

PROCURANDO PULSARES DANÇANTES NO MEIO DA SINFONIA GRAVITACIONAL DO UNIVERSO

Nem todas as [ondas gravitacionais](#) são iguais. Algumas nascem de [colisões cósmicas](#), quando [buracos negros](#) ou [estrelas de nêutrons](#) (ENs) se chocam, enviando ondulações através do espaço-tempo. Outras, como as estudadas neste trabalho, são muito fracas, mas duram muito mais tempo. Essas são [ondas gravitacionais contínuas](#) (OGCs): o constante “batimento” cósmico de uma estrela de nêutrons imperfeita em rotação.

As estrelas de nêutrons são núcleos densos e compactos deixados para trás após a morte de [estrelas massivas](#), com cerca de 10 a 25 vezes a [massa do Sol](#), em [explosões de supernova](#). Apesar de terem apenas cerca de 20 quilômetros de diâmetro, podem conter mais massa do que o próprio sol. Algumas giram centenas de vezes por segundo e, se sua distribuição de matéria não for perfeitamente simétrica, essa pequena imperfeição pode fazê-las emitir OGCs. Quando uma estrela de nêutrons faz parte de um [sistema binário](#) (ver [Figura 1](#)), seu sinal torna-se mais complexo, mas também pode se tornar mais intenso. Isso ocorre porque a massa transferida de uma estrela companheira, por meio de processo de [acrecção](#), pode acelerar sua rotação, aumentando a probabilidade de emissão de ondas gravitacionais detectáveis.



Figura 1. Uma estrela de nêutrons (à direita) em um sistema binário com uma estrela companheira (à esquerda). Fonte: simulador [SpaceEngine](#).

As estrelas de nêutrons estão entre os objetos mais compactos do universo, e detectar OGCs provenientes delas nos proporcionaria informações valiosas sobre a física da matéria em condições extremas. Astrônomos estimam que possa haver cerca de cem milhões de estrelas de nêutrons em nossa galáxia, mas apenas algumas milhares foram identificadas até agora. Resolver essa discrepância é uma das principais motivações para pesquisas como a descrita neste estudo.

COMO PROCURAMOS ESSES SINAIS?

Quanto mais uma estrela de nêutrons se desvia de uma forma perfeitamente esférica, mais intensas podem ser as ondas gravitacionais contínuas (OGCs) que ela produz. Para encontrar esses sinais extremamente fracos, os cientistas analisam os dados dos detectores de ondas gravitacionais [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK), em busca de evidências de OGCs provenientes da população de estrelas de nêutrons da Via Láctea.

Este estudo concentrou-se em estrelas de nêutrons desconhecidas em sistemas binários, utilizando dados da primeira parte da quarta [corrida observacional](#), O4a (de Maio de 2023 a Janeiro 2024). Foi realizada uma busca em todo o céu, considerando todas as possíveis localizações das fontes, por sinais na faixa de frequência de 100 a 350 Hz, intervalo que corresponde às bandas mais sensíveis do período da O4a.

O sinal de OGC proveniente da estrela de nêutrons aparece como uma frequência única e estável no referencial da fonte. No entanto, nossos detectores estão em movimento, girando com a terra e orbitando o Sol, o que provoca uma [Modulação Doppler](#) no sinal. Para uma estrela de nêutrons em um sistema binário, sua própria órbita adiciona uma segunda camada de modulação Doppler. Esse “duplo efeito Doppler” faz com que a frequência do sinal seja modulada segundo um padrão característico

Para descrever o movimento de uma estrela de nêutrons em sua órbita, utilizamos três parâmetros: o semi-eixo maior projetado (o tamanho da órbita vista da terra), o período orbital (o tempo que leva para completar uma órbita) e a fase orbital (a posição na órbita de um dado instante). Nesta busca, consideramos semi-eixos maiores projetados entre 5 e 15 segundos-luz e períodos orbitais entre 7 e 15 dias, faixas em que muitas estrelas de nêutrons conhecidas se encontram.

Empregamos uma nova ferramenta de análise chamada **FastTracks**, uma pipeline acelerada por **GPU** projetada para agilizar as buscas por OGCs. O FastTracks verifica se as trajetórias nos dados tempo-frequência (ver [Figura 2](#)) são consistentes com o que se espera de um sinal de OGC.

SAIBA MAIS:

Visite
nossos
websites:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Nossa busca foi realizada no domínio tempo-frequência, utilizando **transformadas de Fourier de curto termo (SFTs)** com duração de 1024 segundos cada. A pesquisa consistiu em duas etapas: primeiro, aplicamos a **transformada de Hough** aos dados e procuramos por sinais persistentes no **espectrograma**. Na segunda etapa, para as trajetórias mais promissoras, realizamos um novo cálculo, desta vez utilizando as faixas de potência obtidas das SFTs.

SENSIBILIDADE DA BUSCA E IMPLICAÇÕES ASTROFÍSICAS

Não encontramos nenhuma evidência de sinais de ondas gravitacionais contínuas (OGCs) nesta busca. No entanto, esse resultado nulo ainda nos permite determinar quão sensível foi nossa pesquisa, ou seja, a que distância poderíamos ter detectado tais sinais caso estivessem presentes. Para isso, injetamos milhares de sinais simulados de OGCs nos dados e medimos com que frequência nossa análise conseguiu recuperá-los. A partir desses testes, determinamos a menor amplitude de sinal detectável, alcançando as melhores sensibilidades já obtidas para essa região do espaço de parâmetros.

Apresentamos a sensibilidade de nossa busca de duas maneiras: a **Figura 3** mostra a distância máxima em que nossa pesquisa poderia detectar uma estrela de nêutrons, para diferentes valores possíveis de sua **elipticidade** (uma medida de quanto a forma da estrela se desvia da simetria axial perfeita). Estrelas mais deformadas podem produzir sinais de OGC mais intensos, tornando-as detectáveis a distâncias maiores. A **Figura 4** apresenta os mesmos resultados sob outra perspectiva: a deformação máxima permitida de uma estrela de nêutrons que não tenha sido detectada em nossa busca, em função da frequência. Nossa pesquisa considerou fontes com taxas de **desaceleração angular** desprezíveis (o dobro da taxa de desaceleração angular da estrela emissora). Em ambas as figuras, as regiões sombreadas indicam casos excluídos pelo limite imposto pela desaceleração angular máxima.

Esses resultados estabelecem os limites mais rigorosos até agora sobre sinais de OGCs provenientes de estrelas de nêutrons desconhecidas em sistemas binários, dentro dos parâmetros orbitais estudados. Eles foram possíveis graças a dois fatores principais: a melhoria da sensibilidade dos detectores durante a campanha de observação O3a e o desempenho otimizado da nova pipeline FastTracks. Mesmo sem uma detecção, essas restrições são valiosas, pois reduzem o intervalo de propriedades possíveis da população de estrelas de nêutrons ainda não observadas em nossa galáxia.

GLOSSÁRIO

Acreção: Transferência de matéria entre dois corpos em órbita devido à ação da gravidade. A matéria que cai normalmente forma um **disco de acreção**, em razão da conservação do momento angular. Nesse caso, o gás espirala em direção ao centro, tornando-se mais quente à medida que o potencial gravitacional é convertido em energia térmica.

Sistema binário: Par de objetos astronômicos ligados entre si pela atração gravitacional. ([Wikipedia](#))

Ondas gravitacionais contínuas: Ondas gravitacionais que persistem por longos períodos em uma frequência aproximadamente constante. Tais ondas são geradas por fontes como estrelas de nêutrons em rápida rotação que apresentam, por exemplo, pequenos desvios da simetria axial perfeita. Essas ondas são extremamente fracas, mas duram muito mais do que o tempo típico de observação, permitindo analisar longos trechos de dados para extrair o sinal fraco do ruído. Isso difere de outros fenômenos de ondas gravitacionais, como as coalescências de binárias compactas, nas quais são emitidos sinais fortes, porém de curta duração. ([LIGO AEI](#))

Elipticidade: Medida de quão distante da forma esférica um corpo está, definida como a deformação relativa ao longo do plano equatorial em comparação com a deformação na direção perpendicular.

FastTracks: pipeline de análise projetada para avaliar estatísticas de detecção de sinais de ondas gravitacionais contínuas, utilizando computação em GPU aplicada a dados descritos por Transformada de Fourier de Curto Termo.

Unidade de Processamento Gráfico (GPU): Hardware especializado adequado ao processamento de dados por meio de paralelização massiva.

Transformada de Hough: Algoritmo utilizado para identificar formas bem definidas em imagens, como aquelas descritas por um espectrograma. ([Wikipedia](#))

Kiloparsec (kpc): Mil parsecs. Um **parsec** é uma unidade astronômica de comprimento equivalente a aproximadamente 3,26 anos-luz ou 30 trilhões de quilômetros.

Segundo-luz: Distância que a luz percorre em um segundo. ([Wikipedia](#))

Estrela massiva: Estrelas com massas superior a cerca de 8 vezes a **massa do Sol**. Somente estrelas tão massivas podem formar uma estrela de nêutrons após explodirem como supernovas. Se tiverem massas menores, o remanescente torna-se uma anã branca.

Estrela de nêutrons: Remanescente do processo de supernova sofrido por uma estrela com massa entre 8 e 25 vezes a massa solar. Estrelas de nêutrons típicas possuem massa entre 1 e 2 massas solares e raios de 10 a 15 quilômetros, sendo alguns dos objetos mais compactos já descobertos.

Campanha de observação: Período durante o qual nossos interferômetros estão coletando dados para análise astrofísica.

Espectrograma: Representação visual da composição em frequência de uma série temporal. ([Wikipedia](#))

Taxa de Desaceleração Angular: Taxa na qual uma estrela de nêutrons em rotação desacelera, devido à emissão de energia por ondas eletromagnéticas ou gravitacionais.

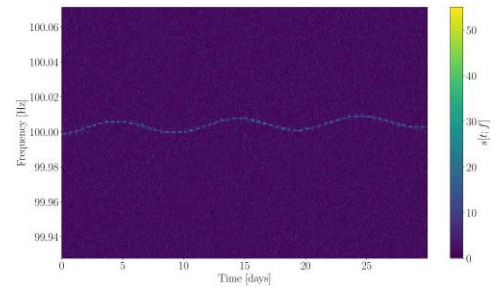


Figura 2: Um sinal simulado de OGC em um espectrograma (gráfico que mostra a frequência do sinal em função do tempo). Este exemplo apresenta uma estrela de nêutrons girando 50 vezes por segundo, orbitando uma estrela companheira a cada 10 dias. As modulações são causadas pela variação diária na sensibilidade dos detectores em relação àquela região do céu.

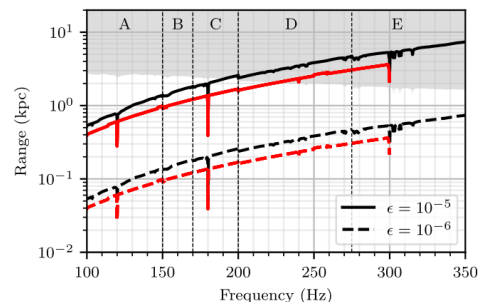
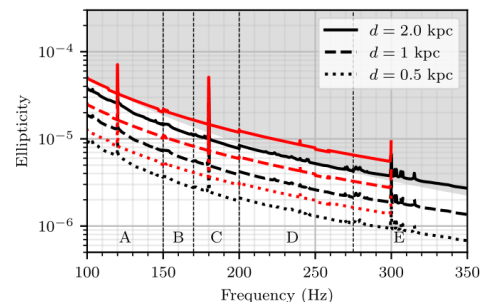


Figura 3: Alcance astronômico máximo em **kiloparsecs (kpc)**, limitado pela busca em função da frequência. As duas curvas pretas representam diferentes valores de **Elipticidade** da estrela de nêutrons. Quanto maior a elipticidade, mais intensas seriam as OGCs geradas. A região sombreada em cinza indica as distâncias excluídas pelo limite imposto pela desaceleração angular máxima utilizada na análise. A figura mostra uma comparação entre os resultados da busca anterior (O3a BinarySkyHough, em vermelho) e os resultados desta nova pesquisa (em preto).



estrela de nêutrons (EN) fora do alcance de nossa busca, em função da frequência. As curvas representam, para diferentes frequências, o grau de deformação que uma EN precisaria ter para produzir uma OGC detectável em nossa pesquisa. A região sombreada em cinza indica os valores excluídos por serem maiores que a desaceleração angular máxima utilizada em nossa busca. A figura mostra uma comparação entre os resultados da busca anterior (O3a BinarySkyHough, em vermelho) e os resultados desta nova pesquisa (em preto).

SAIBA MAIS:

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

Leia uma pré-publicação do artigo científico completo [aqui](#) ou em [arXiv](#).

Leia uma introdução a ondas gravitacionais contínuas [aqui](#).

Traduzido para o Português por: Cássius de Melo e Christian Bruziguês do grupo VirgoBR.