

# LIMITES SUPERIORES PARA O FUNDO ISOTRÓPICO DE ONDAS GRAVITACIONAIS, ATUALIZADOS COM DADOS DE LIGO, VIRGO E KAGRA DE ABRIL DE 2024 A ABRIL DE 2025

Apresentamos uma procura atualizada pelo fundo estocástico e isotrópico de ondas gravitacionais (FOG) utilizando dados dos detetores Advanced LIGO das três primeiras partes do quarto período de observação (O4a–O4c1), combinados com dados de períodos de observação anteriores. Embora não tenha sido encontrada evidência de um sinal de FOG, o aumento do tempo de observação e o tratamento aperfeiçoado do ruído instrumental permitem estabelecer limites superiores mais estritos para modelos astrofísicos e cosmológicos de FOG. Testámos ainda a presença de ruído magnético correlacionado, não tendo sido encontrada qualquer contaminação significativa. Estes limites melhorados fornecem restrições mais fortes ao fundo de coalescência de objetos compactos em sistemas binários e à evolução das taxas de fusão de buracos negros.

O [fundo de ondas gravitacionais](#) (FOG) é a sobreposição de dezenas de milhares de sinais demasiado fracos para serem detetados individualmente, sendo composto por todo o tipo de sinais, tais como a [coalescência de objetos compactos em sistemas binários](#) (CBCs), [supernovas de colapso de núcleo](#) e [estrelas de neutrões](#) em rotação, que são categorizados como “fontes astrofísicas”, bem como [cordas cósmicas](#), [transições de fase](#) e [inflação cósmica](#), entre outros, que são categorizados como “fontes cosmológicas”. O conjunto destas fontes, o FOG, tem uma amplitude que pode ser estimada estatisticamente através da [correlação cruzada](#), no [domínio do tempo](#), dos dados recolhidos pelos vários detetores. Nesta procura, assumimos que o FOG é [isotrópico](#) (ou seja, igual em todas as direções do céu).

Na primeira parte do [período de observação](#), conhecida como O4a, a [colaboração LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) recolheu 108,41 dias de dados do observatório [Advanced LIGO](#). Embora não se tenha encontrado qualquer evidência de um sinal, estabelecemos limites superiores conservadores para diferentes modelos. Neste artigo, a estratégia principal de deteção permaneceu [igual a O4a](#), mas incluímos também 117,05 dias de dados relativos às fases O4b e O4c1, recolhidos entre as 17:00 UTC de 10 de abril de 2024 e as 15:00 UTC de 1 de abril de 2025. Apesar de o detetor [Virgo](#) se ter juntado ao período de observação no início de O4b, não incluímos os seus dados na nossa análise, dada a melhoria muito reduzida que esses dados trariam aos resultados finais.

À medida que acumulámos mais dados do período de observação O4, surgiram novos desafios relativos à qualidade dos dados. Notámos que algumas características de ruído nos dados (por exemplo, ressonâncias mecânicas de componentes óticos nas regiões de baixa frequência, [bandas laterais](#) associadas a harmónicos, isto é, múltiplos da frequência das linhas de alimentação elétrica, ao longo de todo o domínio de frequências, e outras características instrumentais nas regiões de alta frequência) se encontravam espalhadas por todo o espectro de frequências, dos 20 aos 1726 Hz. Por isso, adotámos um método mais robusto para remover (*notch*, em inglês) estes ruídos indesejados, aplicando aos dados uma série de cortes no domínio da frequência conhecidos como lista de *notches*. Esta metodologia resultou em duas listas distintas: uma para os dados de O4a, que consiste numa versão atualizada da apresentada no nosso [artigo anterior](#), e outra para o conjunto de dados de O4b–O4c1. Consequentemente, apresentamos também neste artigo resultados atualizados para os períodos de observação de O1 a O4a.

Na **Tabela 1**, reportamos limites superiores atualizados para a amplitude do FOG, com [nível de confiança](#) de 95%, obtidos a partir dos dados de O1–O4a e O1–O4c1, para diferentes *índices* espectrais conforme as fontes que assumimos como predominantes. As restrições do conjunto O1–O4a diferem do [artigo anterior](#) devido à nova lista de *notches*, mas sem significado estatístico. Contudo, a inclusão dos dados de O4b e O4c1 melhora os limites superiores por um fator de **1,3 a 1,5**.

| A priori do índice espectral | Resultado O1–O4c1     | Resultado O1–O4a      | Fator de melhoria |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 0                            | $2,8 \times 10^{-9}$  | $3,9 \times 10^{-9}$  | 1,4               |
| 2/3                          | $2,0 \times 10^{-9}$  | $2,8 \times 10^{-9}$  | 1,4               |
| 3                            | $2,6 \times 10^{-10}$ | $3,5 \times 10^{-10}$ | 1,3               |
| Marginalizado                | $2,7 \times 10^{-9}$  | $4,1 \times 10^{-9}$  | 1,5               |

**Tabela 1:** Limites superiores para a amplitude de FOG em diferentes modelos, leis de potência simples com índices espectrais de 0, 2/3 e 3, representando FOGs originados, respetivamente, por inflação ou cordas cósmicas, CBCs ou supernovas. Considerámos ainda a marginalização (média) sobre diferentes valores do índice espectral.

## PARA SABER MAIS:

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

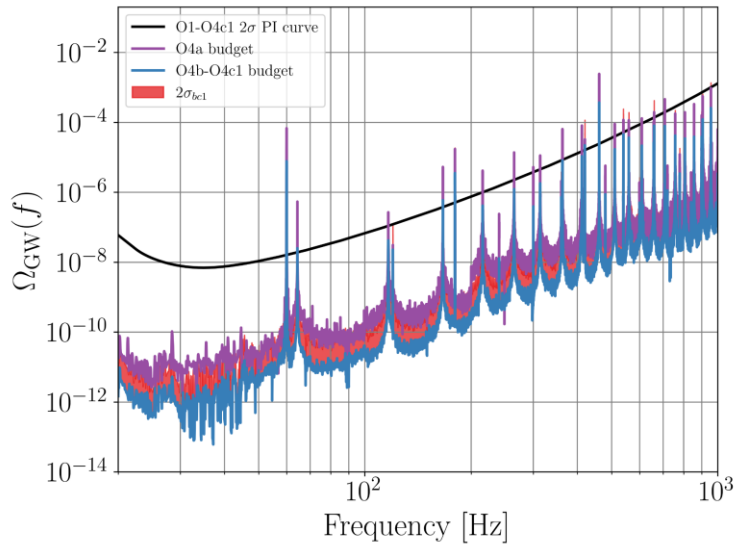


Determinámos também limites superiores para um FOG com diferentes modos de [polarização](#) (*vetoriais* ou *escalares*), previstos por teorias alternativas da gravidade mas “[proibidos](#)” pela [Relatividade Geral de Einstein](#) (que permite apenas modos *tensoriais*). A observação de um FOG com estes modos de polarização diferentes implicaria a necessidade de modificar a Relatividade Geral. Contudo, não encontrámos evidências destas polarizações “proibidas”, estabelecendo limites superiores para fundos com polarização vetorial e escalar muito mais estritos do que em análises anteriores.

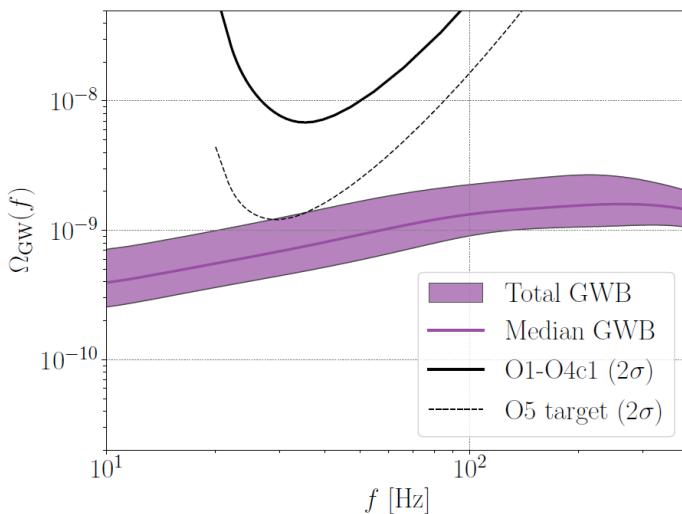
Na nossa análise, assumimos que o ruído nos diferentes detetores de OGs é [não-correlacionado](#). Isto permite aplicar a [correlação cruzada](#) aos dados de pelo menos dois detetores e suprimir eficazmente o ruído instrumental. Contudo, ruídos correlacionados globalmente devido a fenómenos magnéticos, como as [ressonâncias de Schumann](#), podem induzir sinais correlacionados entre detetores e levar à identificação errónea de ruído magnético como um sinal do FOG. Para avaliar esta potencial fonte de contaminação, utilizamos dois métodos complementares.

Em primeiro lugar, monitorizámos o ruído magnético com sensores instalados junto aos detetores, correlacionando dados de diferentes magnetómetros para estimar o ruído magnético em [intervalos de frequência](#) individuais. Avaliámos depois se o seu efeito combinado em múltiplos intervalos ultrapassava o limiar de [sensibilidade](#). Contudo, tanto na análise por intervalos individuais como combinados, verificámos que o ruído magnético correlacionado está muito abaixo desse limiar, exceto em picos estreitos de frequência introduzidos pela *Função de Redução de Sobreposição* (função geométrica que reflete o facto de os detetores não partilharem a mesma localização ou alinhamento) e por [harmónicos](#) da linha de alimentação elétrica de 60 Hz (ver a **Figura 1**). Assim, concluímos que o ruído magnético correlacionado não afeta os nossos resultados.

Na banda de frequências do nosso detetor, aproximadamente 10–2000 Hz, a fonte astrofísica mais promissora para um FOG é o sinal combinado de numerosos CBCs distantes, incluindo [sistemas binários de buracos negros](#) (BBH), [binários de estrelas de neutrões](#) (BNS) e [binários de estrela de neutrões–buraco negro](#) (NSBH). Atualizámos as estimativas dos espetros

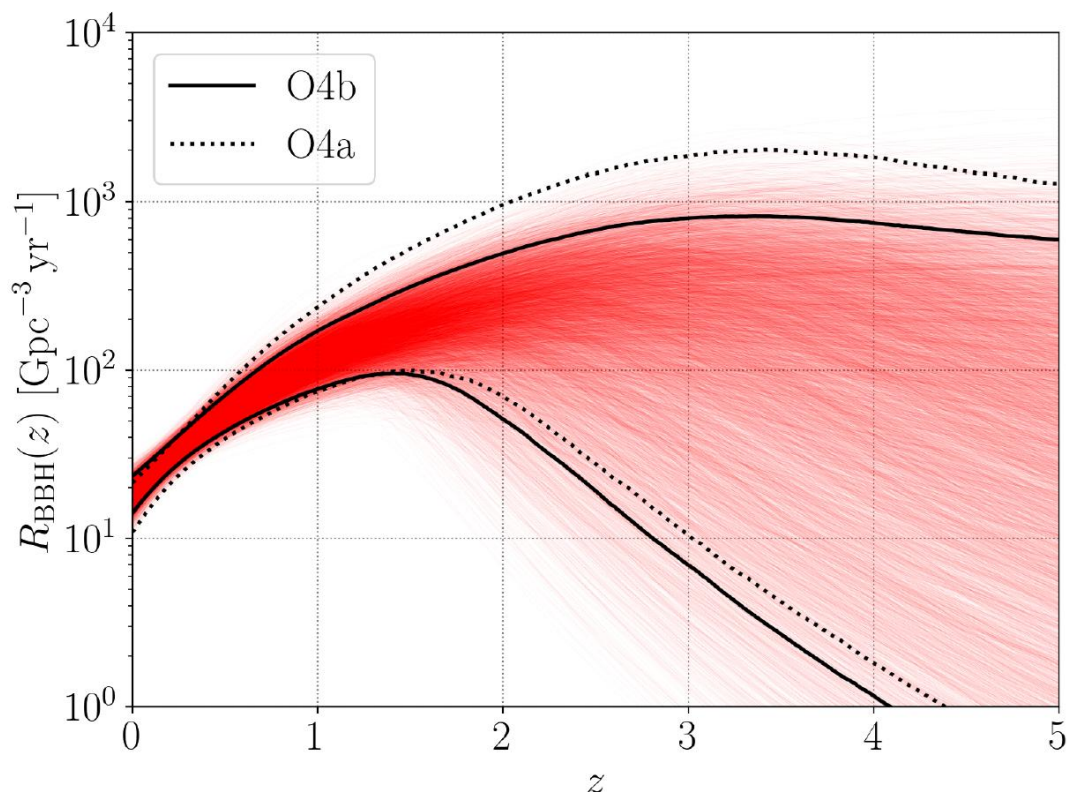


**Figura 1:** Estimativa do *orçamento magnético* (isto é, a densidade de energia do ruído magnético correlacionado) em função da frequência. O orçamento magnético para análise de O4a é apresentado a roxo e o de O4b-O4c1 a azul. A curva preta com a legenda “O1–O4c1 2σ PI” mostra a sensibilidade a um sinal. A faixa vermelha representa a incerteza a 2σ para o orçamento de O4b–O4c1, o que significa que temos 95% de confiança de que o valor real se encontra neste intervalo. Note-se que, à exceção de alguns picos estreitos de frequência específicos, os orçamentos magnéticos de O4a e O4b-O4c1 estão muito abaixo do limiar de sensibilidade. A amplitude do orçamento de O4b–O4c1 é inferior à de O4a porque os fatores de calibração dos magnetómetros foram re-medidos durante O4b, fornecendo valores mais precisos do que os utilizados na análise de O4a.



**Figura 2** (Fig. 6 do nosso artigo): Comparação do fundo total previsto de BBH, BNS e NSBH com a sensibilidade atual e projetada da rede de detetores. A linha preta contínua mostra a sensibilidade a um FOG para O1-O4c1 e a linha preta tracejada indica a sensibilidade-alvo para O5. A curva roxa e a respectiva faixa sombreada mostram a estimativa mediana do fundo total e a sua [região de credibilidade](#) ao nível de 90% (isto é, a região onde existe 90% de probabilidade de o FOG total se encontrar).

de densidade de energia (ou seja, a [densidade de energia](#) em função da frequência) resultantes destas fontes e comparámo-los com a [curva de sensibilidade](#) da procura aqui apresentada e com a sensibilidade-alvo projetada para os detetores LIGO no seu quinto período de observação, O5 (ver a **Figura 2**). Verificámos que o fundo de CBC poderá aproximar-se da sensibilidade-alvo esperada para O5. Em particular, para a população de fontes BBH, combinámos as deteções diretas do nosso catálogo mais recente [GWTC-5.0](#) com os limites superiores do FOG estocástico aqui apresentados, para inferir a evolução com o [desvio para o vermelho](#) da [densidade da taxa de fusão](#) de BBH (ver a **Figura 3**). Isso demonstra uma melhoria significativa no limite superior para o FOG estocástico em relação aos resultados de O4a referidos [neste resumo](#).



**Figura 3** (adaptada da Fig. 4 do nosso artigo): Evolução da densidade da taxa de fusão de BBH com o desvio para o padrão, inferida de forma hierárquica a partir das deteções diretas de BBH no GWTC-5.0 (que inclui O4b) e do limite superior do FOG. As linhas pretas e vermelhas contínuas mostram, respetivamente, os limites de credibilidade a 90% e as amostras individuais que estimam a evolução com o desvio para o vermelho. Adicionalmente, os limites de credibilidade a 90% obtidos anteriormente com o GWTC-4 (que incluiu O4a) estão indicadas pelas linhas pontilhadas.

## GLOSSÁRIO

**Fundo estocástico de ondas gravitacionais** – Fundo aleatório de ondas gravitacionais formado pela sobreposição de sinais demasiados fracos para serem detetados individualmente.

**Correlação cruzada** – Medida da semelhança entre dois (ou mais) conjuntos de dados. A existência de correlação entre dados de dois detetores distintos de ondas gravitacionais pode indicar a presença de um fundo de ondas gravitacionais (desde que outras fontes de correlação sejam excluídas).

**Polarização** – Refere-se às formas independentes em que uma onda pode oscilar. Para as ondas gravitacionais na Relatividade Geral, existem dois modos independentes de polarização, denominados “+” e “x”. Isto significa que uma onda gravitacional estica e comprime um anel de partículas na forma de um + e de um x.

**Ressonâncias de Schumann** – estruturas de frequência extremamente baixa no espectro do campo eletromagnético da Terra, geradas e excitadas por descargas elétricas na atmosfera.

## PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web: [www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/) (KAGRA)

Lê uma pré-impressão 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 [aqui](#).

Sabe mais sobre polarizações “proibidas” na Relatividade Geral [aqui](#).

Visão geral dos nossos resumos científicos da LVK: <https://ligo.org/science-summaries/>.

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