GWTC-5.0: PROPRIEDADES POPULACIONAIS DE BINÁRIAS COMPACTAS EM FUSÃO

Nós apresentamos as descobertas atuais baseadas nas propriedades populacionais de 267 fusões de binárias compactas reportadas em nosso último Catálogo de Transientes de Ondas Gravitacionais, GWTC-5.0, que se constrói sobre o GWTC-4.0 e inclui os últimos dados coletados entre 10 de Abril de 2024 e 28 de Janeiro de 2025. Enquanto eventos de fusão individual fornecem *insights* valiosos, estudar a população como um todo pode oferecer uma imagem mais completa de como binárias compactas se formam, evoluem e fundem.

Nosso Universo contém estrelas abrangendo uma vasta faixa de massas e estágios de evolução. Algumas estrelas são relativamente pequenas e podem viver por dezenas de bilhões de anos. Outros vivem rápido e morrem cedo, queimando tudo de seu combustível nuclear em apenas alguns poucos milhões de anos. Essas estrelas massivas, com massas variando de dezenas até centenas de vezes da massa do Sol, deixam para trás remanescentes compactos depois de suas mortes. Esses remanescentes compactos incluem estrelas de nêutron e buracos negros, que podem, às vezes, formar pares que eventualmente se fundem. Tais fusões produzem ondas gravitacionais (GW), ondulações no espaço-tempo que se tornaram rapidamente uma das principais ferramentas para entender a formação e evolução de objetos astrofísicos compactos através da história cósmica. Ondas gravitacionais podem viajar através do Universo por bilhões de anos, passando quase sem ser afetadas através da matéria interveniente e das galáxias antes de finalmente serem detectadas na Terra.

Como nossos detectores investigam mais a fundo o Universo, estudos de populações de binárias compactas irão fornecer uma visão cada vez mais detalhada de como buracos negros e estrelas de nêutrons se comportam e como eles interagem um com o outro. Eles também fornecem *insights* sobre a natureza, evolução e morte das estrelas massivas que formam a história cósmica de buracos negros e estrelas de nêutrons.

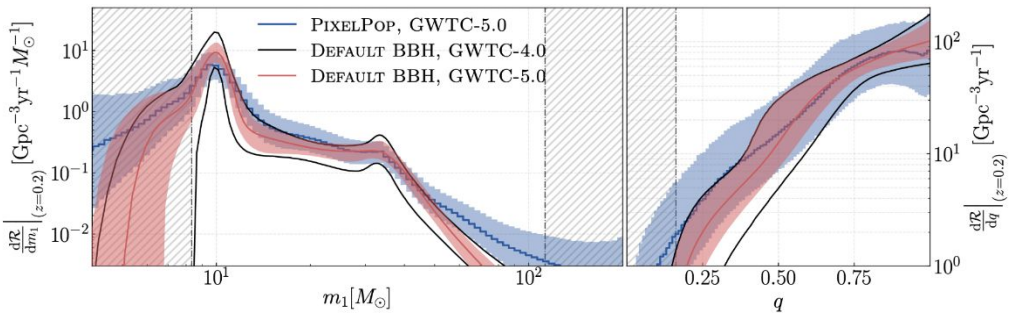


Figura 1 (Fig. 2 em nosso artigo). Painel da esquerda: a distribuição de massa primária (ou seja, o componente mais massivo) na população de buracos negros binários. Os resultados de GWTC-5.0 (azul e vermelho) mantêm a estrutura geral vista no GWTC-4.0 (preto sólido), com características persistentes ao redor de 10 $M_\odot$ e 35 $M_\odot$. Painel da direita: a distribuição de razão da massa, q, que investiga como de buracos negros se pareiam com outro. Uma razão de massa de q = 1 indica um buraco negro pareado com um companheiro de mesma massa.

MÉTODOS

As fusões de binárias compactas presentes nesse trabalho incluem binárias de estrelas de nêutrons (BNS), pares de estrela de nêutron–buraco negro (NSBH), e binárias de buracos negros (BBH). Nosso artigo mostra um retrato de como esses sistemas se formam, suas propriedades e como eles se fundem através tempo cósmico. Eles são extraídos do recém-publicado catálogo GWTC-5.0 de detecção de ondas gravitacionais, e incluem detecções confiáveis da segunda parte da quarta corrida observacional (O4b) da colaboração LIGO-Virgo-KAGRA (LVK). Além disso, devido a uma atualização nos resultados da primeira parte da corrida observacional (O4a), nossos 267 candidatos incluem mais dois eventos da análise populacional de GWTC-4.0.

SAIBA MAIS:

Visite nossos websites: **www.ligo.org**
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Inferir propriedades populacionais requer um entendimento cuidadoso de efeitos de seleção, um desafio comum na astronomia observacional. Detectores de ondas gravitacionais são mais sensíveis a fusões de sistemas próximos, de maior massa, do que a sistemas distantes, de baixa massa, e esse viés deve ser corretamente contabilizado nas análises. Sinais de ondas gravitacionais advindos de binárias compactas são bem descritas pela relatividade geral e nós usamos essas previsões para entender os sinais sob a suposição de que as órbitas são quase inteiramente circulares.

Diferentemente dos sinais eletromagnéticos, tal como as emissões de rádio, ondas gravitacionais são muito fracamente afetadas por matéria interveniente, permitindo que seus efeitos de seleção sejam modelados com alta precisão. Para quantificar esses efeitos, nós injetamos milhões de sinais sintéticos de ondas gravitacionais com diferentes massas, spins, e redshifts em dados reais do detector, e medimos a habilidade de nossas *pipelines* de busca em detectá-los. Essas medições, por sua vez, nos permitem 'desfazer' a seleção de efeitos e construir a distribuição populacional real de fusão de binárias compactas. Para considerar os outros efeitos sistemáticos devido a, por exemplo, má modelagem de população, nós validamos e verificamos nossos resultados usando diferentes conjuntos de modelos para populações de binárias compactas.

RESULTADOS DESTAQUES

Distribuição de massa: A estrutura e recursos identificados na análise de GWTC-4.0 persiste no estudo presente. **A Figura 1 (painel esquerdo)** mostra a distribuição de massa do buraco negro, que pode ser amplamente descrita como uma lei de potência dupla, com uma subre-densidade em ~10 $M_\odot$ (onde o símbolo $M_\odot$ denota Massas Solares) e uma mudança na inclinação da curva próxima a 35 $M_\odot$. A **Figura 1 (painel à direita)** mostra que buracos negros são mais propensos a se emparelharem com outros buracos negros de massas comparáveis, uma tendência que é ainda mais pronunciada por buracos negros com massas de aproximadamente 35 $M_\odot$. Como uma regra prática, estrelas também gostam de formar binárias com outras estrelas de massas comparáveis, então a mesma preferência por buracos negros não é inesperada.

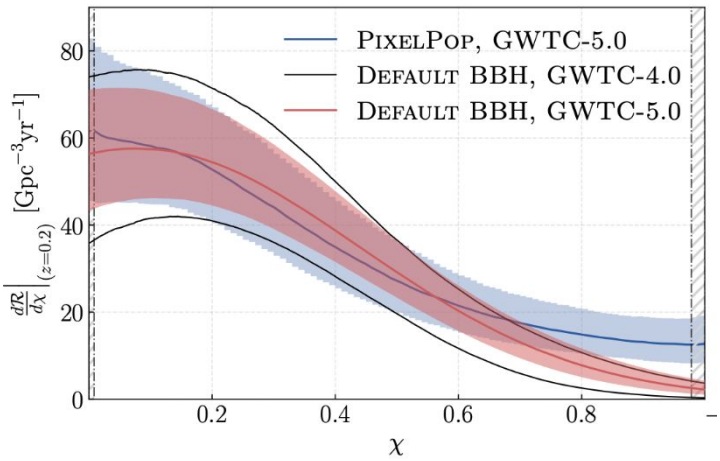


Figura 2 (adaptada da Fig. 3 do nosso artigo): A distribuição de quão rápido buracos negros individuais rotacionam. Nós a denotamos com a magnitude de rotação adimensional, que representa a fração do spin máximo permitido pela relatividade geral. Os modelos GWTC-5.0 (faixas azul e vermelha) são consistentes com o resultados anteriores do GWTC-4.0 (linhas pretas sólidas) e preservam a estrutura de distribuição geral. A maioria dos buracos negros tem pequenos spins adimensionais, mas uma pequena fração tem valores altos.

Spins (Giros): As propriedades de buracos negros astrofísicos são determinadas por seus giros (spins), em adição às suas massas . Esses spins, individualmente ou em combinação com as massas, podem codificar informações sobre seus ambientes de nascimento, canais de formação e sua história evolutiva.

Nós caracterizamos spins de buracos negros como o parâmetro adimensional de spin, χ, que é o número que varia no intervalo [0, 1]. Um buraco negro com $\chi = 0$ não gira nada, enquanto um buraco negro com $\chi = 1$ está girando tão rápido quanto teoricamente possivel, de acordo com a relatividade geral. Nós descobrimos que, enquanto a maioria dos buracos negros tem pequenos spins adimensionais (veja **Fig. 2**), cerca de 15% deles têm grandes spins, $\chi \sim 0.7$.

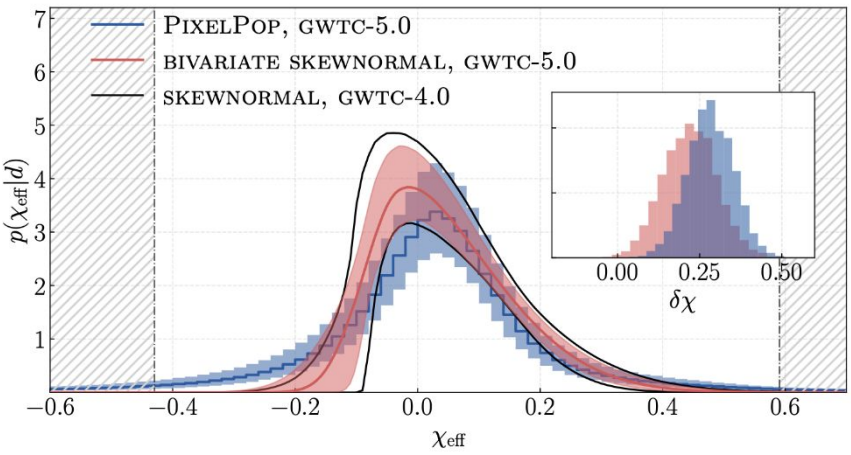


Figura 3 (adaptada da Fig. 4 do nosso artigo): Distribuição do parâmetro de spin efetivo ($\chi_{\rm eff}$) de sistemas binários. O inserto mostra a assimetria da distribuição, que pode ser particularmente sensível à forma como os buracos negros se formam, para os dois modelos que usamos em GWTC-5.0.

Outra forma útil para se estudar os spins de binárias compactas é através de through the spin orbital efetivo, $\chi_{\rm eff}$, que mede o

alinhamento dos spins com o momento angular orbital e é, geralmente, o parâmetro do spin que é melhor medido com as ondas gravitacionais. Como em todas as nossas estimativas, isso não é caracterizado por um número único, mas por uma distribuição de probabilidade, que nos diz quão prováveis são os diferentes valores de uma variável física, considerando-se a nossa base de dados. A **Figura 3** mostra a distribuição dos spins efetivos e como a sua forma pode ser um identificador útil sobre o mecanismo de formação de buracos negros. Nós descobrimos que a distribuição é assimétrica em relação ao zero, com mais binárias tendo spin efetivo positivo (ou seja, spins alinhados com o momento angular) do que negativo (anti-alinhado com o momento angular orbital). Baseado nessa assimetria, nós encontramos com confiança que pelo menos 9% de binarias de buracos negros devem ter sido produzidas em canais de formação que formam preferencialmente binárias alinhadas, possivelmente devido a efeitos como maré ou interação de buracos negros com estrelas.

Investigando mais a fundo sobre quais buracos negros giram rapidamente, nós descobrimos que eles ocorrem em duas escalas de massas distintas, como mostra na **Figura 4**, com massas ou na faixa aproximada 10-20 $M_\odot$ ou acima 45 $M_\odot$. Para essas escalas de massas, tais spins grandes são geralmente difíceis de se explicar dentro dos modelos padrão de formação estelar. Isso sugere que mecanismos alternados de formação tal como fusões hierárquicas (onde buracos negros formados por fusões de gerações anteriores de buracos negros se fundem novamente) pode estar envolvido! Essa possibilidade também seria consistente com as recentes detecções da LVK de GW241110 e GW241011, onde ambos os sistemas mostram assinaturas de spin que são consistentes com a fusões hierárquicas. Enquanto essa conexão é muito tentadora, nós ainda não podemos descartar com confiança outros mecanismos possíveis pelos quais buracos negros com altos spins podem ser produzidos.

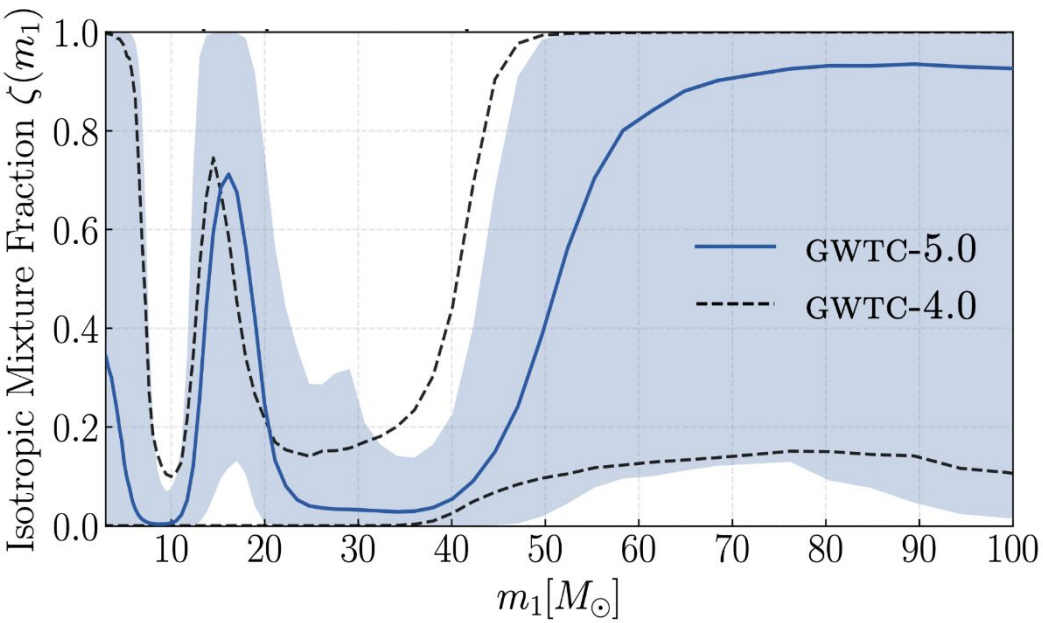


Figura 4 (adaptado da Fig. 10 do nosso artigo): A fração de sistemas de buracos negros com rotação-rápida em função da massa. Buracos negros com rotações rápidas parecer ter massas aproximadamente na faixa 10-20 $M_\odot$ ou acima de 45 $M_\odot$. A linha azul sólida mostra a fração mediana inferida do GWTC-5.0 e a região sombreada em azul mostra o intervalo de credibilidade de 90% correspondente para essa fração.

CONCLUSÃO

O novo conjunto de detecções de ondas gravitacionais no GWTC-5.0 fornece um mergulho mais profundo na distribuição populacional de buracos negros e estrelas de neutrons em fusão. Várias características fascinantes nessas distribuições foram claramente cristalizadas nessa análise, inlcuindo a presença de buracos negros com spins altos. No geral, esse conjunto de dados fornece as evidências mais claras até agora de que binárias de buracos negros podem se formar de várias formas diferentes. A atualização final baseada no dados da O4, GWTC-6.0, que é esperada dentro de alguns poucos meses, lançará mais luz sobre essas novas e empolgantes descobertas.

SAIBA MAIS:

Visite nossos websites: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Leia uma pré-impressão gratuita do artigo científico completo aqui: https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600045/public/

Ou no arxiv: https://arxiv.org/abs/2605.27226

Artigos adicionais apresentando GWTC-5.0:

- Artigo de introdução: https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500701/public/
- Artigo de métodos: https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600166/public/
- Artigo de resultados: https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600152/public/

Liberação de dados de Gravitational-Wave Open Science Centre GWTC-5.0: https://gwosc.org/GWTC-5.0/.

Traduzido para o português por: Fabiana Pinto e P. J. Pompeia do grupo VirgoBR