

O GIRO DAS ESTRELAS DE NÊUTRONS: a busca por ondas gravitacionais contínuas

As estrelas de nêutrons (EN) são o resultado de uma supernova, a remanescente da formação de uma estrela de massa entre 10 e 25 vezes a massa do Sol. Esses objetos compactos possuem um raio típico de 10 km e uma massa semelhante à do nosso Sol, fazendo das estrelas de nêutrons um dos ambientes mais extremos no qual a matéria já foi observada. Atualmente, a composição e a estrutura desse tipo de objetos compactos são um campo de pesquisa muito ativo e interdisciplinar, unindo esforços das comunidades de física de partículas e da astrofísica.

A concentração de material (ou densidade) desses objetos os tornam um laboratório interessante para testar efeitos relativísticos, como a emissão de radiação gravitacional. De fato, os detectores Advanced LIGO e Advanced Virgo detectaram com sucesso vários eventos de ondas gravitacionais relacionados à coalescência de duas ENs. Uma dessas detecções, GW170817, foi inclusive acompanhada por uma contrapartida eletromagnética, produzindo a primeira detecção multi-mensageira de um evento astrofísico via ondas gravitacionais e luz.

As Ondas Gravitacionais Contínuas (OGC) formam um outro canal através do qual a estrutura interna de ENs que giram muito rápido pode ser sondada. De acordo com a teoria, uma estrela de nêutrons pode se desviar de uma forma perfeitamente simétrica, seja por conta de uma imperfeição na crosta externa ou uma perturbação oscilante na estrutura interna ou alguma precessão livre causada por desalinhamentos entre o eixo de simetria e o eixo de rotação. Como a EN gira muito rapidamente, essa deformação emitiria ondas gravitacionais de forma contínua, ou seja, OGC.

Esse tipo de radiação gravitacional é, em várias ordens de magnitude, mais fraca do que as ondas produzidas durante a coalescência de objetos compactos; no entanto, ela dura por longos períodos de tempo (de meses a anos), permitindo a integração de dados por longos períodos para acumular uma grande razão sinal-ruído.

Pesquisas desse tipo são classificadas de acordo com o que se conhece sobre as fontes potenciais. Por exemplo, as buscas direcionadas concentram-se no NS cuja posição no céu e a frequência de rotação são conhecidas graças a estudos baseados no sinal eletromagnético, enquanto as buscas direcionais apontam para certas posições no céu onde um NS desconhecido poderia estar localizado.

Aqui mostramos o resultado para uma busca em todo o céu, quer isto dizer que procuramos por sinais de ondas gravitacionais contínuas providas de fontes completamente desconhecidas e de qualquer direção do céu. Em particular, nós nos detivemos em sistemas binários de estrelas de nêutron desconhecidos.

O sinal esperado para estrelas de nêutrons isoladas é uma onda de longa duração, cuja frequência diminui lentamente devido à emissão de energia por meio de diferentes formas, como ondas eletromagnéticas e gravitacionais. Esse efeito de diminuição da rotação (do inglês **spindown**) acontece tão lentamente que

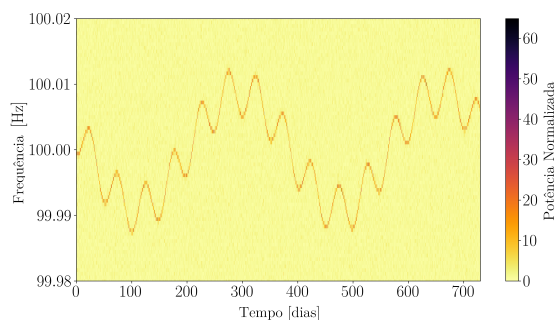


Figura 1: Exemplo de um forte sinal de onda gravitacional contínua visto em um espectrograma. Este sinal corresponde a uma EN deformada girando 50 vezes por segundo orbitando um companheiro com um período orbital de 50 dias. A escala de frequência geral, 100 Hz, é dada pelo dobro da frequência de rotação do corpo. As oscilações maiores (mais largas), com periodicidade de 365 dias, correspondem à modulação Doppler induzida pelo movimento orbital da Terra em torno do sol. Os mais estreitos, com periodicidade de 50 dias, correspondem ao movimento orbital da fonte em torno de sua companheira. A duração do fluxo de dados (2 anos) é considerada mais longa do que a usada nesta pesquisa (6 meses) para fins de ilustração.

pode ser negligenciado, dada a população de ENs consideradas para a busca em questão. Do ponto de vista de um detector na Terra, o sinal apresenta uma modulação no sinal devido à rotação e à órbita do nosso planeta. Este sinal é ainda mais complicado para ENs em um sistema binário, pois uma segunda modulação, denominada modulação Doppler, deve ser levada em consideração devido ao movimento relativo da fonte em torno de seu corpo companheiro no sistema.

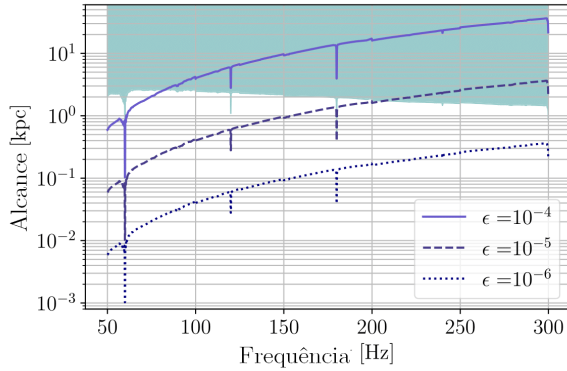


Figura 2: Alcance astrofísico máximo coberto por nossa busca em função da frequência. As curvas representam diferentes valores de deformação, caracterizados como a elipticidade de uma EN. Deformações maiores e frequências mais altas tendem a produzir OGC mais fortes, permitindo-nos sondá-los a distâncias maiores. A região sombreada implica taxas de spindown além das sondadas pela pesquisa. Como referência, o EN conhecido mais próximo de nós está localizado a 0,1 kpc de distância.

de busca pois o custo computacional facilmente acaba se tornando intolerável. Nesse caso, o problema pode ser dividido em uma infinidade de tarefas semelhantes, porém menores, e a pesquisa pode ser acelerada com unidades de processamento gráfico (do inglês GPU) que resolvem um grande número dessas sub-tarefas em paralelo.

Nós usamos dados do início da terceira corrida observacional dos detectores Advanced LIGO e Advanced VIRGO, abrangendo seis meses de dados de abril a setembro de 2019, para pesquisar ondas gravitacionais contínuas e sistemas binários desconhecidos de ENs na banda mais sensível dos detectores. Não encontramos evidências de sinais OGC. Como resultado, estimamos a sensibilidade de nossa busca estudando a recuperação de uma população de sinais simulados. Essa sensibilidade é inicialmente expressa em termos da amplitude da OG mais fraca detectável por nosso pipeline. Obtemos a melhor sensibilidade até o momento para o espaço de parâmetro analisado, com a amplitude detectável mais fraca 60% menor do que as estimativas anteriores.

Interpretamos esses resultados de forma a responder duas perguntas astrofisicamente interessantes, a saber, a que distância da Terra nossa busca foi capaz de sondar e qual é a deformação máxima permitida para uma fonte OGC dentro da faixa sondada. As Figuras 2 e 3 resumem o alcance máximo de nossa busca e também a deformação máxima permitida para uma fonte OGC em função da frequência da onda gravitacional. Como comentado anteriormente, consideramos fontes com spindown

Nessa busca, nós utilizamos uma variação da Transformada de Hough, chamada BinarySkyHough, que opera usando um espectrograma dos dados. Esse espectrograma fornece informações sobre quais frequências são mais proeminentes nos dados à medida que a corrida observacional avança. A ideia básica é que um sinal OGC apareceria como um excesso de potência no espectrograma sendo ele modulado de uma forma muito particular, conforme exemplificado na Figura 1. Podemos descrever essas faixas de potência usando um conjunto de parâmetros relacionados às propriedades físicas da fonte sob consideração, como sua frequência de rotação ou sua posição no céu; portanto, procurar um OGC é uma questão de identificar trilhas de potência significativas nos dados.

Devido à inclusão de parâmetros orbitais que descrevem a forma da órbita, nós precisamos fazer a busca de sinais de OGC de sistemas binários utilizando mais parâmetros do que quando fazemos a busca de sinais de estrelas de nêutrons isoladas.

Isso representa um problema para os algoritmos

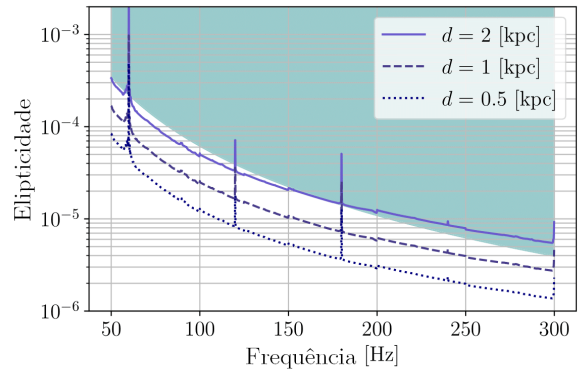


Figura 3: Deformação máxima permitida para um NS ao alcance de nossa busca em função da frequência. Essas curvas representam o quão deformado uma EN deve ser para produzir uma OGC detectável por nossa pesquisa. Fontes mais próximas são restritas a ter elipticidades mais baixas do que aquelas mais distantes. A região sombreada implica taxas de spindown além das sondadas pela busca, sem assumir outro mecanismo de balanceamento.

Como comentado anteriormente, consideramos fontes com spindown

desprezível. Esta suposição define um limite implícito na deformação máxima para a estrela de nêutron, representado por regiões sombreadas nas figuras supracitadas. Em outras palavras, se nenhum mecanismo de balanceamento estiver em vigor, as regiões sombreadas serão excluídas de nossos resultados, uma vez que implicariam em taxas de spindown mais altas do que as cobertas por esta busca. Um possível mecanismo de equilíbrio contra o spindown ds EN pode ser o acréscimo de matéria do objeto companheiro.

Esses resultados mostram a melhoria crescente dos detectores Advanced LIGO e Advanced Virgo conforme eles atingem sua sensibilidade de projeto, permitindo-nos aproximar os limites superiores das propriedades NS cada vez mais perto das expectativas teóricas.

Saiba Mais:

Visite nossos sites: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu;

Você também pode ler mais sobre Ondas Gravitacionais aqui.

Glossário

Estrela de Nêutrons (Neutron Star): é um objeto compacto remanescente de uma supernova de uma estrela com massa entre 10 e 25 massas solares. 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.

Elipticidade: é uma medida da deformação de um objeto, mostrando o quão afastado de uma esfera está o corpo em questão. Ela é definida como a deformação relativa entre o plano equatorial e a deformação ao longo da direção perpendicular.

Spindown: taxa com a qual uma estrela de nêutrons com rotação vai diminuindo a sua velocidade por conta da emissão de energia via ondas eletromagnéticas e gravitacionais.

Deslocamento Doppler (Doppler shift): mudança na frequência da onda causado pelo movimento relativo entre a fonte e o observador.

Sistema binário: par de objetos astronômicos unidos pela atração gravitacional.

Transformada de Hough (Hough transform): é um algoritmo utilizado para identificar formas geométricas bem descritas em imagens como aquelas descritas por um espectrograma.

Espectrograma (Spectrogram): representação de tempo-frequência-energia de dados de série temporal. A intensidade das frequências individuais é mostrada como cores.

Unidade de Processamento Gráfico - GPU (Graphics Processing Unit): hardware especializado para o processamento de dados usando paralelização massiva.

Acresção: transferência de matéria entre dois corpos em um sistema devido a ação da gravidade.

Quiloparsec (kpc): equivale a mil parsecs. Um parsec é um unidade astronômica de distância que corresponde a, aproximadamente, 3 anos-luz ou 30 trilhões de quilômetros.