período de pulsação, os astrónomos podem estimar de forma fiável a distância das estrelas variáveis Cefeidas.

Escala de distâncias cósmicas: a combinação de métodos através dos quais os astrónomos determinam a distância de objetos no Universo. As distâncias a objetos remotos, que normalmente se baseiam em relações empíricas entre as suas propriedades, são construídas a partir de medições mais diretas e geométricas das distâncias a objetos próximos – geralmente dentro da Via Láctea. Para mais informação, ver [aqui](#).

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

Estrela de neutrões: remanescente do processo de supernova sofrido por uma estrela com massa entre 10 e 25 vezes a massa do nosso Sol. As estrelas de neutrões típicas têm uma massa de cerca de 1 a 2 massas solares e um raio de 10 a 15 quilómetros, sendo alguns dos objetos mais compactos alguma vez descobertos.

Supernova de instabilidade de pares: tipo de explosão de supernova prevista para ocorrer numa estrela com massa superior a cerca de 130 massas solares. A produção de [pares elétron-positrão](#) no núcleo provoca uma queda dramática na pressão que suporta a estrela, conduzindo a uma explosão termonuclear descontrolada que não deixa nenhum remanescente estelar.

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 radiação eletromagnética proveniente desses objetos apresenta um comprimento de onda maior.

Matéria escura: forma misteriosa de matéria que constitui cerca de 85% da massa do Universo. É escura porque não emite luz nem interage eletromagneticamente. Muitas teorias sobre a matéria escura preveem que ela seja algum tipo de partícula fundamental, mas também é interessante considerar a possibilidade de que os objetos mais escuros que conhecemos (buracos negros!) possam ser um componente da matéria escura.

Energia escura: componente misteriosa e desconhecida do conteúdo de matéria e energia do cosmos, que domina o comportamento do Universo nas suas maiores escalas e que se acredita estar a causar a [aceleração da expansão do Universo](#). O modelo mais simples para a energia escura é o da chamada constante cosmológica, que exerce uma pressão negativa, resultando numa expressão acelerada.

Distribuição de probabilidade a posteriori: gráfico que mostra quão prováveis são diferentes valores de uma dada propriedade física, após a análise dos nossos dados; essas probabilidades são estimadas através de um processo conhecido como [inferência bayesiana](#).

PARA SABER MAIS:

Visita as nossas www.ligo.org
páginas web: 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 relativos ao GWTC-4.0 foram publicados pelo Gravitational-Wave Open Science Centre [aqui](#).

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