

BUSCA DE ONDAS GRAVITACIONAIS CONTÍNUAS PROVENIENTES DE REMANESCENTES DE SUPERNOVAS NOS PRIMEIROS DADOS DE O4A

As [estrelas de nêutrons](#) estão entre os objetos mais exóticos do Universo. Surgem quando estrelas massivas morrem em explosões energéticas a que chamamos [supernovas de colapso do núcleo](#). Estas explosões destroem a estrela e deixam para trás uma bela nebulosa difusa chamada remanescente de supernova (ver [Figura 1](#)). Quando jovem, a estrela de nêutrons situa-se perto do centro do remanescente de [supernova](#) e afasta-se gradualmente à medida que o remanescente se expande para o meio interestelar.

As estrelas de nêutrons são objetos extremamente densos, com uma massa superior à [massa do Sol](#) concentrada num espaço do tamanho de uma cidade. A sua composição e a física subjacente continuam a ser algumas das questões em aberto mais intrigantes da ciência, suscitando o interesse da astrofísica, da física nuclear e de partículas e da [física da matéria condensada](#). São também os ímãs mais potentes do Universo. Podem rodar a uma velocidade surpreendente, com algumas a rodar centenas de vezes por segundo. São tradicionalmente descobertas como “[pulsares](#)”, uma vez que emitem pulsos de luz que atravessam a linha de visão em direção à Terra uma ou

duas vezes por cada volta que fazem em torno do seu eixo de rotação. Mas nem todas as estrelas de nêutrons são detetadas como pulsares, e os seus interiores estão, na sua maioria, fora do alcance até dos telescópios [eletromagnéticos](#) mais sensíveis na Terra e no espaço. As [ondas gravitacionais contínuas](#) (OCs) proporcionam uma nova ferramenta para descobrir pulsares anteriormente não detetados e investigar os seus interiores exóticos.

As OCs são ondulações constantes e duradouras no espaço-tempo que uma estrela de nêutrons pode emitir enquanto gira. Estes sinais provêm de pequenas distorções ou “protuberâncias” numa estrela de nêutrons não totalmente simétrica e em rotação, com desvios maiores da simetria a produzirem uma [deformação](#) por ondas gravitacionais maior (ou seja, um sinal mais forte). Chamamos a essa estrela de “triaxial” porque se trata de uma elipse tridimensional, semelhante a uma bola de rugby ligeiramente deformada, como uma que já tenha sido usada em alguns jogos. Prevê-se que as ondas gravitacionais sejam emitidas ao dobro da frequência de rotação da estrela; a sua deteção ajudaria, portanto, a revelar pulsares ainda por descobrir.

Para os detetores Advanced [LIGO](#), [Virgo](#) e [KAGRA](#), as estrelas de nêutrons alojadas em remanescentes jovens de supernovas constituem alvos fundamentais para a deteção de ondas contínuas. Num artigo recente, procuramos OCs em quinze remanescentes de supernovas, com idades desde jovens até meia-idade (14 dos quais se encontram na nossa galáxia e um na nossa galáxia vizinha, a Grande Nuvem de Magalhães), utilizando oito meses de dados, de maio de 2023 a janeiro de 2024, que constituem a primeira parte do quarto período de observação dos detetores LIGO-Virgo-Kagra, designada por O4a.

Embora os estouros [transitórios](#) de ondas gravitacionais sejam agora observados regularmente, as ondas contínuas são muito mais difíceis de detetar, uma vez que se prevê que estes sinais sejam muito mais fracos do que as explosões que observamos nas fusões de estrelas de nêutrons ou de buracos negros, muitas vezes mais fracos em várias ordens de magnitude. Até ao momento, ainda não as detetámos. Se as detetássemos, seria um grande avanço, pois ajudariam a compreender como se formam as estrelas de nêutrons e como é a matéria sob as densidades e os campos magnéticos mais extremos encontrados no Universo. Permitiriam também descobrir pulsares anteriormente ignorados. Para detetar as OCs, temos de ser pacientes, no entanto, recolhendo dados durante um longo período de tempo e procurando flutuações minúsculas, mas persistentes, que correspondam ao nosso modelo de sinal. Temos também de escolher os melhores alvos.

Existem muitos remanescentes de supernovas na nossa galáxia. Seleccionámos quinze remanescentes de supernovas jovens, com idades compreendidas entre aproximadamente 40 anos ([SN 1987A](#)) e dezenas de milhares de anos, e que potencialmente albergam estrelas de nêutrons jovens cuja frequência de rotação ainda é desconhecida. A sua idade relativamente jovem implica que os candidatos a estrelas de nêutrons têm mais probabilidades de apresentar deformações não uniformes do que os mais antigos. Isto deve-se ao facto de ainda não terem tido tempo suficiente para se estabilizarem e para que essas deformações se suavizem. As estrelas de nêutrons jovens também rodam mais rapidamente, produzindo uma maior deformação gravitacional. Mas, como não sabemos a que velocidade a estrela está a rodar, temos de procurar numa ampla gama de frequências de ondas gravitacionais possíveis, determinadas principalmente pela idade específica do objeto e pela gama de sensibilidade dos nossos detetores. As estrelas de nêutrons jovens também perdem energia rotacional e abrandam com o tempo (desaceleração), pelo que também precisamos de procurar numa gama de taxas de desaceleração possíveis. Por último, observações de estrelas de nêutrons isoladas, onde foram feitas medições da frequência de rotação, sugerem que pode haver pequenas flutuações aleatórias na frequência de rotação.



Figura 1. Esquerda: O remanescente mais recente da nossa lista de alvos, o SN 1987A, localizado na Grande Nuvem de Magalhães, a cerca de 50 kpc de distância, tal como observado pela NIRCam do Telescópio Espacial JWST. O JWST revelou cada vez mais indícios da presença de uma estrela de nêutrons perto do centro, que aquece o material no interior do remanescente. Crédito da imagem: NASA, ESA, CSA, Mikako Matsuura (Universidade de Cardiff), Richard Arendt (NASA-GSFC, UMBC), Claes Fransson (Universidade de Estocolmo), Josefin Larsson (KTH); Processamento da imagem: Alyssa Pagan (STScI). **Direita:** O remanescente de supernova Cassiopeia A, um dos remanescentes de supernova por colapso do núcleo mais jovens e brilhantes conhecidos na nossa Galáxia, tal como visto pelo Observatório de Raios X Chandra. O ponto branco central é uma fonte pontual de raios X que se acredita ser a estrela de nêutrons deixada para trás pela explosão da supernova e conhecida como «Objeto Compacto Central». Crédito da imagem: Raios X: NASA/CXC/Meiji Univ./T. Sato et al.; Processamento de imagem: NASA/CXC/SAO/N. Wolk.

PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Numa pesquisa normal (denominada pesquisa “coerente”), construímos modelos de como o sinal se deve apresentar ao longo do tempo de observação e tentamos fazer corresponder esses sinais aos dados. Se testarmos o modelo de sinal correto e se o número de modelos não for demasiado elevado, então uma pesquisa coerente é muito sensível. No entanto, temos quinze alvos sem uma estimativa de frequência que também podem alterar a sua frequência de rotação ou sofrer pequenas variações aleatórias de frequência. Neste cenário, uma pesquisa coerente é demasiado intensiva em termos computacionais. Em vez disso, utilizamos quatro métodos “semi-coerentes” para varrer os dados de O4a de forma eficiente. Uma pesquisa semi-coerente aplica uma pesquisa coerente a pequenos blocos de dados e junta-os para cobrir todo o tempo de observação. Blocos de dados mais pequenos requerem menos modelos para a pesquisa, pelo que uma pesquisa semi-coerente é muito mais eficiente em termos computacionais. Além disso, utilizamos uma quinta pipeline de “[correlação cruzada](#)” que combina e compara dados cruzados dos detetores LIGO em Hanford e Livingston na faixa de 20-1726 Hz. Esta pipeline utiliza uma abordagem não modelada, ou seja, não pressupõe um padrão específico antecipadamente, e foi aplicada a dados de quatro famosos remanescentes de supernovas jovens, incluindo SN 1987A e Cassiopeia A (ver [Fig. 1](#)).

Infelizmente, nenhuma das pesquisas detectou qualquer sinal de OC. No entanto, a ausência de detecção não significa que não haja resultados. Podemos estimar a [sensibilidade](#) da nossa pesquisa e, a partir daí, inferir propriedades sobre as estrelas que investigámos. Por exemplo, ao estabelecer um limite para a intensidade do sinal, podemos usar isso para definir um limite superior para o grau de deformação da estrela alvo. A assimetria de uma estrela de neutrões é medida através de um parâmetro ϵ , que representa a [elipticidade](#). Diferentes modelos para estrelas de neutrões prevêem limites diferentes para a elipticidade, mas a maioria prevê $\epsilon < 10^{-6}$. Mostramos os limites de elipticidade para vários alvos na [Figura 2 \(gráfico da esquerda\)](#). O eixo vertical é o [limite superior](#) de 95% para ϵ obtido nesta pesquisa (um limite superior de 95% significa, em termos gerais, que temos 95% de certeza de que o valor verdadeiro do parâmetro não é maior do que este limite). O eixo horizontal é a frequência das ondas gravitacionais, que afeta a elipticidade de duas maneiras. Em primeiro lugar, a deformação das ondas gravitacionais a uma determinada frequência é mais intensa para uma estrela mais elíptica. Em segundo lugar, a sensibilidade do LIGO, do Virgo e do KAGRA depende da frequência, pelo que os nossos limites para a deformação das ondas gravitacionais variam ao longo de toda a gama de frequências. Conseguimos restringir a elipticidade abaixo do máximo teórico ($\epsilon < 10^{-6}$). À medida que este limite melhora, seremos capazes de excluir modelos físicos que tentam prever as propriedades das estrelas de neutrões.

As estrelas de neutrões triaxiais não são a única forma de uma estrela de neutrões gerar ondas contínuas. A rotação estelar também pode gerar ondas gravitacionais contínuas através de oscilações do [modo r](#) no interior da estrela de neutrões, sendo a escala das oscilações parametrizada pela amplitude α . O limite superior teórico da escala das oscilações é $\alpha < 10^{-3}$. Um limite na deformação de uma estrela de neutrões elíptica pode ser convertido num limite para α , como fazemos na [Figura 2 \(gráfico da direita\)](#). O eixo vertical representa o nosso limite superior de 95% para α e o eixo horizontal representa a frequência das ondas gravitacionais (em Hz).

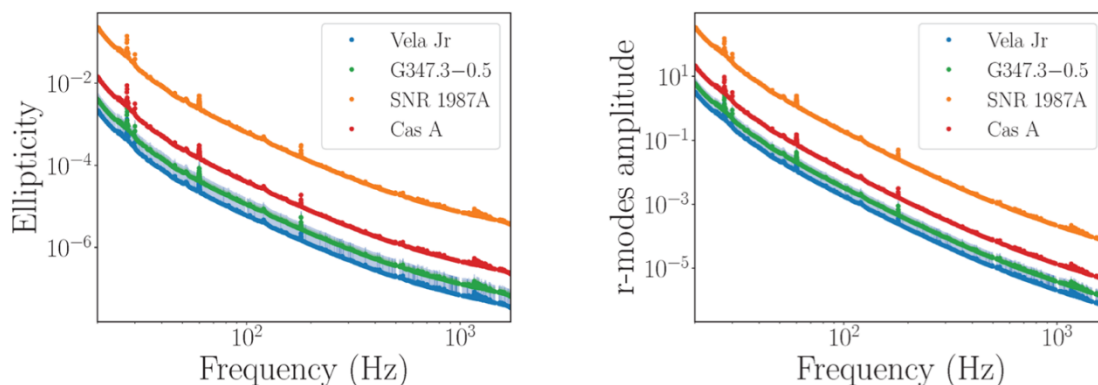


Figura 2: Os [limites superiores](#) de 95% para a [elipticidade](#) e das estrelas de neutrões (à esquerda) e para o [modo r](#) (à direita) em algumas das análises e alvos apresentados no artigo. O eixo horizontal representa a frequência na qual detetáramos um sinal de ondas gravitacionais; o eixo vertical representa o limite superior de 95% para a elipticidade (à esquerda)/modo r (à direita). As curvas azul (Vela Jr), verde (G347.3-0.5), laranja (SNR 1987A) e vermelha (Cas A) mostram a elipticidade mínima possível (gráfico da esquerda) ou a amplitude (gráfico da direita) que poderíamos detetar. Este é um limite superior para o grau de elipticidade ou intensidade dos modos r na estrela de neutrões. Se a estrela fosse mais elíptica do que isto, provavelmente tê-la-íamos detetado. E se os modos r fossem mais fortes do que isto, tê-los-íamos observado. Para este gráfico, escolhemos os resultados da quinta pipeline baseada em correlação cruzada (descrita acima), que é nova desde a pesquisa O3a e é aplicada ao mais jovem SNR 1987A.

Em resumo, não detetámos nenhum sinal de ondas contínuas proveniente do remanescente da SN 1987A, nem de qualquer outro dos remanescentes que explorámos. No entanto, os cinco métodos de pesquisa complementares aplicados aos dados de O4a permitiram-nos estabelecer os limites mais rigorosos até à data quanto à intensidade que os sinais de CW poderiam atingir, melhorando os nossos resultados anteriores com os dados de O3a e elevando a nossa sensibilidade aos sinais de ondas contínuas provenientes de novas estrelas de neutrões a um novo nível. O nosso limite mais restrito foi encontrado para o famoso remanescente de supernova Vela Jr, que nos ajuda a compreender o quão irregulares são as estrelas de neutrões e quão fortes podem ser alguns tipos de ondas internas (ou modos r). Essas irregularidades (para Vela Jr) devem ser menores do que cerca de uma parte em dez milhões, e os modos r menores do que cerca de uma parte em cem mil em frequências acima de 400 Hz. Estes resultados constituem as pesquisas de frequência de banda larga mais sensíveis até à data para ondas gravitacionais contínuas provenientes de remanescentes de supernovas.

À medida que a recolha de dados prossegue e os nossos métodos e sensibilidade melhoram, a probabilidade de efetuarmos a primeira detecção aumenta. Até lá, continuaremos a refinar os modelos físicos com base nas ausências de detecção e a empenhar-nos em aumentar ainda mais a sensibilidade das nossas pesquisas.

PARA SABER MAIS

Visita as nossas páginas web:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)

Lê uma pré-impressão de livre acesso do artigo científico [aqui](#) ou no [arXiv](#).

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

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