

ANÁLISE DA PREVISÃO DE EQUILÍBRIO DE TORQUE PARA SCORPIUS X-1

SUMÁRIO

Realizamos a pesquisa mais sensível até à data para detectar [ondas gravitacionais contínuas](#) (OGCs) provenientes do [binário de raios X de baixa massa Scorpius X-1](#). Pela primeira vez, se o Scorpius X-1 estiver a emitir [ondas gravitacionais](#) (OGs) com a intensidade prevista pelo modelo de “equilíbrio de torque”, os detetores do [Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferómetro Laser](#) (LIGO) seriam capazes de captar este sinal na gama de frequências entre 50 e 200 Hz.

Utilizando dados da primeira parte do quarto [período de observação LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) (O4a), realizámos uma pesquisa na banda de frequências de 25–200 Hz através de um método de [correlação cruzada](#). Ao analisar os dados na perspectiva do membro do sistema binário que é uma [estrela de neutrões](#), conseguimos ter em conta o movimento orbital do sistema binário, permitindo que a nossa análise fosse [coerente](#) durante um período de tempo mais longo. Foram identificados alguns sinais candidatos interessantes que se comportavam como se pudessem ter origem astrofísica; estes candidatos foram reanalisados com um tempo de coerência mais longo para verificar se o seu comportamento permanecia consistente com um sinal real. No entanto, nenhum dos candidatos forneceu evidência suficiente para afirmar uma deteção de ondas gravitacionais.

O QUE PROCURAMOS?

A procura de ondas gravitacionais provenientes de uma estrela de neutrões específica é como conseguir ver uma banda a tocar música, mas estar demasiado longe para a ouvir. Em vez disso, dispõe-se de um instrumento altamente sensível, capaz de detetar minúsculas oscilações no ar produzidas pela banda e, ao analisar essas oscilações, tenta-se prever a música que a banda está a tocar. As ondas gravitacionais contínuas têm uma [amplitude](#) significativamente mais fraca do que os (muitos) sinais de ondas gravitacionais que já foram detetados a partir da [aproximação em espiral](#) e [fusão](#) de sistemas binários de objetos compactos, tais como [buracos negros](#) ou estrelas de neutrões. No entanto, ao contrário destes sinais de fusão, que são de curta duração, os sinais contínuos são emitidos de forma ininterrupta durante longos períodos de tempo. Por conseguinte, as pesquisas de sinais OGC podem combinar dados ao longo de períodos prolongados (como um período de observação completa) para acumular sinal ao longo do tempo e aumentar a probabilidade de deteção. Enquanto uma fusão de um sistema binário de objetos compactos produz um sinal de “[chirro](#)” que aumenta rapidamente tanto em frequência como em amplitude, os sinais OGC são “quase monocromáticos”, o que significa que mantêm uma frequência quase constante durante longos períodos de tempo.

As estrelas de neutrões densas, girando a velocidades que podem atingir centenas de rotações por segundo, são as fontes mais prováveis das ondas gravitacionais contínuas. Qualquer ligeira assimetria na distribuição da massa da estrela de neutrões irá gerar ondas gravitacionais a uma frequência que é o dobro da frequência de rotação da estrela. Quando estas ondas atingem os nossos detetores na Terra, a frequência sofre uma alteração (conhecida como [efeito Doppler](#)) devido ao movimento dos detetores à medida que a Terra gira e se desloca pela sua órbita, bem como a qualquer movimento variável no tempo da própria estrela de neutrões.

A fonte mais promissora de OGCs que conhecemos é o sistema binário de [raios X](#) de baixa massa (LMXB, do inglês *low mass X-ray binary*), Scorpius X-1 (Sco X-1). Um LMXB (ver Figura 1) é um sistema constituído por um objeto compacto numa órbita binária com uma estrela companheira de menor massa. O Sco X-1 é um LMXB na nossa galáxia, sendo a fonte de raios X persistente mais brilhante (para além do Sol) que observamos, e encontra-se relativamente próximo, a apenas 9 000 [anos-luz](#) de distância. Num LMXB, a estrela de neutrões atrai matéria gasosa da estrela companheira num processo conhecido como [acrecção](#). O material acretado cria uma “protuberância” na superfície da estrela de neutrões, causando uma assimetria na sua distribuição de massa que gera ondas gravitacionais contínuas à medida que a estrela de neutrões roda.

A acreção de matéria à estrela de neutrões também influencia a sua rotação. A acreção pode “acelerá-la”, aumentando a sua velocidade de rotação, enquanto as ondas gravitacionais, juntamente com outras forças, como a interação do campo magnético da estrela com o ambiente, podem “abrandá-la”. Quando os [torques](#), ou forças de rotação, decorrentes do aumento e da diminuição da rotação se anulam mutuamente, a rotação da estrela permanece constante. O cenário em que esta rotação constante é mantida apenas pela acreção e pelas ondas gravitacionais é conhecido como “equilíbrio de torques” e fornece uma estimativa otimista (uma vez que desconsidera outras contribuições para a diminuição da rotação) da intensidade esperada do sinal de ondas gravitacionais. A massa transferida da estrela doadora para Sco X-1 não é constante. Como a aceleração da rotação de Sco X-1 é impulsionada pelo torque de acreção, a variação da taxa de acreção fará com que a frequência de rotação da estrela de neutrões flutue estocasticamente ao longo do tempo. Este fenómeno é conhecido como “desvio de rotação”. Ao longo de uma observação prolongada, o desvio de rotação faz com que o sinal de ondas gravitacionais se desvie da sua evolução de fase esperada, levando a um desfasamento e a uma perda da [relação sinal-ruído](#) (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*).



Figura 1: Representação artística de um sistema binário de raios X de baixa massa, como o Scorpius X-1. Crédito: Gabriel Pérez Díaz, SMM (IAC)

PARA SABER MAIS:

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



A acreção à estrela de nêutrons também produz **raios X**, que podem ser observados com **telescópios de raios X** para estimar a taxa de acreção. As observações de Sco X-1 numa gama ampla de **frequências eletromagnéticas**, desde as ondas de rádio até aos raios X, forneceram informações sobre a sua posição no céu e os parâmetros da órbita da estrela de nêutrons. Estas informações são essenciais para determinar os possíveis sinais de ondas gravitacionais, tornando a nossa pesquisa um exemplo de **astronomia multimensageira**.

Até à data, já foram realizadas muitas pesquisas sobre Sco X-1 utilizando técnicas conhecidas como o **radiômetro** e o método de **Viterbi**, bem como o método de **correlação cruzada** utilizado neste trabalho.

COMO FIZEMOS A PESQUISA?

Os sinais de OG são “modulados por efeito Doppler” devido à rotação diária da Terra e ao movimento orbital anual da Terra em torno do Sol, bem como ao movimento de Sco X-1 em torno do **centro de massa** do seu sistema binário (ver **Figura 2**). Este efeito é semelhante ao da sirene de um caminhão de bombeiros, cujo som soa mais agudo à medida que se aproxima de nós e mais grave à medida que se afasta. Utilizamos uma técnica chamada reamostragem para transformar os dados do sistema de referência do detetor para o sistema de referência no qual a estrela de nêutrons se encontra em repouso, de forma análoga a mudar a nossa perspectiva de estar fora do caminhão de bombeiros enquanto este passa para estar dentro do caminhão, de modo a ouvirmos a sirene sem qualquer alteração no tom. Esta correção elimina os deslocamentos Doppler causados tanto pelo movimento da Terra como pelo movimento orbital do sistema binário, pelo que o sinal se torna monocromático.

A **pipeline** de reamostragem utiliza a mesma pesquisa de correlação cruzada, sendo que a única diferença reside no facto de os dados serem transladados no tempo, do sistema de referência do detetor para o sistema de referência em repouso da estrela de nêutrons, antes de a pesquisa ser realizada.

Para compreender melhor a pesquisa de correlação cruzada, imagina um clarinetista a andar para a frente e para trás enquanto toca uma determinada nota musical. Devido ao movimento do clarinetista, a altura do som irá soar ligeiramente mais aguda ou mais grave ao longo do tempo. Supõe agora que dois ouvintes, em locais diferentes, gravam o som do clarinete. Apenas através da observação visual, podem estimar a velocidade do clarinetista e a duração do movimento de vaivém. Ao compararem o que cada ouvinte ouve, também conseguem acompanhar a forma como a altura da nota musical se altera ao longo do tempo e corrigi-la tendo em conta o desvio Doppler devido ao movimento do clarinetista. Quanto melhor for a correspondência entre as frequências ouvidas pelos dois ouvintes, com maior precisão poderão recuperar a verdadeira frequência da nota que está a ser tocada.

Da mesma forma, o método de correlação cruzada procura correlações entre segmentos de dados recolhidos em momentos diferentes e/ou em detetores diferentes, utilizando um modelo da forma de onda de ondas gravitacionais produzida por uma estrela de nêutrons em rotação para prever as correlações esperadas. Para construir esta forma de onda modelo, é necessário conhecer as propriedades do sistema binário, tais como a verdadeira frequência da onda gravitacional, localização no céu e parâmetros orbitais. No caso de Sco X-1, a frequência é desconhecida, enquanto a posição no céu está bem determinada por observações eletromagnéticas. Os parâmetros orbitais também são conhecidos, embora com alguma imprecisão, pelo que precisamos de realizar a pesquisa utilizando muitos conjuntos possíveis de parâmetros, incluindo a frequência do sinal, o período, a fase e o tamanho da órbita. A nossa pesquisa considera apenas correlações entre dados separados por um intervalo de tempo não superior a um desfaseamento temporal ajustável, denominado “tempo de coerência”.

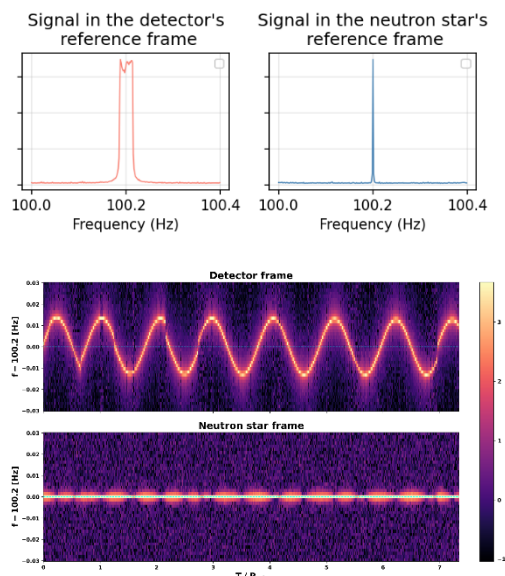
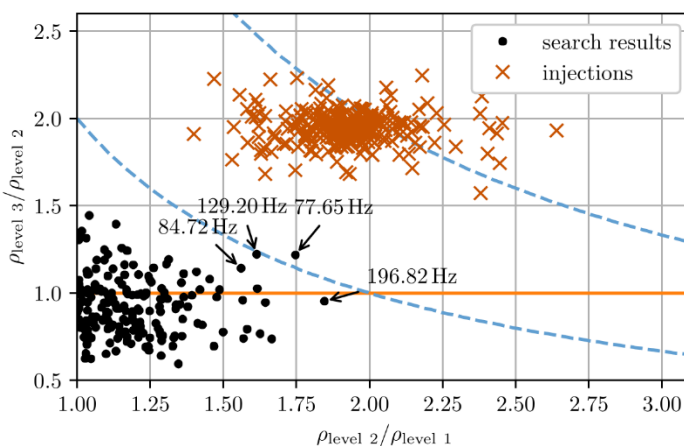


Figura 2: Os painéis superiores mostram como a potência do sinal de ondas gravitacionais observado se distribui pelas diferentes frequências no sistema de referência do detetor (à esquerda) e no sistema de referência da estrela de nêutrons (à direita). No painel da direita, a correção do movimento orbital transforma o sinal modulado por efeito Doppler numa frequência constante. (É apresentada uma amplitude artificialmente elevada para fins ilustrativos.)

Os painéis do meio e de baixo mostram os **espectrogramas** correspondentes, ou seja, gráficos da variação do sinal ao longo do tempo: o sinal no referencial do detetor oscila sinusoidalmente devido ao movimento orbital do binário, enquanto que, no referencial da estrela de nêutrons, é transformado de modo a tornar-se constante na frequência $f = 100,2$ Hz. A modulação Doppler adicional devida à órbita da Terra em torno do Sol não é visível, uma vez que é muito menor do que a modulação orbital de Sco X-1.

Figura 3 (Fig. 4 do nosso artigo): Os resultados das análises de acompanhamento de potenciais sinais da nossa pesquisa. O eixo horizontal mostra a relação entre as relações sinal-ruído antes e depois de quadruplicar o tempo de coerência na correlação cruzada, o que, teoricamente, deveria duplicar o SNR. O eixo vertical mostra a relação entre os SNRs antes e depois de uma segunda quadruplicação, o que, por conseguinte, deveria, teoricamente, aumentar o SNR original por um fator de quatro. As linhas tracejadas azuis mostram valores constantes da relação entre os SNRs antes e depois das duas quadruplicações consideradas em conjunto, sendo que a linha tracejada inferior é igual a 2 e a linha tracejada superior é igual a 4. As cruzes laranjas indicam sinais simulados injetados, cujos SNRs aumentam com cada aumento do tempo de coerência, tal como esperado. Em comparação, as relações SNR dos candidatos à deteção (pontos pretos) não seguem o comportamento esperado de um sinal verdadeiro. No entanto, é indicado um possível candidato a sinal a uma frequência de 129,20 Hz; este candidato apresenta, de facto, um aumento da relação SNR com a quadruplicação, embora não tão acentuado como seria de esperar para um sinal ideal. As frequências de outros três possíveis candidatos a sinal estão também identificadas na figura.



Analísamos os dados da primeira parte do quarto período de observação de LVK (O4a), que decorreu entre maio de 2023 e janeiro de 2024. Excluindo os períodos em que um ou ambos os detetores não estavam a recolher dados utilizáveis de alta qualidade, isto correspondeu a cerca de 159 dias de dados do detetor LIGO Hanford e 163 dias do detetor LIGO Livingston. O tempo de coerência foi definido para 24 horas.

O QUE APRENDEMOS?

O resultado da nossa pesquisa é um SNR calculado para cada combinação de valores de parâmetros considerada. Se o SNR de qualquer dessas combinações for superior ao que seria de esperar de dados que contêm apenas ruído, “acompanhamos” essa combinação candidata como uma possível detecção. Fazemos isso reanalisando os dados, mas com um tempo de coerência mais longo e numa grelha mais estreita de pontos no espaço de parâmetros em torno da combinação candidata de valores. Se o SNR aumentar, repetimos o processo, adotando um tempo de coerência ainda mais longo. Também realizamos esta análise em candidatos que surgem de sinais simulados, ou seja, nos casos em que “injetamos” um sinal OGC no ruído. A **Figura 3** mostra que nenhum dos candidatos identificados na nossa pesquisa aumentou o seu SNR da mesma forma que as nossas injeções simuladas, como um sinal verdadeiro faria.

Uma vez que a nossa pesquisa não revelou qualquer detecção, estabelecemos limites superiores para a intensidade das ondas gravitacionais provenientes de Sco X-1 em função da frequência (ver **Figura 4**). Os limites superiores foram escolhidos de forma a que, caso existisse um sinal com essa amplitude ou superior, a nossa pesquisa teria produzido uma relação sinal-ruído (SNR) igual ou superior à que observávamos nessa frequência, com uma probabilidade de 95%. Estes resultados representam as restrições mais sensíveis à intensidade da emissão de ondas gravitacionais de Sco X-1 até à data e exploram amplitudes que os modelos do cenário de equilíbrio de torque prevêem serem realistas. A **Figura 5** mostra os limites superiores correspondentes para a **elipticidade** da estrela de neutrões (que mede, de forma aproximada, o quanto este se afasta da forma esférica) e a sua amplitude no **modo r** (que mede a magnitude da velocidade de oscilação do fluido em comparação com a velocidade de rotação do NS) em função da frequência.

Com uma sensibilidade melhorada nos futuros períodos de observação do *Advanced* LIGO-Virgo-KAGRA, esperamos poder procurar sinais ainda mais fracos provenientes de Sco X-1. Numa situação mais realista, em que outros mecanismos de desaceleração sejam relevantes para além das ondas gravitacionais, espera-se que a intensidade das ondas gravitacionais seja inferior à amplitude nominal do equilíbrio de torque. Assim, uma sensibilidade melhorada nas futuras campanhas de observação significa que seremos capazes de analisar cenários mais realistas e, consequentemente, detetar potencialmente ondas gravitacionais provenientes de Sco X-1.

Outra forma de saber mais sobre os sinais de ondas gravitacionais é através de observações eletromagnéticas. Se alguma vez forem detetadas pulsações ou explosões termonucleares por meios eletromagnéticos a partir de Sco X-1, os astrónomos especializados em ondas gravitacionais poderão ser capazes de determinar com maior precisão a frequência dos sinais de ondas gravitacionais emitidos. Além disso, ao observar a sua variabilidade nos raios X, podemos modelar e prever melhor as alterações no processo de acreção de Sco X-1, o que também nos pode ajudar a compreender e acompanhar a mudança de rotação da estrela de neutrões, ou seja, as alterações que podem fazer com que a estrela de neutrões aumente ou diminua a sua velocidade de rotação.

PARA SABER MAIS:

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

Pré-publicação de acesso livre do artigo que descreve os pormenores da análise completa e dos resultados – “Sub-Torque-Balance Upper Limits on Continuous Gravitational Waves from Scorpius X-1”: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500260/public/> ou no ArXiv: <http://arxiv.org/abs/2606.nnnnn>

Pré-publicações de acesso livre dos artigos que descrevem o nosso método com mais pormenor:

*The cross-correlation search for periodic gravitational waves”: <http://arxiv.org/abs/0712.1578>

*Model-Based Cross-Correlation Search for Gravitational Waves from Scorpius X-1”: <http://arxiv.org/abs/1504.05890>

*Resampling to accelerate cross-correlation searches for continuous gravitational waves from binary systems”: <https://arxiv.org/abs/1712.06515>

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

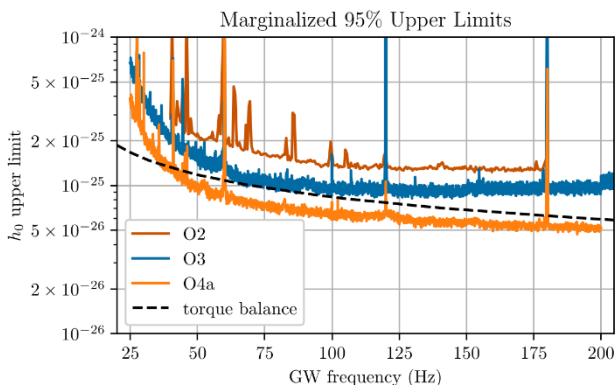


Figura 4 (adaptada da Fig. 5 do nosso artigo): Como o limite superior de 95% estabelecido para a amplitude h_0 das ondas gravitacionais pela pesquisa de correlação cruzada O4a varia com a frequência das ondas gravitacionais. São também apresentados os resultados das pesquisas de correlação cruzada das campanhas de observação anteriores O2 e O3. Pela primeira vez, os limites superiores de O4a superaram o limite do equilíbrio de torque esperado numa ampla gama de frequências de 50–200 Hz, marginalizados (ou seja, calculados em média) em relação ao ângulo de inclinação desconhecido do spin da estrela de neutrões.

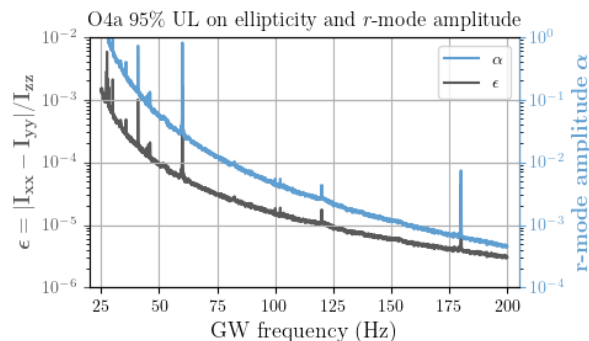


Figura 5 (Fig. 7 do nosso artigo): Como o limite superior de 95% estabelecido para a elipticidade e a amplitude do modo r da estrela de neutrões em Sco X-1 varia com a frequência das ondas gravitacionais, derivado dos limites superiores da amplitude das ondas gravitacionais apresentados na Figura 4. Em frequências mais elevadas, a nossa pesquisa torna-se sensível à elipticidade máxima que a crosta da estrela de neutrões pode suportar. No que diz respeito às amplitudes do modo r, os limites superiores situam-se bem acima da amplitude de saturação do modo r prevista.

GLOSSÁRIO

Objeto compacto: Um objeto astrofísico extremamente denso, como um buraco negro, uma estrela de neutrões ou uma anã branca.

Elipticidade: Mede a distribuição de massa não axisimétrica em relação ao eixo de rotação de uma estrela de neutrões. Uma bola de futebol perfeitamente esférica tem elipticidade nula, mas uma bola de rãguebi ou de futebol americano, que é alongada ao longo de um eixo, terá uma elipticidade diferente de zero.

Hertz: Uma unidade de frequência igual a um ciclo por segundo

Ângulo de inclinação: Ângulo entre o eixo de rotação de uma estrela de neutrões e uma direção de referência, como a linha de visão do observador.

Binário de raios X de baixa massa (LMXB): Um sistema binário composto por um objeto compacto, como uma anã branca, uma estrela de neutrões ou um buraco negro, e uma estrela companheira de menor massa, no qual o objeto compacto está a acumular matéria da companheira, gerando raios X.

Relação sinal-ruído (SNR): O rácio entre a potência do sinal e a potência do ruído. Mede a intensidade do sinal em comparação com as fontes de ruído que o contaminam.

Strain: A variação na distância entre dois pontos de referência, resultante da deformação do espaço-tempo causada pela passagem de uma onda gravitacional.

Limite superior: O valor máximo possível para uma grandeza que seja compatível com a sua não detecção nos dados. Neste relatório, a quantidade em questão é a amplitude máxima intrínseca da deformação por ondas gravitacionais de um determinado sinal contínuo que chega à Terra. Como não detetámos qualquer sinal, estabelecemos um limite de nível de confiança de 95%, o que significa que um sinal real com essa amplitude de deformação (ou superior) produziria um SNR superior à medida em 95% (ou mais) das vezes.