

## NOVOS LIMITES SUPERIORES PARA O FUNDO DE ONDAS GRAVITACIONAIS ISOTRÓPICO

A [Radiação Cósmica de Fundo \(RCF\)](#) nos forneceu informação acerca da origem do Universo, uma vez que é a radiação eletromagnética mais antiga que se pode medir. Do mesmo modo, existe um [Fundo de Ondas Gravitacionais \(FOG\)](#) formado pela superposição de ondas gravitacionais (OG) geradas por diferentes fontes astrofísicas e cosmológicas, sendo possível voltar mais no tempo do que a RCF, devido ao fraco acoplamento das OG e da matéria. Exemplos de fontes astrofísicas incluem binários compactos coalescentes (SBC) distantes, que não podem ser resolvidos individualmente, e colapso de núcleo por supernovas. A previsão para o fundo de SBC é conhecido, mas não se sabe sobre a amplitude do fundo de supernovas, embora é certo que exista. Existem outras fontes especulativas como as cordas cósmicas, a inflação e transições de primeira fase, que são exemplos de fontes cosmológicas do FOG. Detectar qualquer um desses fundos de OG seria um grande avanço e forneceria grandes insights sobre o universo.

Nós analisamos os dados das três primeiras corridas observacionais (O1, O2 e O3) dos detectores Virgo e LIGO (avançados). Não fomos capazes de afirmar uma detecção, embora tenhamos colocado limites superiores na intensidade do FOG que havia sido publicado anteriormente (fig. 1). Nós melhoramos a sensibilidade da busca aplicando um processo que remove o excesso de ruído. Durante o processo, nós nos certificamos de que não havia sinal correlacionado com o ruído ambiente, como o instrumental, o geológico ou ruído de fontes humanas. Além disso, diminuímos o efeito dos *glitches* fortes por uma técnica chamada *gating*, utilizada pela primeira vez em uma busca pelo fundo de OG.

Essa técnica zera todos os *glitches* no domínio do tempo. Também foi a primeira vez que são incluídos dados do Virgo na busca pelo fundo de OG. Os dados dos dois interferômetros foram correlacionados e então utilizados para se determinar o limite superior para a amplitude do sinal do FOG, por interferência Bayesiana, com um nível de confiança de 95%. A correlação cruzada dos dados permitiu-nos remover o ruído ambiental residual da análise, assumindo que são não-correlacionados entre os detectores. Os detectores alinhados e colocalizados são os mais sensíveis ao FOG, mas também a fontes de ruído locais. Portanto, a sensibilidade para o FOG é dominada pelo par de detectores LIGO, que são os mais próximos de serem colocalizados e alinhados, embora ainda forneçam significativamente menos do que a sensibilidade máxima.

A contribuição do detector Virgo para a sensibilidade é de apenas alguns pontos percentuais, devido à sua distância e orientação em comparação com os detectores LIGO. Graças aos esforços incansáveis de todos os cientistas para melhorar os interferômetros, nosso limite superior atual é cerca de 5 vezes melhor em comparação com os resultados anteriores. Embora parte dessa melhoria se deva simplesmente à análise de uma quantidade maior de dados, a maior parte do aumento foi devido ao aumento na sensibilidade. Se os interferômetros operassem com a mesma sensibilidade do O2, os dados adicionais só teriam levado a uma melhora no limite superior de menos de um fator de 2.

Também pesquisamos ruído magnético globalmente correlacionado, conhecido como [ressonâncias Schumann](#), observando as medições do campo magnético usando sensores perto dos três interferômetros. Identificar as ressonâncias de Schumann é necessário porque elas podem aparecer como um fundo eficaz e, assim, "poluir" nosso sinal. Os campos magnéticos se acoplam a partes críticas do interferômetro, por exemplo, os ímãs nos espelhos finais, usados para controlar os espelhos e, portanto, o interferômetro. Se este acoplamento for forte o suficiente, ele pode simular um sinal observável onde o deslocamento do espelho não é devido à passagem de GW, mas devido a campos magnéticos. Consequentemente, as ressonâncias de Schumann podem causar altas correlações que podem nos levar a alegar erroneamente uma detecção de GWB.

Para construir uma previsão de possível contaminação magnética (veja a Figura 2), precisamos de dois ingredientes principais. O primeiro é são medidas acuradas do campo magnético medidos por detectores sensíveis próximos aos detectores. O outro é a medida de como esses campos se acoplam aos interferômetros e, conseqüentemente, se há possibilidade de imitar um sinal de OG. Para determinar esse acoplamento, nós utilizamos uma bobina para gerar campos magnéticos fortes próximos ao detector e medir seus efeitos. Nós medimos a contaminação magnética de duas formas. Primeiro, procuramos a contaminação em bins de frequência individuais. Depois, vimos se era possível que a contaminação magnética em diferentes bins se acumulasse e resultasse em algo acima da sensibilidade do detector.

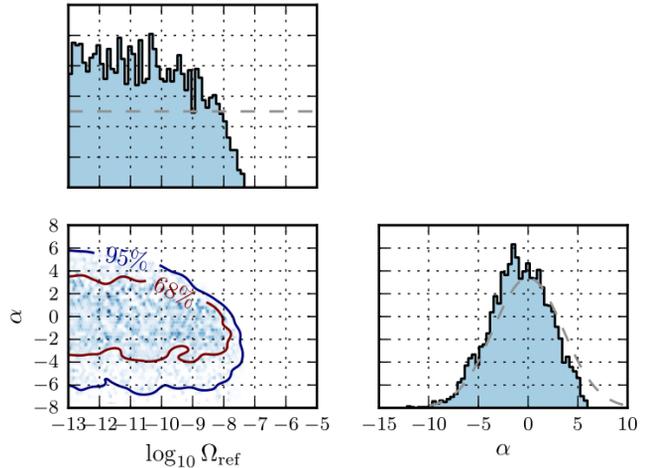


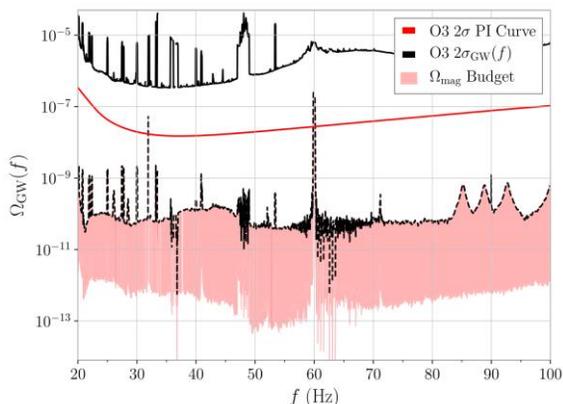
Figura 1: A figura mostra a distribuição de probabilidade para a amplitude do fundo de ondas gravitacionais  $\Omega_{ref}$  e o índice spectral  $\alpha$ ,  $\Omega_{ref}(f/25 \text{ Hz})^\alpha$ , nossa hipótese sobre a dependência do fundo com a frequência  $f$  (O que inclui a dependência com a frequência de um número de possíveis fontes). Essas distribuições mostram que os dados tendem a valores menores de  $\Omega_{ref}$ . A linha tracejada em cinza mostra as hipóteses "a priori" sobre os parâmetros. As curvas com 68% e 95% mostram as regiões que encerram essas porcentagens da probabilidade total.

Nossa conclusão é que nossas estimativas medidas de ruído magnético correlacionado estão bem abaixo da sensibilidade que alcançamos no O3, tanto em frequências individuais quanto contabilizando uma soma em várias frequências (ver Figura 2). Além disso, implementamos um framework, baseado em inferência Bayesiana, para ajustar simultaneamente para uma ressonância seja do FOG ou de Schumann em nossos dados. Consistente com nossos outros métodos, não encontramos nenhum sinal do FOG nem das ressonâncias de Schumann. No entanto, espera-se que esta estrutura recém-desenvolvida seja extremamente útil em pesquisas futuras, à medida que nossa sensibilidade aumenta ainda mais.

Também determinamos os limites superiores em um fundo de OG polarizado escalar ou vetorialmente. Estas são polarizações “proibidas” na relatividade geral (RG), onde polarizados tensoriais são permitidos. A observação de polarizações alternativas indicaria que a teoria da relatividade geral de Einstein deveria ser modificada para algo mais complicado. Essas pesquisas por polarizações além da RG se beneficiaram com a adição de dados do Virgo, já que adicionar mais detectores à rede pode ajudar a distinguir entre as diferentes polarizações. Não encontramos evidências dessas polarizações “proibidas”. Outras observações também são consistentes com OGs tendo polarizações puramente de tensoriais, como a observação do sinal de estrela de nêutrons binário [GW170817](#).

Também usamos um modelo para prever o fundo devido aos binários compactos (Figura 3), que pode ser a primeira fonte a ser detectada pelos interferômetros, conforme discutido [aqui](#). Incorporamos as observações mais recentes do catálogo LIGO-Virgo [GWTC-2](#). Descobrimos que o FOG pode ser potencialmente detectado por uma versão atualizada dos detectores atuais conhecidos como [LIGO A+](#) e [Advanced Virgo Plus](#). Também é possível que as medições do fundo de OGs possam melhorar as medições da taxa de fusão de buracos negros no início do universo. Embora este não seja o caso na O3, mostramos que o GWB pode ser útil futuramente.

Apesar do fato de que não fomos capazes de anunciar a detecção de um Fundo de Ondas Gravitacionais – ainda -, esta análise foi um grande passo à frente em nosso campo. Muitos recursos foram introduzidos pela primeira vez na análise, como a inclusão de dados de um terceiro interferômetro, o uso de *gating* para remover *glitches*, a integração de um ajuste para ressonâncias de Schumann em uma estrutura bayesiana consistente e o uso de um modelo para prever o fundo gerado pelos sistemas binários compactos. Esses novos recursos podem ser críticos para pesquisas futuras, quando atingirmos a sensibilidade para reivindicar uma detecção.



**Figura 2:** Esse gráfico mostra os efeitos do sinal magnético correlacionado, chamado de  $\Omega_{Mag}$  (expressado em termos da densidade de energia de uma onda gravitacional que seria inferida nos interferômetros,  $\Omega_{GW}$ ), tanto para bins de frequência individuais (preto tracejado) quanto para o efeito integrado de múltiplos bins de frequência (região em vermelho). A topo da região em Vermelho (tracejada em preto) está abaixo da linha de sensibilidade do detector, chamada de  $2\sigma_{GW}(f)$ , mostrando que a contaminação magnética está bem abaixo de nossa sensibilidade para cada bin de frequência. A curva vermelha de sensibilidade, chamada de  $2\sigma$  PI Curve, mostra a sensibilidade da busca para um ruído magnético acumulado, que está acima da região em Vermelho (não seria percebido pelo detector). Nossas estimativas mostram que o ruído magnético correlacionado está bem abaixo da sensibilidade alcançada durante a O3, tanto para bins individuais de frequência quanto quando o ruído é acumulado em múltiplas frequências.

## GLOSSÁRIO

**Radiação Cósmica de Fundo (RCF ou CMB):** Radiação eletromagnética proveniente de um estágio inicial do universo, também conhecida como “radiação relíquia”.

**Corrida observacional:** Período em que os interferômetros estão em plena atividade, detectando sinais de ondas gravitacionais.

**Intensidade do Fundo de OG:** A densidade de energia em ondas gravitacionais. Isso é expresso como a fração da energia total do Universo na forma de ondas gravitacionais.

**Glitch:** estouro de ruído em dados de ondas gravitacionais, análogo a um estouro de estática ouvido de um alto-falante, que às vezes pode ser confundido ou mascarar um sinal de onda gravitacional real.

**Domínio do Tempo:** Análise matemática ou física de um sinal em relação ao tempo.

**Correlação cruzada:** medida da similaridade entre dois ou mais conjunto de dados. Se os dados de dois interferômetros são correlacionados, isso pode indicar a presença de um sinal de fundo de OG.

**Nível de confiança:** intervalo dentro do qual um valor de parâmetro incerto tem uma probabilidade particular.

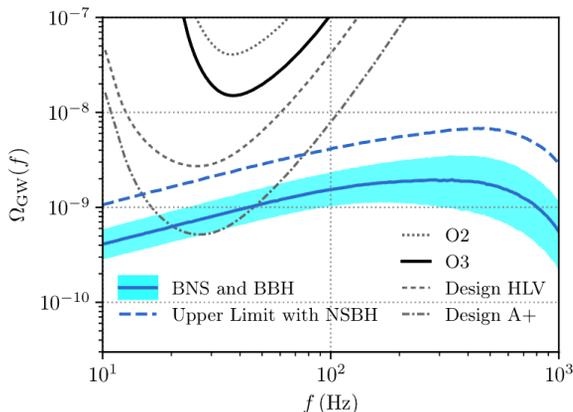
**Inferência bayesiana:** Método que nos permite combinar novos dados com algum conhecimento que já possuímos (comumente conhecido como informação prévia – a priori), expresso como probabilidade. A combinação é usada para atualizar nosso conhecimento atual e também é expressa como probabilidade (a probabilidade posterior).

**Ressonâncias de Schumann:** ondas de radio de frequência muito baixa geradas por raios que ficam retidos entre a superfície da Terra e a ionosfera ( aproximadamente a 60 km de altitude).

**Bins de frequência:** intervalos entre as amostras ao analisar funções matemáticas ou sinais físicos em relação à frequência, em vez de tempo..

**Polarização da Onda Gravitacional:** forma geométrica do alongamento e compressão do espaço-tempo causado por uma onda gravitacional em seu movimento. Um bom diagrama deles pode ser encontrado na Figura 5 [link](#).

**Curva de sensibilidade:** A sensibilidade de um detector GW 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 detector em cada frequência, dando sua curva de sensibilidade.



**Figura 3:** Este gráfico compara as sensibilidades das observações atuais e futuras com as previsões para o fundo de sistemas binários não resolvidos, ou seja, de fusões de estrela de nêutrons binários (BNS) e buracos negros binários (BBH). A linha azul é a estimativa mediana da intensidade do fundo de BNS e BBH, enquanto a faixa azul claro é a região de incerteza de 90%. Além disso, as sensibilidades correspondentes à segunda e terceira corridas observacionais (O2 e O3, respectivamente) são mostradas, bem como aquelas correspondentes ao que esperamos alcançar no projeto e a sensibilidade A+ (para a rede LIGO-Virgo, HLV). A linha azul tracejada representa o limite superior de 95% no fundo previsto ao incluir fusões estrela de nêutrons com buracos negros (NSBH).

Visite nossos sites:

[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/)

## SAIBA MAIS

Visite nossos sites: [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/)

Leia o artigo científico complete (em inglês) [aqui](#).

Você pode acessar [Uma Breve Introdução às Ondas Gravitacionais clicando aqui](#).

Descubra o que são as [polarizações proibidas](#).

Traduzido para o Português por [Juliédson Artur Malaquias Reis](#). Você pode ler o original (em inglês) [aqui](#).

