

A BUSCA POR SINAIS DE ONDAS GRAVITACIONAIS CONTÍNUAS DE REMANESCENTES DE SUPERNOVAS NOS DADOS DA O3

Uma [supernova de colapso de núcleo](#) é a morte explosiva e violenta de uma [estrela massiva](#). O remanescente da explosão pode ser uma [estrela de nêutrons](#) cercada pelos detritos da explosão (Fig. 1). Os detritos da explosão podem se estender por [anos-luz](#), mas a estrela de nêutrons no centro tem aproximadamente 30 km de diâmetro e uma massa de cerca de 1,4 vezes a massa do Sol. As estrelas de nêutrons são alguns dos objetos mais densos do universo. A composição e a física subjacente às estrelas de nêutrons continuam sendo um dos mistérios mais tentadores da física, inspirando interesse em muitos campos, abrangendo a astrofísica, a física nuclear, a física de partículas e a física da matéria condensada. Para o [LIGO](#) e [Virgo](#), estrelas de nêutrons, são importantes porque são fontes prováveis de [ondas gravitacionais contínuas](#) (OGC). Em um artigo recente, buscamos ondas gravitacionais contínuas de quinze jovens remanescentes de supernovas em nossa galáxia usando seis meses de dados de 2019, que constituem a primeira metade da terceira corrida observacional dos detectores, chamada de O3a.

Embora as explosões (*bursts*) [transitórias](#) (ditas **transientes**) de ondas gravitacionais sejam agora regularmente observadas, as ondas gravitacionais contínuas continuam evitando a sua detecção. Isso ocorre porque os *bursts* transientes são intensos e curtos, enquanto as ondas gravitacionais contínuas são muito silenciosas e difíceis de diferenciar do ruído. Para detectar uma OGC, temos que ser pacientes, coletando dados por um longo período de tempo e procurando flutuações minúsculas, mas persistentes, que correspondam ao nosso modelo de sinal. Para uma busca típica por OGC, estamos procurando por ondas geradas por uma estrela de nêutrons em rápida rotação. Qualquer desvio de uma estrela perfeitamente uniforme produzirá ondas gravitacionais com o dobro da frequência de rotação da estrela, sendo que os maiores desvios produzem maiores [deformações de onda gravitacional](#) (ou seja, um sinal mais intenso). Chamamos essa estrela de “triaxial” porque é uma elipse tridimensional, semelhante a uma bola de rugby.

Existem muitos remanescentes de supernovas em nossa galáxia. Escolhemos quinze jovens remanescentes entre 100 e 10.000 anos, mas cuja frequência de rotação é desconhecida. Visamos os remanescentes de supernovas jovens porque estrelas de nêutrons jovens são mais propensas a ter deformações não uniformes do que estrelas mais velhas e elas também giram mais rápido, produzindo uma deformação de onda gravitacional maior. Mas, como não sabemos a velocidade com que a estrela de nêutrons está girando, temos que pesquisar uma ampla gama de frequências. Estrelas de nêutrons jovens também perdem energia rotacional e diminuem a velocidade com o tempo (*spin down*), portanto, também precisamos pesquisar possíveis taxas de *spin-down*. Por último, as observações de estrelas de nêutrons isoladas com medições de frequência sugerem que podem haver pequenas flutuações aleatórias na frequência de rotação.

Em uma pesquisa normal (chamada de pesquisa coerente, ou *coherent search*), construímos modelos de como o sinal deve se parecer ao longo do tempo de observação e tentamos combinar esses sinais com os dados. Se testarmos o modelo de sinal correto e se o número de modelos não for muito alto, uma pesquisa dessa será muito sensível. Porém, o que temos são quinze alvos sem uma estimativa de frequência que podem mudar a frequência de rotação ou sofrer pequenas mudanças aleatórias de frequência. Nesse cenário, uma pesquisa coerente é muito intensa em termos computacionais. Sendo assim, usamos três métodos semi-coerentes para pesquisar os primeiros dados O3 de forma eficiente. Uma pesquisa semi-coerente aplica uma pesquisa coerente a pequenos blocos de dados e os reúne para cobrir todo o tempo de observação.

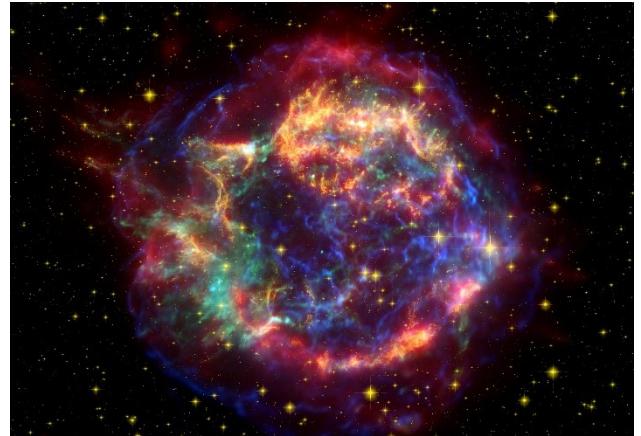


Figura 1: Cassiopeia A, uma das remanescentes jovens de [supernova](#) que foram alvo dessa publicação. Créditos: NASA/JPL-Caltech/Krause et al.

FIGURAS DA PUBLICAÇÃO

Para maiores informações sobre as figuras e como elas foram feitas, você pode ler o artigo em [preprint](#).

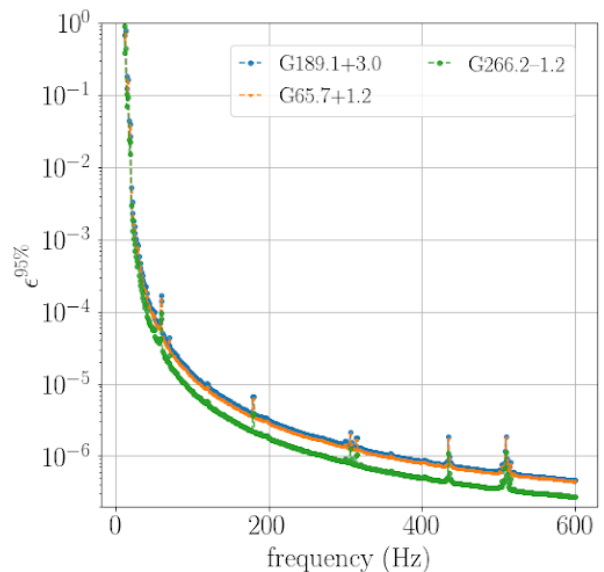


Figura 2: Os [limites superiores de 95% na elipticidade da](#) estrela de nêutrons e para algumas das análises do artigo. O eixo horizontal é a frequência na qual detectaríamos um sinal de onda gravitacional; o eixo vertical é o limite superior de 95% na elipticidade. A curva verde (G266.2-1.2), a azul (G189.1 + 3.0) e a laranja (G65.7 + 1.2) mostram a elipticidade mínima que poderíamos detectar. Este é um limite superior de quão elíptica a estrela de nêutrons poderia ser (porque se fosse mais elíptica do que isso, nós o teríamos detectado!).

Visite nossos sites:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Blocos pequenos de dados necessitam de menos modelos (*templates*) para a busca de sinal, então uma busca semi-coerente é muito mais eficiente em termos computacionais. Nós aplicamos três algoritmos semi-coerente para os primeiros dados da O3: um otimizado para a sensibilidade, outro para variações rápidas de sinal e outro para um modelo astrofísico em particular. Nenhum dos três encontrou nenhum sinal de OGC.

Nenhuma detecção, no entanto, não significa que não há resultados! Nós pudemos estimar a [sensibilidade](#) da nossa busca a então inferir as propriedades das estrelas que procuramos. Uma estrela de nêutrons de rápida rotação emite OGC, e quanto mais deformada uma estrela, mais intenso deve ser o sinal. Colocando um limite na intensidade do sinal, podemos colocar um limite superior em quão deformada a estrela de nêutrons alvo poderia ser. A assimetria de uma estrela de nêutrons é medida no parâmetro ϵ , que representa a [elipticidade](#). Diferentes modelos de estrelas de nêutrons predizem diferentes limites máximos para a elipticidade, mas a maioria prevê $\epsilon < 10^{-6}$. Mostramos, na figura 2, os limites da elipticidade para três alvos. O eixo vertical mostra o [limite superior](#) de 95% sobre ϵ obtido nessa busca. O eixo horizontal mostra a frequência da onda gravitacional que afeta a elipticidade de dois modos. Primeiro, a deformação da onda gravitacional para dada frequência é mais intensa para uma estrela de maior elipticidade. Em segundo lugar, tanto a sensibilidade do LIGO quanto do Virgo dependem da frequência que se observa, então nossos limites encontrados para a deformação das ondas gravitacionais varia em toda faixa de frequência. Conseguimos restringir a elipticidade abaixo do valor teórico máximo ($\epsilon < 10^{-6}$). A medida que melhorarmos esse limite, seremos capazes de descartar modelos físicos que tentam prever as propriedades da estrela de nêutrons.

Estrelas de nêutrons triaxiais não são a única maneira pela qual uma estrela de nêutrons poderia gerar OGC. A rotação das estrelas também podem gerar OGC por meio de oscilações dos [modos-r](#) no interior da

estrela de nêutrons, com a escala dessas oscilações parametrizada pela amplitude α . O limite superior teórico para a escala de oscilações é $\alpha < 10^{-3}$. Um limite na deformação de uma estrela de nêutrons elíptica pode ser convertido em um limite em α , como fazemos na Figura 3. O eixo vertical mostra nosso limite de confiança de 95% em α e o eixo horizontal mostra a frequência da onda gravitacional (em Hz). Nós encontramos $\alpha < 10^{-3}$ acima de 150Hz para três alvos, restringindo o quão grande podem ser as amplitudes do modo-r nessas estrelas.

Conforme a coleta de dados continuar e nossos métodos melhorarem, a probabilidade de fazer uma primeira detecção aumenta. Até então, restringimos os modelos físicos com base na não-detecção e almejamos aumentar a sensibilidade de nossas pesquisas.

SAIBA MAIS

Você pode descobrir mais sobre Ondas Gravitacionais com [esse livro](#).

Leia o artigo completo desse resumo [aqui](#).

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

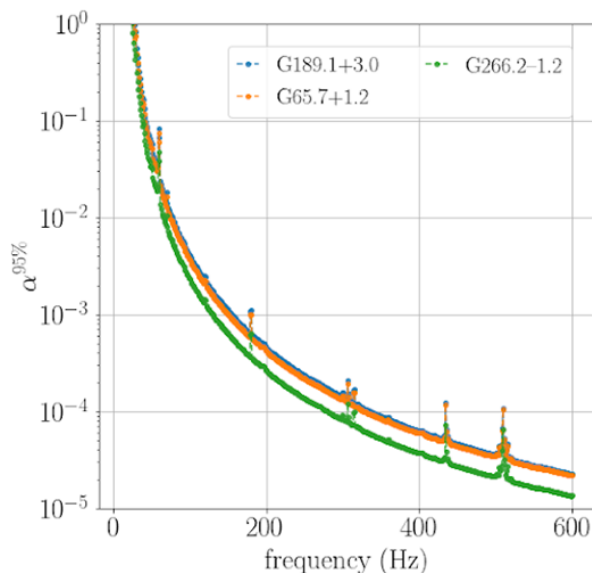


Figura 3: Os 95% para limites superiores na amplitude de oscilação α dos [modos-r](#) para algumas das análises e alvos do artigo. O eixo horizontal mostra a frequência na qual detectaríamos um sinal de onda gravitacional; o eixo vertical dá o limite superior de 95% da amplitude. As curvas verde (G266.2-1.2), azul (G189.1 + 3.0) e laranja (G65.7 + 1.2) mostram a amplitude mínima possível que poderíamos detectar. Este é um limite superior de quão fortes poderiam ser os modos-r na estrela de nêutrons (porque se eles fossem mais fortes do que isso, nós os teríamos observado!).

GLOSSÁRIO

Ondas Gravitacionais Contínuas (OGC): forma de radiação gravitacional de longa duração. Clique [aqui](#) para mais detalhes.

Elipticidade: Medida de quão longe está o formato de um corpo de uma esfera, definida como a deformação relativa ao longo do plano equatorial em relação à deformação ao longo da direção perpendicular.

Ano-luz: uma unidade de distância equivalente à distância que a luz viaja em um ano. Um ano-luz é aproximadamente igual a 9,46 trilhões de quilômetros.

LIGO: O Observatório Interferométrico Laser de Ondas Gravitacionais (LIGO) é um par de detectores de ondas gravitacionais com base nos Estados Unidos. Ambos os detectores são interferômetros a laser com dois braços perpendiculares de 4 km de comprimento, que tentam medir quaisquer mudanças no comprimento relativo do braço causado por uma onda gravitacional que passa.

Estrela massiva: estrelas massivas têm massas mais de 8 vezes a massa do Sol. Apenas estrelas com essa massa podem formar uma estrela de nêutrons depois de explodir como uma supernova. Se eles têm massas menores, o remanescente se torna uma estrela anã branca.

Estrela de nêutrons: Objeto extremamente denso que permanece após o colapso de uma estrela massiva. Uma estrela de nêutrons típica tem uma massa meio milhão de vezes a da Terra, mas apenas cerca de 30 km de diâmetro.

Modos-r: são ondas formadas no líquido que constitui as estrelas de nêutrons. Elas têm uma frequência que é comparável com a frequência de rotação da estrela,

logo, para estrelas de nêutrons jovens, essa frequência pode ser detectável pelo LIGO ou Virgo.

Sensibilidade: uma descrição da capacidade de um detector de observar um sinal. Os detectores com menor ruído são capazes de detectar sinais mais fracos e, portanto, são considerados como tendo maior (ou melhor) sensibilidade.

Deformação (strain): mudança fracionária na separação de dois pontos devido à deformação do espaço-tempo causada pela passagem de uma onda gravitacional. A deformação típica até mesmo das ondas gravitacionais mais fortes que atingem a Terra é muito pequena - normalmente menos de 10^{-21} .

Supernova: Uma explosão violenta, muitas vezes detectada como um objeto brilhante que aparece no céu, e então desaparece. Uma supernova pode ofuscar o resto de sua galáxia. Existem várias supernovas diferentes. Algumas vêm do colapso de estrelas massivas, outras da interação de anãs brancas e sua companheira.

Ondas gravitacionais transitientes: ondas resultantes de um evento curto e frequentemente cataclísmico, por exemplo, fusões compactas binárias. A maioria dos sinais desse tipo aparecem no detector apenas por segundos ou menos.

Limite superior: O limite superior de alguma quantidade (por exemplo, a deformação da onda gravitacional) é o menor valor que detectaríamos com 95% de confiança. Portanto, se não detectamos nada, temos 95% de certeza de que nenhuma fonte dos dados produz valores mais elevados.

Virgo: detector interferométrico de ondas gravitacionais localizado na Itália.