

GWTC-4.0: PROPRIEDADES DA POPULAÇÃO DE BINÁRIOS COMPACTOS EM FUSÃO

O nosso Universo alberga estrelas com uma grande variedade de massas. Embora a maioria das estrelas tenha [massas semelhantes à do Sol](#), sabemos que algumas podem ter massas dezenas a centenas de vezes maiores. Os remanescentes compactos, como [estrelas de neutrões](#) e [buracos negros](#), que estas estrelas massivas podem deixar para trás como o seu estado final também podem exibir uma gama igualmente ampla de massas. Para descobrir como os antepassados astrofísicos desses objetos se formam, evoluem, e morrem, podemos estudar as [ondas gravitacionais](#) (OGs, GWs em inglês) emitidas pelas [fusões de sistemas binários que contêm esses objetos compactos](#), detetadas pelos [interferômetros](#) laser terrestres operados pelas [colaborações LIGO, Virgo e KAGRA \(LVK\)](#). No entanto, geralmente é mais informativo estudar toda a população do que considerar apenas uma determinada [fusão compacta binária](#). Neste resumo, descrevemos as propriedades populacionais de 161 fusões binárias do [GWTC-4.0](#) – o maior catálogo de OGs publicado até à data.

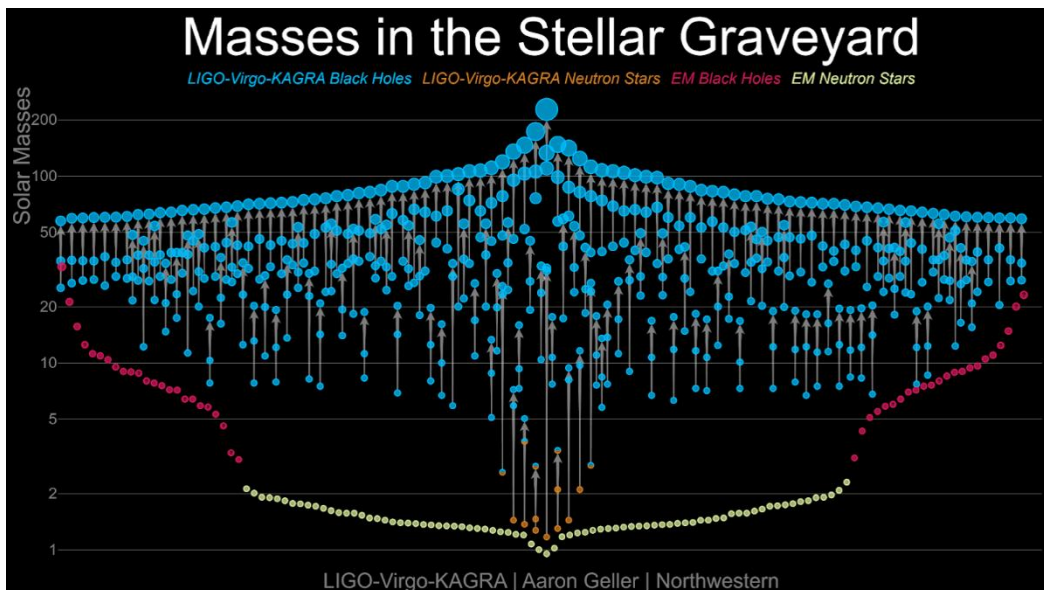


Figura 1. As observações de ondas gravitacionais de buracos negros (azul) e estrelas de neutrões (laranja) do catálogo LIGO–Virgo–KAGRA GWTC-4.0 são apresentadas juntamente com observações eletromagnéticas de buracos negros (vermelho) e estrelas de neutrões (amarelo). O gráfico destaca a ampla gama de massas de objetos compactos, a sobreposição entre buracos negros e estrelas de neutrões e a estrutura emergente no chamado “hiato de massa inferior” entre eles. As observações eletromagnéticas com ponto de interrogação denotam candidatos não confirmados e/ou restrições de massa altamente incertas [Crédito da imagem: LIGO-Virgo-KAGRA/Aaron Geller/Northwestern]

Acredita-se que os binários compactos se formem através de dois canais de formação principais. O primeiro, chamado de “[evolução binária isolada](#)”, envolve um par de estrelas massivas que têm pouca ou nenhuma interação com outros objetos durante a sua vida. Essas estrelas massivas colapsam, deixando para trás buracos negros ou estrelas de neutrões. O outro canal, chamado de “[formação dinâmica](#)”, envolve a formação de um binário quando vários objetos interagem entre si num ambiente estelar denso, como [aglomerados globulares](#).

PARA SABER MAIS:

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



MÉTODOS

As fusões binárias compactas apresentadas neste trabalho incluem estrelas binárias de neutrões (BNS), pares de estrelas de neutrões-buracos negros (NSBH), e buracos negros binários (BBH). O nosso artigo traça um retrato de como esses sistemas se formam e se fundem ao longo do [tempo cósmico](#). Estas fusões foram extraídas do catálogo GWTC-4.0 de detecções de ondas gravitacionais, publicado recentemente, e incluem eventos da primeira parte do quarto [período de observação](#) científica da LVK (O4a), com início em maio de 2023 e fim em janeiro de 2024. Os eventos foram identificados usando um limiar de [taxa de falso alarme](#) (FAR) $< 1 \text{ ano}^{-1}$ para BBHs (resultando em 84 novos BBHs do O4a, para um total acumulado de 153 BBHs detetados até ao momento) e uma FAR mais rigorosa $< 0.25 \text{ ano}^{-1}$ para sistemas contendo NS (mantendo apenas [GW230529](#) entre os novos candidatos NSBH do O4a) para garantir o mínimo de contaminação por ruído mascarado como sinais reais.

Inferir as propriedades da população requer a correção do que chamamos “[efeitos de seleção](#)”—um problema comum em muitas áreas da astronomia observacional: os nossos detetores de OGs são mais sensíveis a fusões próximas e de maior massa do que a fusões distantes e de menor massa. Os sinais de OGs provenientes de sistemas binários de objetos compactos são previstos com precisão pela [relatividade geral](#) e, ao contrário da luz, as OGs são apenas fracamente afetadas pela matéria interveniente. Isso permite-nos estimar os nossos efeitos de seleção de OGs com exatidão e precisão. Injetámos milhões de sinais sintéticos de OGs—abrangendo distribuições plausíveis de massa, rotação e desvio para o vermelho—em fluxos de dados reais e medimos a eficiência de detecção de várias *pipelines* de pesquisa, ou seja, a fração desses sinais sintéticos que foram detetados com sucesso. Assim, essas injeções podem ser usadas para calcular a função de seleção, o que nos ajuda a corrigir os nossos efeitos de seleção e permite uma inferência sem viés das distribuições de massa, spin e desvio para o vermelho da população *real* de fontes presentes no universo, e não apenas das populações que observamos. Também validámos e verificámos os nossos resultados usando vários modelos, cada um com os seus próprios compromissos entre exatidão e precisão.

RESULTADOS

Várias características identificadas na [versão GWTC-3.0 da análise](#) persistem. Em particular, há um excesso de objetos entre $1\text{--}2 M_{\odot}$ (onde M_{\odot} denota a [massa do sol](#)) muito provavelmente significando estrelas de neutrões em sistemas binários de estrelas de neutrões, bem como em sistemas buraco negro-estrela de neutrão. Como podemos ver na **Figura 2**, a distribuição de massa dos buracos negros (ou seja, a proporção relativa de buracos negros de diferentes massas) está longe de ser uniforme—pode ser descrita usando uma [lei de potência](#) dupla, sendo suave em massas baixas e íngreme em massas altas, com sobre-densidades próximas de $10 M_{\odot}$ e $35 M_{\odot}$. Há também evidências de uma sobre-densidade perto de $20 M_{\odot}$. Os buracos negros no pico de $35 M_{\odot}$ são mais propensos a formar pares com companheiros de massas semelhantes quando comparados aos buracos negros no restante do espectro de massas.

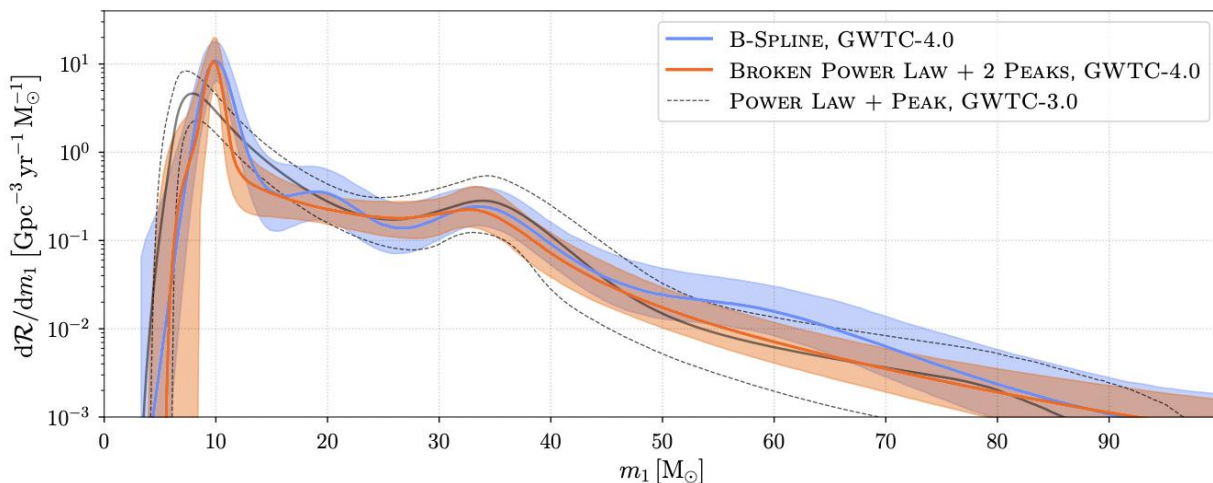


Figura 2. Espectro de massa dos buracos negros primários, ou seja, a distribuição das massas do buraco negro de maior massa (o “primário”) nos nossos sistemas binários detetados. O GWTC-4.0 (azul/laranja) refina a anterior curva de lei de potência e pico de GWTC-3.0 (“GWTC-3.0 Power Law + Peak”, tracejado preto), com um suporte mais claro para uma estrutura em torno de $\sim 10 M_{\odot}$ e $\sim 35 M_{\odot}$.

Os buracos negros são definidos não só pela sua massa, mas também pelo seu [spin](#), que é uma medida da rapidez (e em que direção e alinhamento em relação à órbita binária) com que estão a girar. Esses spins (independentemente ou em conjunto com as suas massas) podem conter marcas do seu ambiente de criação, formação e história evolutiva. Os spins observados nos buracos negros sugerem a presença de múltiplos canais de formação. A **Figura 3** mostra a distribuição do spin dos buracos negros inferida para o GWTC-4.0. Embora a distribuição seja ampla, 90% dos buracos negros têm magnitudes de spin inferiores a 0,57 vezes o máximo permitido de acordo com a relatividade geral. A distribuição dos [spins efetivos](#) mostrada na **Figura 4** é assimétrica em relação ao zero e está desviada para valores positivos. Em particular, 20–40% dos buracos negros têm spins efetivos negativos, que se pensa serem produzidos apenas no canal de formação dinâmica.

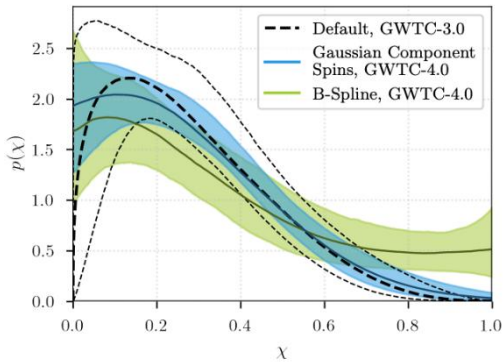


Figura 3: Distribuição das magnitudes dos spins individuais dos buracos negros (χ), onde χ é um número adimensional expresso como uma fração do valor máximo permitido pela relatividade geral. Os modelos do GWTC-4.0 (azul e verde) sugerem spins médios mais baixos e formas mais amplas que o resultado padrão do GWTC-3.0 (tracejado preto).

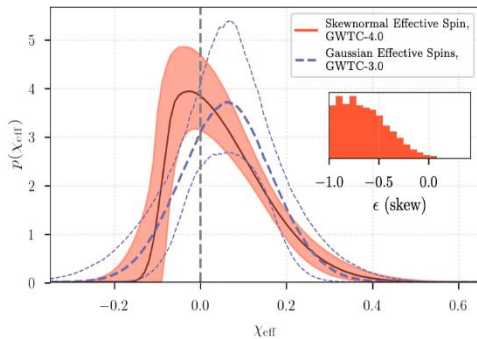


Figura 4 (painel direito): Distribuição do spin efetivo (χ_{eff}). O GWTC-4.0 (vermelho) prefere uma distribuição assimétrica, enquanto o GWTC-3.0 (tracejado azul) assume uma distribuição gaussiana simétrica. A caixa inserida mostra a distribuição inferida do parâmetro de assimetria ϵ .

CONCLUSÕES

O maior conjunto de dados no GWTC-4.0, em comparação com o GWTC-3.0, permitiu a descoberta de novas características nos nossos dados, ao mesmo tempo que reforçou a significância das características previamente conhecidas. Com o restante do quarto período de observação assim como o iminente quinto período de observação prometendo um catálogo muito maior de binários compactos, estamos prestes a refinar ainda mais essas características, preencher as lacunas e traçar as histórias completas dos binários compactos. Esperamos que estes resultados desempenhem um papel fundamental na descoberta dos processos que regem a formação e evolução dos binários compactos, contribuindo para uma compreensão mais ampla dos processos astrofísicos ao longo do tempo cósmico.

No GWTC-3.0, reportámos evidências de que sistemas com massas desiguais têm um spin médio efetivo mais alto do que sistemas com massas iguais. Neste trabalho, confirmamos a relação entre o [rácio de massa](#) (ou seja, a massa secundária dividida pela massa primária) e o spin efetivo, embora ainda não seja claro se isto reflete uma mudança na média ou uma alteração na extensão da distribuição do spin. Também descobrimos que os buracos negros fora da faixa de 30–40 M_{\odot} favorecem uma distribuição assimétrica de spin com inclinação para valores maiores, enquanto aqueles nesta faixa não mostram essa tendência. Estas tendências qualitativamente distintas podem apontar para diferentes mecanismos físicos subjacentes que determinam as correlações spin-massa em buracos negros binários.

Com base na nossa análise GWTC-4.0, podemos atualizar as taxas de fusão para binários compactos inferidas a partir do Universo local para 8–250 $\text{Gpc}^{-3} \text{ano}^{-1}$ para BNS, 9–84 $\text{Gpc}^{-3} \text{ano}^{-1}$ para NSBH, e 14–26 $\text{Gpc}^{-3} \text{ano}^{-1}$ para BBH. O limite superior da taxa de fusão de BNS diminuiu e a incerteza nas estimativas da taxa de fusão de BBH diminuiu para cerca de metade da incerteza anterior do GWTC-3.0. Também descobrimos que há mais fusões de BBH por unidade de volume em desvios para o vermelho maiores em comparação com o Universo local, e podemos descartar uma taxa de fusão que diminuiu ou não evoluiu com o desvio para o vermelho.

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 do artigo científico [aqui](#) ou no [arxiv](#).

Artigos adicionais sobre o GWTC-4.0:

- Artigo introdutório: [aqui](#) ou no [arxiv](#).
- Artigo dos métodos: [aqui](#) ou no [arxiv](#).
- Artigo dos resultados: [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 revista por Inês Rainho a partir da versão original em inglês disponível [aqui](#).