

LIMITES SUPERIORES DO FUNDO ISOTRÓPICO DE ONDAS GRAVITACIONAIS IMPOSTOS PELO QUARTO PERÍODO DE OBSERVAÇÃO DE LIGO, VIRGO E KAGRA

O [fundo de ondas gravitacionais](#) (GWB, do inglês *Gravitational Wave Background*) é a sobreposição de numerosas [ondas gravitacionais](#) (OG) fracas e independentes geradas por diferentes fontes, o que produz um sinal persistente e incoerente em várias bandas de frequência, incluindo a faixa de frequência dos detetores de ondas gravitacionais [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) de 10-1000 Hz. As fontes de GWB podem ser categorizadas como “cosmológicas” ou “astrofísicas” com base na sua origem. As fontes astrofísicas incluem [supernovas de tipo II](#), [estrelas de neutrões](#) em rotação e a população de [coalescências de binários compactos](#) (CBCs) não resolvidas e fracas. A intensidade de fundo esperada para as CBCs é agora prevista com boa aproximação, assumindo que a população local observada de CBCs pode ser extrapolada para [desvios para o vermelho](#) mais elevados e que o modelo de [taxa de fusão](#) é bem compreendido (ver [Figura 1](#)). Além destas, existem fontes cosmológicas, tais como [cordas cósmicas](#), [inflação](#) e [transições de fase](#) de primeira ordem, que podem contribuir para compreender a época anterior à emissão do [Fundo Cósmico de Micro-ondas](#) (CMB), um período que de outra forma seria inacessível através da observação direta. A detecção do GWB representaria um importante marco científico, oferecendo conhecimentos profundos sobre fenômenos astrofísicos e cosmológicos. Na faixa de frequência nanohertz (ou seja, 10^{-9} Hz), várias [matrizes de temporização](#) de [pulsares](#) — [NANOGrav](#) (América do Norte), [EPTA](#) (Europa), [PPTA](#) (Austrália) e [InPTA](#) (Índia) — relataram evidências de um [fundo estocástico de ondas gravitacionais](#) (SGWB) com alta [significância](#) de detecção para um sinal de espectro comum, que se espera que seja produzido por uma categoria diferente de fontes do que o sinal na faixa de frequência LVK.

A nossa análise inclui dados do Advanced LIGO e do Advanced Virgo recolhidos durante os três primeiros [períodos de observação](#) (O1–O3), bem como dados da primeira parte do quarto período de observação (O4), durante o qual apenas o Advanced LIGO esteve em funcionamento. Focamo-nos na variação do GWB com a frequência, modelando o sinal como [isotrópico](#) (ou seja, igual em todas as direções), [não polarizado](#) (ou seja, sem direção preferencial de oscilação), [estacionário](#) (ou seja, com propriedades estatísticas que não mudam com o tempo) e [Gaussiano](#) (ou seja, onde essas propriedades estatísticas podem ser descritas [apenas em termos de média e variância](#)), considerando um tempo de observação suficientemente longo. O sinal também é considerado fraco em comparação com a [sensibilidade](#) do detetor. Nesta pesquisa, os dados de pelo menos dois detetores de ondas gravitacionais (por exemplo, [LIGO-Hanford](#) e [LIGO-Livingston](#)) são [correlacionados](#) para suprimir o [ruído](#) instrumental, ao mesmo tempo que aumentam a sensibilidade a um sinal de ondas gravitacionais comum a ambos os detetores. O ruído geralmente não está correlacionado entre os detetores; no entanto, um fundo estocástico induziria sinais correlacionados consistentes com o tempo de viagem da luz entre os detetores e a sua [função de redução de sobreposição](#) esperada.

Esta é a primeira vez que utilizamos o pygwb, uma biblioteca em [python](#) desenvolvida no âmbito da colaboração LVK para a busca de um SGWB. O pygwb oferece maior eficiência computacional e maior flexibilidade para personalizar a análise. A nossa técnica de análise garante que, tanto quanto sabemos, não há nenhum sinal correlacionado proveniente de ruído ambiental, tal como fontes instrumentais, geológicas ou artificiais. Além disso, mitigamos o efeito de [glitches](#) intensos por meio de uma técnica chamada [gating](#), que consiste em remover cada falha no [domínio do tempo](#). Os dados dos detetores foram [correlacionados](#) e um modelo de [lei de potência](#) foi usado para caracterizar como o sinal variava com a frequência. Métodos de [inferência Bayesiana](#) foram então usados para determinar o limite superior de 95% de [credibilidade](#) na amplitude de referência GWB Ω_{ref} , seja fixando o valor do índice espectral da lei de potência α ou calculando a média (conhecida como “marginalização”) sobre esse valor (ver [Tabela 1](#)).

Não foi possível afirmar uma detecção, embora tenhamos estabelecido [limites superiores](#) mais rigorosos para a [intensidade do SGWB](#) do que os publicados anteriormente, devido à inclusão dos dados mais recentes da primeira parte do O4.

Analisamos dados do campo magnético de sensores próximos a cada interferômetro para investigar ruídos globalmente correlacionados de [ressonâncias de Schumann](#). Essas ressonâncias podem imitar sinais de ondas gravitacionais ao acoplarem-se a componentes sensíveis, como ímanes de controlo dos espelhos de teste das extremidades, causando deslocamentos falsos do espelho e potencialmente levando à identificação incorreta do ruído magnético como um fundo estocástico de ondas gravitacionais. Para avaliar o risco dessa contaminação, medições de campo magnético de alta fidelidade no local, feitas por magnetômetros especializados localizados fora (onde as ressonâncias de Schumann são esperadas) e dentro dos dois observatórios LIGO, são cuidadosamente estudadas, procurando como essas medições estão acopladas, bem como o acoplamento dos campos dentro do edifício ao movimento dos espelhos.

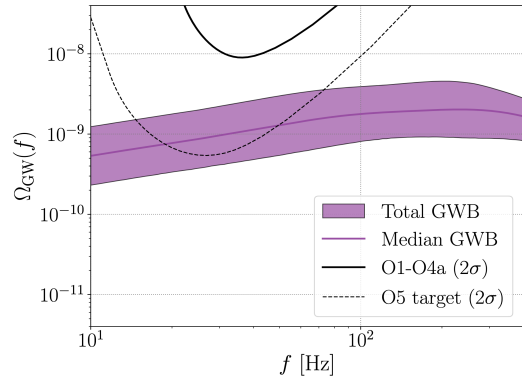


Figura 1: A sensibilidade ao GWB em função da frequência, a partir da análise dos três primeiros períodos de observação e da primeira parte do quarto período de observação (O1-O4a), é mostrada por uma linha preta contínua, juntamente com a sensibilidade alvo para o quinto período de observação O5, mostrada por uma linha preta tracejada. A linha roxa sólida mostra a estimativa [mediana](#) do fundo total (de buracos negros binários, estrelas de neutrões binárias e pares de estrelas de neutrões-buracos negros) em função da frequência, enquanto a faixa roxa sombreada ilustra 90% das incertezas credíveis sobre este fundo.

α	O1-O4a	O1-O3	Improvement
0	2.8×10^{-9}	5.8×10^{-9}	2.1
2/3	2.0×10^{-9}	3.4×10^{-9}	1.7
3	3.2×10^{-10}	3.9×10^{-10}	1.2
Marginalized	2.9×10^{-9}	6.6×10^{-9}	2.3

Tabela 1: Limites superiores a um nível de credibilidade de 95% na amplitude Ω_{ref} do GWB, assumindo uma distribuição *a priori* logarítmica uniforme. A última coluna mostra as melhorias em relação à análise anterior.

Visita as nossas páginas web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Realizámos análises de correlação cruzada para estimar a contaminação magnética em intervalos de frequência individuais. Também examinámos se o efeito combinado da contaminação magnética em vários intervalos de frequência poderia exceder o nosso limiar de sensibilidade. A nossa conclusão é que as nossas estimativas de ruído magnético correlacionado estão bem abaixo da sensibilidade que alcançamos na primeira parte do O4, tanto em frequências individuais como na soma de várias frequências (ver **Figura 2**). Além disso, implementámos uma estrutura, baseada em inferência Bayesiana, para ajustar simultaneamente o GWB e as ressonâncias Schumann nos nossos dados. Em concordância com os nossos outros métodos, não encontramos evidências de um sinal proveniente das ressonâncias GWB ou Schumann.

Também determinámos limites superiores para os chamados modos *escalares* ou *vetoriais* para a **polarização** do SGWB, que são polarizações “proibidas” na teoria da **Relatividade Geral** de Einstein, onde apenas são permitidos modos de polarização *tensoriais*. A observação destas polarizações alternativas indicaria que a teoria de Einstein precisa de ser modificada. Esta análise beneficia da existência de mais detetores de ondas gravitacionais na rede, uma vez que isso permite distinguir melhor as diferentes polarizações.

Na nossa análise, não encontramos evidências dessas polarizações “proibidas”. O nosso resultado da inferência Bayesiana também indicou que um fundo de polarização tensorial (de acordo com a Relatividade Geral) ainda é preferível às alternativas vetoriais, escalares e de polarização mista.

Finalmente, considerámos os nossos limites superiores para o GWB no contexto astrofísico esperado da fusão de binários compactos. Apresentamos estimativas atualizadas dos espectros de densidade de energia resultantes de binários de buracos negros distantes, binários de estrelas de neutrões e pares de estrelas de neutrões e buracos negros, incorporando medições atualizadas das taxas de fusão e demografia dessas fontes. Descobrimos que o GWB pode ser potencialmente detetado por uma versão atualizada dos detetores atuais, conhecidos como **LIGO A+ e Advanced Virgo Plus** (ver **Figura 1**).

Também aplicámos uma análise conjunta ao GWB e às observações de binários compactos individuais do nosso **mais recente catálogo de OGs publicado, o GWTC-4**. Uma vez que o GWB é sensível a fusões de binários a distâncias maiores do que os binários compactos detectáveis individualmente, é possível que as medições do GWB possam melhorar as medições da taxa de fusão de buracos negros binários (BBHs) no universo primitivo. Aqui, a **Figura 3** mostra a **densidade da taxa de fusão** inferida (ou seja, o número de fusões esperadas por unidade de volume de espaço por ano) de BBHs ao longo do tempo cósmico, inferida a partir da combinação dos resultados da nossa análise SGWB e observações de binários compactos individuais do GWTC-4. Para comparação, as curvas pretas pontilhadas indicam limites de credibilidade de 90% obtidos a partir da análise de fusões de BBH no nosso catálogo anterior GWTC-3. Os novos resultados são consistentes com as estimativas anteriores, embora agora tenhamos constatado que a taxa de aumento da taxa de fusão está próxima do limite superior dos limites anteriores. Ao adicionar os novos dados da primeira parte do O4, as nossas restrições à taxa de fusão para redshifts mais elevados melhoraram, embora ainda sejam pouco restritas — conforme indicado pela ampla dispersão das amostras individuais mostradas como linhas vermelhas na Figura 3.

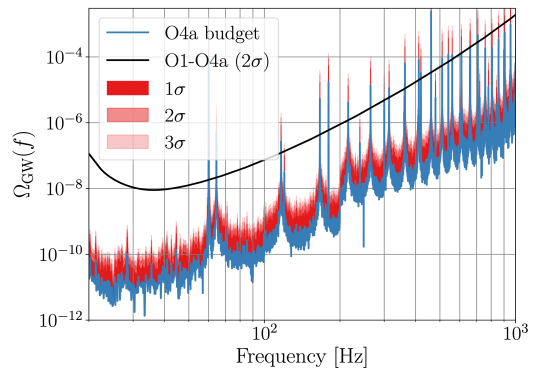


Figura 2: O efeito do sinal magnético correlacionado, chamado “O4a budget” (expresso em termos da densidade de energia das ondas gravitacionais que seriam inferidas a partir deste sinal correlacionado nos interferômetros, Ω_{GWB}). O “O4a budget” calculado é mostrado, em azul, incluindo incertezas 1 σ , 2 σ , and 3 σ (em tons progressivamente mais claros de vermelho). A curva de sensibilidade integrada da lei de potência, a preto, chamada O1-O4a 2 σ , mostra a sensibilidade da pesquisa para uma acumulação de ruído magnético em vários intervalos de frequência. Vemos que a banda vermelha está bem abaixo dessa curva de sensibilidade preta, exceto para as características de banda estreita introduzidas pelo ORF e harmônicos da linha de energia de 60 Hz.

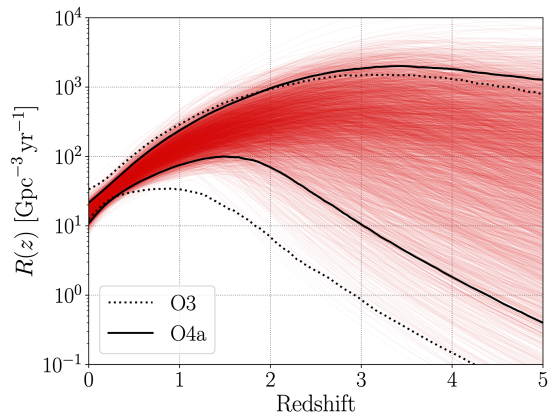


Figura 3: Evolução inferida do redshift da densidade da taxa de fusão de BBH, medida hierarquicamente usando as detecções diretas de BBH no GWTC-4 e o limite superior do GWB. As linhas sólidas a preto e vermelho representam, respectivamente, os limites de credibilidade de 90% e as amostras individuais que estimam a evolução do redshift, enquanto as linhas pretas pontilhadas denotam os limites de credibilidade de 90% obtidos com o nosso catálogo anterior GWTC-3.

GLOSSÁRIO

Inferência Bayesiana: Método que nos permite combinar novos dados com algum conhecimento que já possuímos (comumente conhecido como *informação prévia*), expresso como probabilidade. A combinação é usada para atualizar o nosso conhecimento atual e também é expressa como probabilidade (a *probabilidade posterior*). Mais informações podem ser encontradas [aqui](#).

Fundo Cósmico de Micro-ondas (CMB): Radiação eletromagnética proveniente de uma fase inicial do universo, também conhecida como “radiação relíquia”. Para mais informações, vê [aqui](#).

Intervalo de credibilidade: Intervalo dentro do qual o valor de um parâmetro incerto se encontra com uma determinada probabilidade.

Correlação cruzada: Medida da semelhança entre dois (ou mais) conjuntos de dados. Se os dados de dois detetores de ondas gravitacionais separados forem considerados correlacionados, isso pode indicar a presença de um fundo de ondas gravitacionais (desde que outras possíveis fontes de correlação sejam descartadas).

Intervalos de frequência: Intervalos entre amostras ao analisar funções matemáticas ou sinais físicos em relação à frequência, em vez do tempo.

Glitch: Ruído repentino nos dados das ondas gravitacionais, análogo a um estalo estático ouvido num altifalante, que às vezes pode ser confundido com um sinal real de ondas gravitacionais ou mascará-lo. Lê mais sobre *glitches* [aqui](#).

Polarização das ondas gravitacionais: Forma geométrica do alongamento e compressão do espaço-tempo causados por uma onda gravitacional separados forem considerados correlacionados, isso pode indicar a presença de um fundo de ondas gravitacionais (desde que outras possíveis fontes de correlação sejam descartadas).

Período de observação: Período durante o qual os nossos interferômetros estão em plena atividade, recolhendo dados para serem analisados posteriormente. O quarto período de observação LIGO-Virgo-KAGRA (O4) começou em maio de 2023.

Função de redução de sobreposição (ORF): Um fator dependente da frequência que codifica informações sobre a sensibilidade de um determinado par de detetores a um fundo de ondas gravitacionais de fontes. A ORF depende da geometria relativa do par de detetores, ou seja, da sua separação e orientação relativa. Lê mais detalhes [aqui](#).

Ressonâncias de Schumann: Ondas de rádio de frequência extremamente baixa, geradas por raios, que permanecem presas entre a superfície da Terra e a ionosfera, uma camada atmosférica que começa a cerca de 60 km de altitude. Lê mais [aqui](#).

Curva de sensibilidade: A sensibilidade de um detetor de ondas gravitacionais é determinada por um grande número de fontes de ruído correspondentes a muitos fenômenos físicos diferentes (por exemplo, ruído sísmico ou eletrônico). A soma de todas essas fontes de ruído determina a sensibilidade do detetor em cada frequência, fornecendo a sua curva de sensibilidade.

Intensidade do GWB: A densidade energética de ondas gravitacionais. É expressa como a fração da energia total do Universo na forma de ondas gravitacionais.

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](#). Encontra mais informações sobre o conceito geral de ondas gravitacionais [aqui](#). Lê mais sobre as **vantagens de múltiplos detetores** para pesquisas de ondas gravitacionais. Sabe mais sobre **polarizações “proibidas” na Relatividade Geral**.

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