

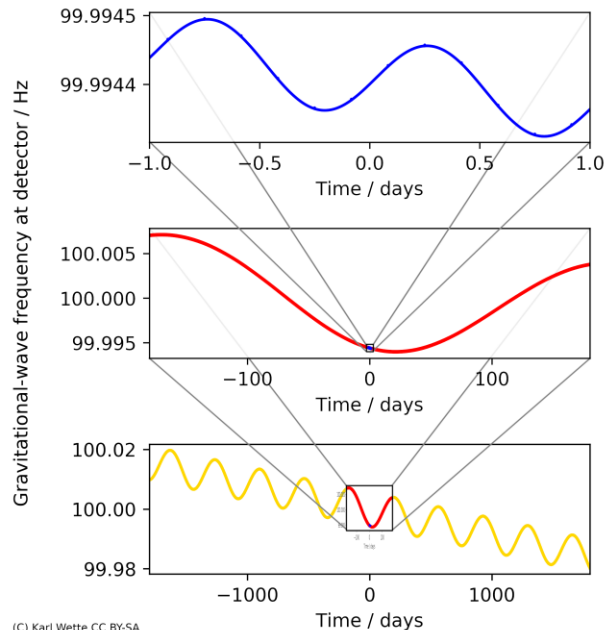
MONTANHAS ESTELARES: BUSCANDO EM TODA PARTE POR ESTRELAS DE NÊUTRONS SEM SIMETRIA AXIAL

Os cientistas do LIGO e do Virgo têm travado uma batalha de décadas para detectar deformações nas Estrelas de Nêutrons. [Estrelas de Nêutron](#) são estrelas muito compactas criadas no colapso de estrelas muito maiores que o sol, quando os elétrons e os prótons dos átomos se combinam para formar uma bola de nêutrons com um raio não muito maior que 10 km. Se fossem mais compactas, as estrelas de nêutrons formariam buracos negros. Algumas estrelas de nêutrons são pulsares de alta rotação que, como os faróis, emitem feixes de radiação eletromagnética com períodos extremamente regulares quando observados de um ponto de vista fixo. Suas frequências de spin podem ser tão estáveis que rivalizam com o desempenho dos relógios atômicos na Terra.

Uma deformação assimétrica em uma estela de nêutrons pode gerar [ondas gravitacionais contínuas](#) (OGC). Imagine, por exemplo, uma “**montanha**” elevado com uma altura de um milímetro em um lado da estrela. À medida que a estrela de nêutrons gira, essa pequena montanha também gira - dezenas a centenas de vezes por segundo nas estrelas que são potencialmente detectáveis - e perturba o espaço-tempo vizinho, produzindo radiação gravitacional. A frequência da OGC é o dobro da frequência rotacional e praticamente constante, com uma ligeira diminuição na frequência com o tempo, pois a perda de energia rotacional da estrela por OGC leva ao *spin-down*. Além disso, o giro suave da estrela leva à emissão de ondas gravitacionais que são *contínuas* no tempo.

Há anos procuramos essas ondas gravitacionais contínuas, na esperança de que cada nova melhoria nos detectores de ondas gravitacionais do mundo desse um vislumbre das ondas incrivelmente minúsculas que podem ser emitidas por uma estrela de nêutrons deformada. Como referência, a [amplitude de deformação](#) para a primeira detecção foi de 10^{-21} . Esse sinal veio de um par de buracos negros massivos a 1,3 bilhão de anos-luz de distância e foi detectável por apenas dois décimos de segundo. As ondas gravitacionais contínuas seriam ainda mais fracas, em várias ordens de magnitude, apesar de virem de estrelas a apenas centenas a milhares de anos-luz de distância, porque a energia irradiada é muito menor.

Usando os primeiros seis meses de dados do mais recente corrida observacional do LIGO e do Virgo (O3), agora investigamos em nossa galáxia para procurar estrelas de nêutrons previamente desconhecidas com deformações detectáveis. A nova busca procura por estrelas isoladas em todo o céu e é capaz de detectar amplitudes de deformações abaixo de 10^{-25} , a busca mais precisa do tipo até hoje, com sensibilidade para deformações minúsculas.



(C) Karl Wette CC BY-SA

Figura 1: Evolução da frequência de longo prazo de um sinal de onda gravitacional contínua. Em pouco tempo, o sinal de uma estrela de nêutrons galáctica parecerá quase perfeitamente constante em frequência e amplitude. No entanto, em períodos mais longos, a frequência do sinal mudará lentamente. A primeira razão é que, como a estrela de nêutrons emite ondas gravitacionais e eletromagnéticas, ela perde energia que a faz girar mais lentamente. A segunda razão é que o detector aqui na Terra está se movendo em relação à estrela de nêutrons, o que muda a frequência das ondas gravitacionais observadas no detector. (Crédito: K. Wette)

Mas o quão pequeno é isso? Uma deformação da estrela de nêutrons pode ser caracterizada pela sua [excentricidade equatorial](#) (ou elipticidade). Este número descreve o quanto a estrela é deformada a partir de uma forma simétrica em relação ao eixo de rotação. Agora, espera-se que uma estrela de nêutrons de rotação rápida se desvie de uma esfera perfeita. Um círculo ao redor de seu equador deve ser um pouco mais longo do que aquele que passa por seu polo, por causa dos mesmos efeitos centrífugos que achatam ligeiramente a Terra. A [elipticidade polar](#) resultante, entretanto, não gera ondas gravitacionais porque, conforme a estrela gira, não há mudança em seus efeitos gravitacionais no espaço próximo. Não há "redemoinho" no espaço como o causado por uma montanha girando. Não sabemos exatamente o que esperar das elipticidades *equatoriais* típicas de estrelas de nêutrons. A teoria nuclear convencional *permite* um valor em torno de 10^{-5} , o que corresponde a uma montanha de 10 cm, mas mesmo deformações maiores presentes no nascimento da estrela de nêutrons depois da supernova acabam sendo atenuadas com o tempo. Na prática, esperamos que estrelas de nêutrons típicas tenham elipticidades muito menores, mas não temos certeza de quanto.

Pode-se esperar que seja fácil detectar um sinal de onda contínua de frequência única. A [transformada rápida de Fourier](#), amplamente usada no processamento de sinais, pode ser aplicada aos dados de deformação da onda gravitacional para revelar um "pico" na frequência certa. Mas uma série de complicações torna-o muito mais desafiador do que isso. Em primeiro lugar, como a rotação da estrela está diminuindo gradativamente, deve-se continuar fazendo correções para a diminuição da frequência e, como não se sabe *a priori* quão gradual é o declínio, deve-se buscar muitas possibilidades. Na pesquisa *all-sky* (para todas as direções do céu) mais recente, dezenas de possíveis valores de [spin-down](#) são testados, o que aumenta o custo computacional da pesquisa.

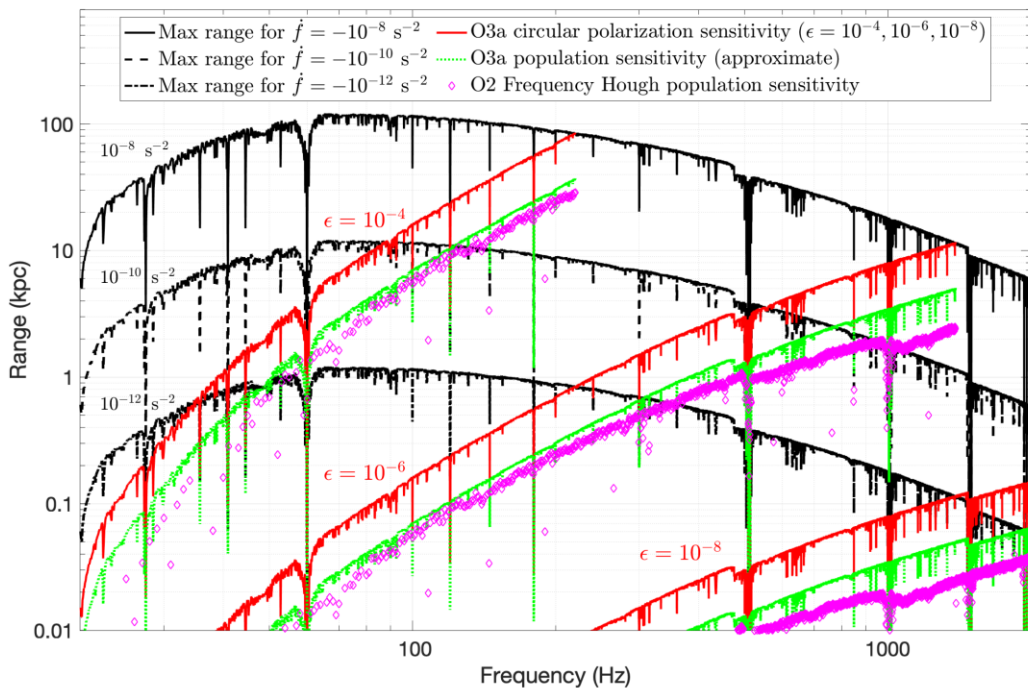


Figura 2: Intervalos (em kpc) da busca por estrelas de nêutrons com spin-down devido à radiação gravitacional; a frequência da radiação gravitacional (em Hz) é mostrada no eixo horizontal. As três curvas pretas (sólidas, tracejadas, tracejadas) que atingem o pico abaixo de 100 Hz representam os intervalos máximos possíveis sob a suposição de que a taxa máxima f na qual a estrela de nêutrons desacelera (ou seja, a magnitude máxima de spin-down) é (10^{-8} , 10^{-10} , 10^{-12}) por Segundo quadrado para as três curvas, respectivamente. Os três conjuntos de três curvas coloridas (vermelho, pontilhado verde, losangos magenta) que geralmente aumentam com a frequência são os intervalos para os quais os limites superiores se aplicam a três diferentes elipticidades equatoriais assumidas de $\epsilon = 10^{-4}$, 10^{-6} e 10^{-8} . As curvas pontilhadas correspondem aos melhores (vermelho) e típicos (verde) resultados obtidos com os dados O3, enquanto as curvas do diamante magenta mostram os resultados típicos obtidos por uma pesquisa anterior, que usou dados da segunda corrida observacional (O2). A diferença nas curvas mostra a sensibilidade aprimorada da pesquisa atual, que poderia observar estrelas de nêutrons com uma dada elipticidade em intervalos maiores, ou seja, mais distantes.

O que torna o custo computacional muito maior, porém, é o efeito do movimento da Terra, tanto de sua rotação diária quanto de seu movimento orbital ao redor do sol. Deve-se corrigir explicitamente o [efeito Doppler](#) da frequência aparente do sinal da onda gravitacional devido ao movimento da Terra em relação à estrela que emite o sinal (análogo ao efeito Doppler dos sons de sirene de um carro de bombeiros em movimento). A **Figura 1** exemplifica esses efeitos sobre a frequência. Infelizmente, as correções explícitas para as modulações na frequência devido à rotação e órbita da Terra são diferentes para cada ponto no céu, o que significa que é necessário continuar fazendo ajustes na busca a cada “passo” que se dá no céu. Uma outra complicação é que a variação aparente da amplitude do sinal com o tempo depende da orientação relativa do eixo de rotação da estrela em relação à nossa linha de visão. A variação também depende das orientações dos detectores de ondas gravitacionais na superfície da Terra (latitude, longitude e direções da bússola dos braços do interferômetro) - e não sabemos a orientação da estrela!

Ao se levar todas essas correções em consideração, o custo computacional aumenta enormemente em relação a uma simples transformada de Fourier. Na pesquisa recente, mais de 15 milhões de horas de CPU foram consumidas ao longo de quase um ano usando computadores hospedados pelo Laboratório LIGO e usando outros computadores disponíveis globalmente no [Open Science Grid](#).

Depois de pesquisar os primeiros seis meses dos dados do O3 e identificar mais de 140.000 candidatos potenciais em frequência, *spin-down* e localização no céu, seguimos esses *outliers* com uma pesquisa ainda mais profunda em vários estágios, incluindo uma fase final com todos os 11 meses de dados para um pequeno número de candidatos. No final, concluiu-se que não foram observados sinais de onda gravitacional contínuas e, portanto, podemos fornecer apenas [os limites superiores](#) da intensidade do sinal.

Uma maneira de caracterizar a sensibilidade da pesquisa é por meio do intervalo em [kiloparsecs](#) (kpc) no qual é possível detectar um sinal de OGC de uma estrela de nêutrons com dada deformação. A **Figura 2** mostra a faixa de sensibilidade usando os dados iniciais de O3, com relação à frequência das ondas gravitacionais. Estrelas com deformações maiores emitem ondas gravitacionais mais fortes e, portanto, podem ser vistas mais longe.

A sensibilidade da última busca pelas OGC foi bastante melhorada em relação às anteriores especialmente em frequências mais altas. A melhoria vem em grande parte da implementação do [“quantum squeezing”](#) nos interferômetros LIGO, uma técnica inteligente para ganhar mais sensibilidade para uma mesma intensidade do laser. Outras buscas serão realizadas nos dados completos da O3 usando métodos de pesquisa complementares, para cavar ainda mais fundo no ruído. Ganhos adicionais em sensibilidade são esperados das futuras corridas observacionais, O4 e O5, seguindo melhorias adicionais do detector. Esperamos que as pesquisas futuras consigam chegar cada vez mais longe em nossa galáxia para qualquer deformação dada, aumentando sempre mais as chances de descoberta do sinal contínuo de ondas gravitacionais.

SAIBA MAIS:

Leia o artigo original completo [aqui](#) e uma **Introdução às Ondas Gravitacionais** [clcando aqui](#).

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

Visite nossos sites:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



GLOSSÁRIO

Estrela de Nêutrons: Remanescente do processo de supernova sofrido por uma estrela com massa entre 8 e 25 vezes a massa do nosso Sol. As estrelas de nêutrons típicas têm uma massa de cerca de 1-2 massas solares e um raio de 10-15 quilômetros, sendo alguns dos objetos mais compactos já descobertos.

Amplitude de Deformação: mudança relativa na distância pela passagem de uma O.G.

Ondas Gravitacionais Contínuas: Este é um sinal de onda gravitacional que está sempre presente e em uma frequência quase fixa, ao contrário de sistemas de buracos negros em fusão para os quais o sinal de onda gravitacional só é visível em um detector por um curto período de tempo e tem um aumento rápido em frequência.

Elípticidade Equatorial: Medida de quão deformado em relação a uma esfera é algum objeto determinado, como as estrelas de nêutrons achatadas.

Elípticidade Polar: Semelhante à definição anterior, mas mede a deformação entre os pólos e o equador do objeto.

Spin-down: Taxa na qual uma estrela de nêutrons diminui a sua rotação devido à emissão de ondas eletromagnéticas, gravitacionais ou frenagem magnética.

Efeito Doppler: Efeito que causa uma mudança na frequência das ondas emitidas por uma fonte em movimento relativo com o observador.

Kiloparsec (kpc): Mil parsecs. Um **parsec** é uma medida de distância (astronômica) que vale aproximadamente 3 anos-luz ou 30 trilhões de quilômetros.

Limite Superior: uma declaração sobre o valor máximo que alguma quantidade pode ter enquanto ainda é consistente com os dados. Aqui, usamos o conceito para colocar restrições nas amplitudes de deformação em diferentes frequências. Usamos um limite de grau de crença de 95%, ou seja, dados os dados, há uma probabilidade de 95% de que a quantidade esteja abaixo desse limite.