

GWTC-4.0: ATUALIZANDO O CATÁLOGO COM OBSERVAÇÕES DA PRIMEIRA PARTE DA QUARTA CAMPANHA DE OBSERVAÇÃO LIGO-VIRGO-KAGRA

Em agosto de 2025, a colaboração [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) liberou os dados [interferométricos](#) das [deformações](#) da primeira parte da quarta campanha de observação (O4a), que ocorreu de maio de 2023 a janeiro de 2024. Nesses dados, descobrimos 128 novos sinais confiáveis de [ondas gravitacionais](#) (GW) originados de fusão de [buracos negros](#) e [estrelas de nêutrons](#). Juntamente com a liberação dos dados de deformações gravitacionais, publicamos a versão 4.0 do Catálogo de Transientes de Ondas Gravitacionais (GWTC-4.0), que contém listas dos candidatos a sinais e medições de suas propriedades. Também estamos publicando uma série de artigos que acompanham o catálogo. Estes artigos foram submetidos ao Astrophysical Journal Letters para publicação como uma edição de foco. Aqui, resumimos os três primeiros desses artigos, que focam na produção e nos resultados do próprio GWTC-4.0.

INTRODUÇÃO

Este artigo, “GWTC-4.0: uma introdução à versão 4.0 do Catálogo de Transientes de Ondas Gravitacionais”, fornece uma visão geral da Edição de Foco, incluindo detalhes sobre os demais artigos e informações importantes para auxiliar o leitor a compreender a nomenclatura da área.

Como os eventos são nomeados?

Nós nomeamos nossas ondas gravitacionais usando a data e a hora em que as detectamos, em Tempo Universal Coordenado (UTC). O primeiro evento novo (cronologicamente) em nosso Catálogo, denominado GW230518_125908, foi detectado em 18 de maio de 2023 às 12h59min08s UTC. Adicionamos o

prefixo GW para todos os sinais candidatos que detectamos (isto é ligeiramente diferente do que foi feito no passado, uma vez que sinais que consideramos provavelmente causados por efeitos terrestres agora estão incluídos no catálogo, mas com dados adicionais sobre por que achamos que podem não ser ondas gravitacionais genuínas).

Catálogos cumulativos

O catálogo de transientes GW é cumulativo – ou seja, o GWTC-4.0 contém não apenas os novos resultados observados na O4a, mas também todos os catálogos anteriores. Para ilustrar isso, na **Figura 1** mostramos uma linha do tempo de todas as campanhas de observação (faixas coloridas) e o intervalo de dados abrangido por cada catálogo. Você notará que nossos catálogos seguem uma convenção de nomenclatura GWTC- <principal>.<secundário>, onde o número principal é

incrementado quando a abrangência de dados aumenta, e o número secundário é incrementado se houver uma alteração nos métodos/dados que descrevem os sinais (por exemplo, uma reanálise dos dados, como ocorreu com o [GWTC-2.1](#)). No passado, rotineiramente omitíamos o número secundário quando era 0 (veja, por exemplo, o [GWTC-3](#)). No entanto, descobrimos que isso pode causar certa confusão — por exemplo, GWTC-2 refere-se a GWTC-2.0 ou GWTC-2.1? Portanto, agora incluiremos sempre o número secundário ao nos referirmos a um catálogo específico. No entanto, ainda omitimos o número secundário quando nos referimos apenas à abrangência de dados (conforme mostrado na Figura 1).

A partir da Figura 1, você também verá que os dois detectores do LIGO estavam operacionais durante a O4a: todos os sinais candidatos e medições foram feitos apenas com dados desses dois detectores.

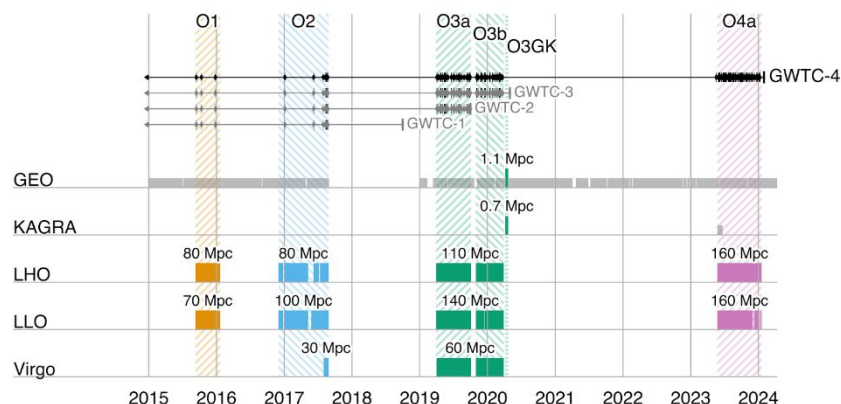


Figura 1: Linha do tempo das campanhas de observação mostra os períodos de captação de dados pelos observatórios de ondas gravitacionais [GEO](#), [KAGRA](#), [LIGO-Hanford](#) (LHO), [LIGO-Livingston](#) (LLO), e [Virgo](#). Os números acima dos blocos coloridos correspondem à distância aproximada que o detector pode observar uma fusão binária padrão de estrelas de nêutrons, fornecendo uma medida da sensibilidade. Ao longo da parte superior, fornecemos marcadores para quando os eventos foram adicionados ao GWTC, bem como barras horizontais mostrando a abrangência de dados em cada catálogo.

SAIBA MAIS:

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



O KAGRA coletou dados brevemente no início da campanha, mas sua sensibilidade foi insuficiente para contribuir com detecções.

Dentro do artigo introdutório, fornecemos pela primeira vez uma descrição detalhada da evolução dos detectores individualmente. Ao reunir essas informações em um único local, esperamos conectar melhor a comunidade astronômica que estuda as observações com a comunidade instrumental que constrói os detectores.

Espiando a escuridão

Podemos calcular o volume quadridimensional no tempo e no espaço observado pelos detectores (chamamos isso de “hipervolume”, por ser um volume com mais de três dimensões) simulando sinais e verificando se são recuperados, para então combinar essas informações com os detalhes sobre o [ciclo de trabalho](#) dos detectores. Na **Figura 2**, traçamos uma aproximação desse hipervolume em relação ao número cumulativo de detecções com probabilidade de origem astrofísica superior a 50%. Isso mostra quantos sinais foram detectados em cada campanha de observação e visualiza que, na O4a, mais do que duplicamos o número de sinais observados! As faixas no gráfico representam a incerteza: embora muitos candidatos tenham uma probabilidade de origem astrofísica muito próxima de 100%, aqueles com probabilidade de 50% são igualmente propensos a ser uma flutuação espúria de [ruído](#). Portanto, as faixas capturam o quão incertos estamos sobre o número de eventos observados.

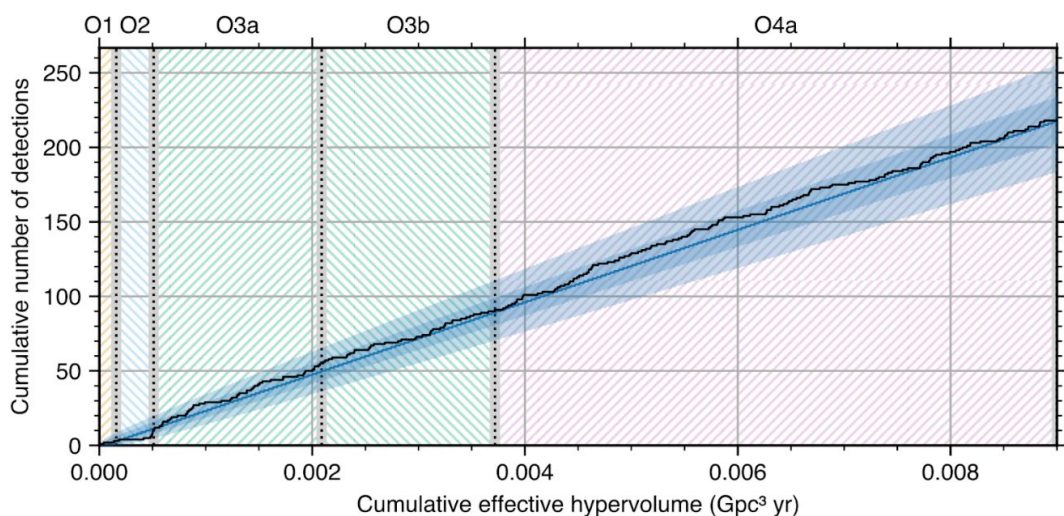


Figura 2: O número acumulado de detecções (candidatos encontrados com probabilidade de origem astrofísica superior a 50%) em função do hipervolume espaço-temporal aproximado investigado pelos detectores.

No restante do artigo, fornecemos uma revisão das fontes de [ondas gravitacionais transientes](#) observadas, concluindo com uma sinopse. Esta revisão não pretende substituir os diversos e excelentes livros didáticos da área, mas sim oferecer uma breve introdução à linguagem e à matemática que utilizamos para descrever nossas fontes ao longo desta edição temática. Isso garante que sejamos consistentes em nossa notação e fornece um ponto de referência único para pessoas interessadas no tema. Também incluímos, como apêndices, uma tabela de siglas frequentemente utilizadas e definições do glossário, além de uma breve discussão que estabelece convenções para a análise de dados.

O artigo introdutório prepara o terreno para o restante da edição de foco. Embora não contenha resultados científicos substanciais por si só, sua intenção é eliminar duplicações entre os demais artigos, garantir que permaneçam consistentes e fornecer definições claras para a área.

MÉTODOS

O artigo de métodos, “GWTC-4.0: Métodos para identificar e caracterizar transientes de ondas gravitacionais”, fornece os detalhes da metodologia utilizada para produzir o catálogo GWTC-4.0. Começando pelo desenvolvimento de modelos teóricos de [forma de onda](#) para colisões de buracos negros e estrelas de nêutrons, passamos então a discutir as [pipelines de busca](#) que geram as listas de candidatos. Cada candidato é subsequentemente submetido a pipelines de busca e triagem de candidatos, antes de passar pela [estimativa de parâmetros](#) para compreender as propriedades da fonte e por testes de consistência da forma de onda para validar as premissas subjacentes.

Aprimorando nosso jogo: a análise mais complicada até agora

Desde o fim da O3 e a publicação do GWTC-3.0, dedicamos um esforço significativo para aprimorar ainda mais nossas análises. Introduzimos novos modelos de forma de onda que descrevem com maior precisão a física de nossas fontes e são computacionalmente mais eficientes. Não apenas utilizamos os modelos mais recentes no GWTC-4.0, como agora empregamos quatro formas de onda diferentes para analisar muitos dos eventos:

o dobro do número utilizado no GWTC-3.0, permitindo-nos contabilizar melhor as imprecisões dos modelos. Também otimizamos nossos algoritmos de busca, introduzindo novas abordagens para melhorar a [eficiência](#) de detecção e automatizando tanto quanto possível a análise, de modo a ampliar nossa capacidade e garantir que nossos resultados sejam reproduzidos facilmente.

Uma perspectiva histórica

No artigo de métodos, alguns podem se surpreender com a inclusão de descrições históricas dos algoritmos utilizados desde o primeiro período de observação. Isso deve-se à natureza cumulativa do catálogo: se os dados antigos não forem reanalisados com novos métodos, é crucial que os utilizadores compreendam as metodologias originais que produziram os resultados (que podem divergir significativamente das aplicadas a dados recentes) ao consultarem eventos passados. Por isso, em nosso artigo de métodos, oferecemos tanto uma perspectiva histórica quanto uma descrição das novas alterações metodológicas.

Em suma, o artigo de métodos fornece uma visão geral do fluxo de trabalho utilizado, demonstrando como aproveitamos análises [online/offline](#), estudos preliminares e uma triagem criteriosa para garantir que os produtos finais sejam rigorosos e de máximo padrão de qualidade.

RESULTADOS

Mais sinais, mais variedade

Encontramos 128 novos candidatos com probabilidade de origem astrofísica superior a 50%. Isso eleva o número total de candidatos no catálogo GWTC para 218 — o dobro do tamanho anterior! Neste catálogo, apresentamos uma análise detalhada de 86 destes novos sinais. Este aumento significativo de detecções foi possibilitado tanto pela maior sensibilidade dos detetores quanto pelos avanços nas técnicas de análise utilizadas para extrair os sinais do ruído.

É empolgante ter tantas novas observações, uma vez que este novo conjunto inclui, maioritariamente, as fusões de [binárias de buracos negros](#) que os detetores já dominam na identificação, mas também sistemas que contêm buracos negros e estrelas de nêutrons, diferentes de tudo o que observamos até agora.

Do online para o offline (e vice-versa)

Durante o O4, produzimos alertas públicos online o mais rapidamente possível para candidatos prováveis. Isso permite que outros astrônomos realizem observações de acompanhamento para buscar qualquer emissão luminosa associada aos eventos. No período O4a, houve 1697 alertas online, dos quais 82 foram considerados altamente prováveis de origem astrofísica e sem problemas de qualidade de dados. Como mencionado anteriormente, o catálogo final inclui 128 candidatos de alta probabilidade, resultantes de análises offline que utilizam métodos de busca aprimorados. Contudo, desses 128, apenas 8 não foram detectados em tempo real! Isso demonstra que as buscas online estão tendo um desempenho excepcional, garantindo que os astrônomos recebam informações precisas rapidamente.

Questão de interesse

Dois dos elementos do catálogo parecem ter sido produzidos pela fusão de buracos negros com estrelas de nêutrons. Sinais como estes são fascinantes porque, em comparação com as fusões entre buracos negros que envolvem pouca ou nenhuma matéria "real", a presença de matéria proveniente da estrela de nêutrons pode potencialmente ser detectada no sinal. Para estes dois sinais, não conseguimos identificar tais efeitos, mas, quanto mais sinais desta natureza observarmos, maiores as chances de medirmos os impactos sobre a matéria.

Efeito de massa

Conseguimos medir diretamente a massa do sistema binário a partir do sinal. Na **Figura 3**, mostramos os valores mais prováveis das massas dos dois componentes: isto demonstra que, embora não tenhamos encontrado novas binárias de estrelas de nêutrons (no canto inferior esquerdo do gráfico), detectamos sistemas muito interessantes, provavelmente compostos por estrelas de nêutrons e buracos negros, além de novos eventos com massas totais superiores a 150 massas solares!

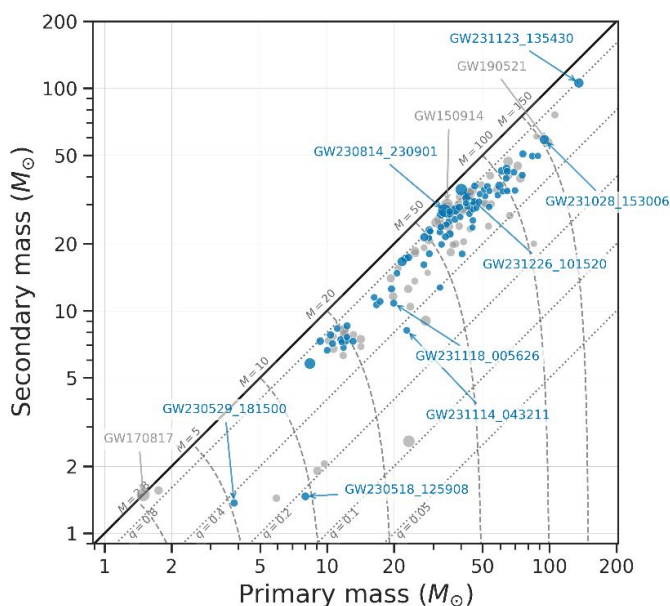


Figure 3: O gráfico massa-massa mostra os novos candidatos encontrados em O4a (em azul) e os candidatos de O1 a O3 (em cinza). Estas são estimativas pontuais que ignoram a incerteza substancial e relatam apenas os valores mais prováveis. Para cada candidato, o tamanho do marcador é proporcional à sua [relação sinal-ruído](#) de rede. As linhas pontilhadas indicam valores diferentes da razão de massa, q , da massa secundária dividida pela massa primária, e as linhas tracejadas indicam valores diferentes da massa total. Todas as massas estão em [massas solares](#). (Crédito: G. Ashton, Royal Holloway University of London.)

O spin correto

Conseguimos medir duas propriedades dos buracos negros ou estrelas de nêutrons envolvidos na fusão: a sua massa e o seu [spin](#). Caso estejam em rotação, podemos medir a velocidade de rotação de cada um e a orientação relativa dos eixos de rotação. Calculamos um valor denominado “[spin efetivo](#)” para cada sinal, que fornece uma visão geral útil da rotação dos dois componentes. Um spin efetivo fortemente positivo indica que um ou ambos os componentes estão girando rapidamente no mesmo sentido, enquanto um spin efetivo negativo sugere que os componentes estão girando em sentidos opostos.

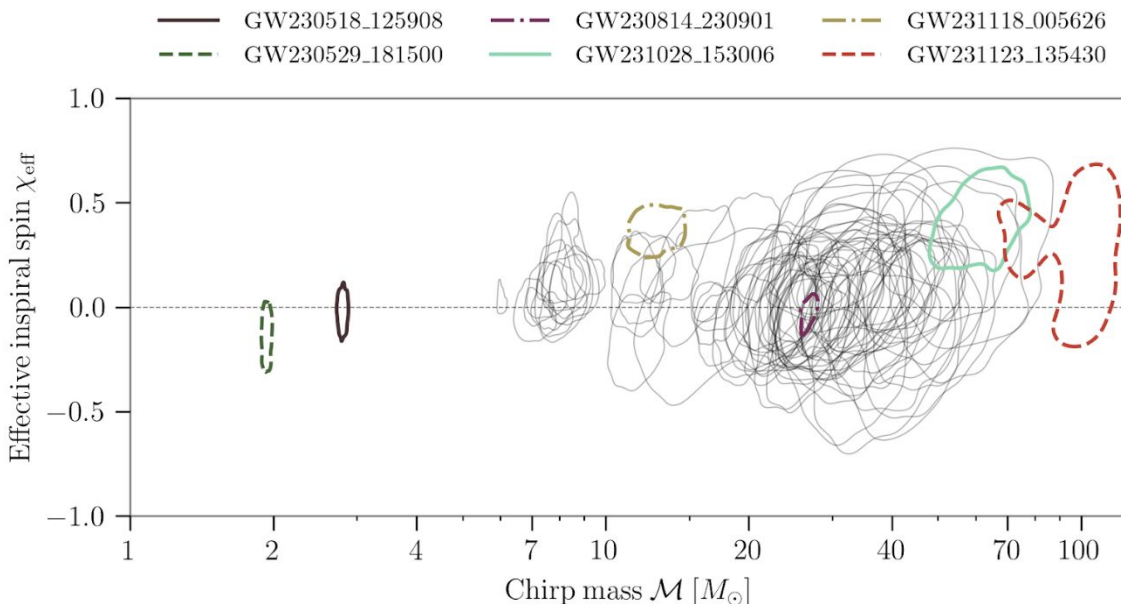


Figura 4: Gráfico da [massa de chirp](#) em função do spin efetivo para todos os novos candidatos do GWTC-4.0, com uma seleção de candidatos especialmente interessantes destacados por cores. Cada contorno delimita a região de 90% de [confiança](#) para os parâmetros do candidato.

O GWTC-4.0 duplica o número de sinais de ondas gravitacionais conhecidos. Esta é uma conquista fantástica e atesta os muitos avanços nos detetores. Os novos sinais proporcionam-nos novas percepções sobre buracos negros e estrelas de nêutrons e gerarão grande entusiasmo na comunidade científica, permitindo uma ampla gama de novos estudos.

SAIBA MAIS EM:

Visite nossos websites:

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

Leia uma pré-publicação gratuita dos artigos científicos completos.

- Artigo Introdutório: [Aqui](#) ou no [arXiv](#).
- Artigo dos métodos: [Aqui](#) ou no [arXiv](#).
- Artigo de resultados: [Aqui](#) ou no [arXiv](#).

Divulgação de dados do Centro de Ciência Aberta de Ondas Gravitacionais para o GWTC-4.0 disponível [aqui](#).

Traduzido por Cássius de Melo e Christian Bruzigués.

GLOSSÁRIO

Buraco negro: Região do espaço-tempo com gravidade tão intensa que impede a escape de qualquer coisa, incluindo a luz. Os buracos negros variam em tamanho: os buracos negros de massa estelar originam-se do colapso de estrelas e suas massas variam de algumas massas solares até cerca de 65 massas solares. Os buracos negros de massa intermédia variam entre aproximadamente 100 massas solares e 10^6 massas solares. Por fim, os buracos negros supermassivos variam de mais de 10^6 massas solares a mais de 10^9 massas solares.

Massa de chirp: Combinação matemática das massas de cada objeto compacto num sistema binário. A massa chirp determina a evolução orbital dominante do sistema devido à perda de energia por emissão de ondas gravitacionais.

Nível de confiança: T Percentagem de vezes em que se espera que o valor real esteja contido dentro do intervalo declarado.

Ciclo de trabalho: Fração de um período durante o qual um sinal ou sistema está ativo.

Eficiência: Fração de sinais simulados detectados, assumindo uma direção e tempo de chegada aleatórios. Expressa em função do tipo de forma de onda e da sua amplitude.

Ondas gravitacionais: Perturbações no espaço-tempo geradas por alguns dos processos mais violentos do universo, como a fusão de estrelas de nêutrons ou buracos negros.

Estrelas de nêutrons: Relíquia de uma estrela massiva. Quando a estrela esgota o seu combustível nuclear, morre de forma catastrófica (uma supernova) que pode resultar na formação de uma estrela de nêutrons: um objeto tão massivo e denso (embora não tanto quanto um buraco negro) que os átomos não conseguem manter a estrutura que lhes é característica na Terra. Estas estrelas têm uma massa semelhante à do Sol, mas um raio de cerca de dez quilómetros.

Ruído: Flutuações no sinal de medição de ondas gravitacionais devido a vários efeitos instrumentais e ambientais. A sensibilidade de um detetor de ondas gravitacionais é limitada pelo ruído.

Busca offline: Análises offline são pesquisas realizadas em dados de um período de observação anterior, tipicamente durante intervalos em que os detetores não estão em operação (para manutenção ou upgrades). Complementam as análises em tempo real (designadas online), realizadas durante os períodos de observação.

Estimativa de parâmetros: Técnica estatística usada para inferir os parâmetros astrofísicos correspondentes a um sinal de onda gravitacional.

Pipeline de busca: Programas computacionais que compreendem uma cadeia de processos que condicionam os dados para análise, filtram-nos e calculam várias quantidades para rejeitar o máximo de eventos de ruído possível e estimar a significância de candidatos a eventos astrofísicos.

Spin: Momento angular de um buraco negro em rotação; uma das propriedades definidoras de buracos negros, juntamente com massa e carga.

Strain: Mudança fracional na distância entre dois pontos de referência devido à deformação do espaço-tempo por uma onda gravitacional passageira. A deformação típica mesmo das ondas gravitacionais mais fortes que chegam à Terra é muito pequena — geralmente inferior a 10^{-21} .

Forma de onda: O comportamento da amplitude de um sinal de onda gravitacional em função do tempo.