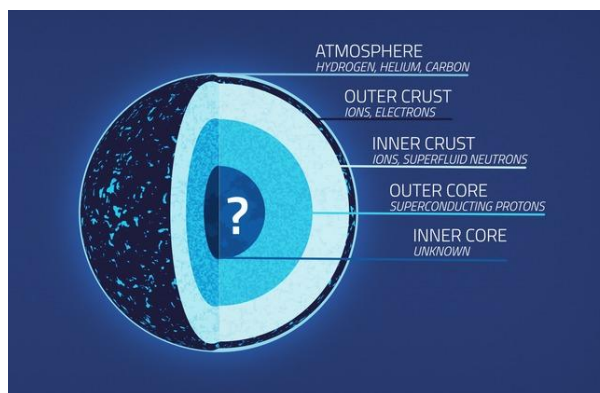


# DISSECANDO O INTERIOR DAS ESTRELAS DE NÊUTRONS COM ONDAS GRAVITACIONAIS

A [colaboração LIGO Virgo e Kagra \(LVK\)](#) conduziu uma nova busca pelas [ondas gravitacionais contínuas \(OCs\)](#) incrivelmente tênues emitidas por [Estrelas de Nêutrons \(ENs\)](#), núcleos giratórios extremamente densos deixados para trás após estrelas massivas sofrerem uma [explosão de supernova](#). Utilizando dados da primeira e segunda partes da quarta [campanha de observação](#) (O4a: maio/2023 a janeiro/2024 e O4b: abril/2024 a janeiro/2025) dos [interferômetros LIGO, Virgo e KAGRA](#), esta busca registra mais um feito no esforço para detectar ondas gravitacionais não provenientes de [colisões cósmicas](#) violentas, mas sim de fontes astrofísicas estáveis. Esses sinais delicados e periódicos abrem uma janela para o interior oculto das ENs, os objetos mais compactos do cosmos depois dos [buracos negros](#). Apesar de inúmeros esforços (veja nossa última busca [aqui](#)), esses sinais permanecem incrivelmente indetectados, indicando o quão próximas as ENs estão de uma esfera perfeita.

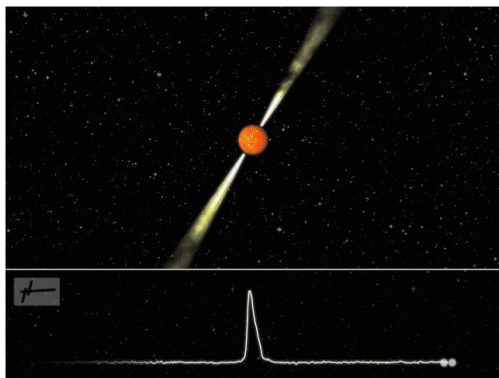
## QUAIS OBJETOS EMITEM OCS E POR QUE ELES SÃO INTERESSANTES PARA NÓS?

ENs são objetos muito densos e compactos, com [massa maior que a do nosso Sol](#), comprimida em um raio de quase de 10 km. A densidade extrema traz fenômenos quânticos que determinam a estrutura desses objetos incríveis. Ao contrário de estrelas normais, acredita-se que elas sejam extremamente rígidas e que tenham estruturas em camadas (ver [Figura 1](#)). Elas são envolvidas por uma atmosfera muito tênue, com uma crosta externa e um núcleo interno, onde as propriedades da matéria se tornam cada vez mais exóticas, aproximando-se do centro da estrela. Algumas ENs giram centenas de vezes por segundo, e se sua distribuição de massa for ligeiramente assimétrica, essa imperfeição pode gerar emissões fracas e periódicas de OCs que ainda não foram detectadas.



**Figura 1.** Esboço da estrutura interna em camadas e uma EN. *Crédito: NASA GSFC.* (veja também este [artigo de revisão](#).)

ENs possuem campos magnéticos extremamente fortes, variando de cem milhões a um quatrilhão de vezes mais fortes que o campo magnético da Terra, que geram feixes de radiação eletromagnética (ver [Figura 2](#)) em uma ampla gama de frequências, desde ondas de rádio até raios X e raios gama.



**Figura 2.** [Impressão de um pulsar](#) mostrando uma EN em rotação, juntam entre os feixes de radiação eletromagnética emitidos, destacando a chegada regular de pulsos a um telescópio. *Crédito: Joeri van Leeuwen, Licença: CC-BY-AS.*

Quando a estrela gira, esses feixes varrem o espaço como um farol cósmico, produzindo pulsos regulares sempre que cruzam nossa linha de visão. Observações de pulsares em vários observatórios eletromagnéticos (EM) nos fornecem medições precisas das posições dos pulsares, sua frequência e como os parâmetros de seu comportamento evoluem no tempo (conhecido como "desaceleração"). As observações EM de pulsares em sistemas binários revelam seu comportamento orbital, permitindo buscas de OCs em frequências específicas onde tais sinais são esperados.

A revelação desses sinais representaria um grande avanço, permitindo que os cientistas investiguem a estrutura interna das ENs e descubram novas informações sobre a matéria sob condições extremas.

## SAIBA MAIS:

Visite <https://ligo.org/>  
nossos <http://www.virgo-gw.eu/>  
sites: <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>



Neste estudo, focamos em 39 [pulsares](#) conhecidos (ver **Figura 3**), tentando captar suas emissões de OCs fracas.

## COMO PROCURAMOS UM SINAL DE OC?

Geralmente, precisamos adaptar nosso método de busca ao mecanismo de emissão que consideramos ou à precisão com que conhecemos os parâmetros das OCs. Aqui, aplicamos a chamada busca de banda estreita, capaz de explorar uma pequena faixa de frequência e adaptada para levar em conta possíveis discrepâncias entre as emissões EM e de OCs. De fato, Alguns modelos preveem que a crosta externa das ENs (ver **Figura 1**), que é a principal fonte de emissão EM, pode estar atrasada em relação ao núcleo, girando a uma velocidade levemente diferente. Nesse cenário, com buscas na banda estreita, procuramos por deformações do núcleo induzidas pelo poderoso campo magnético no interior da EN.

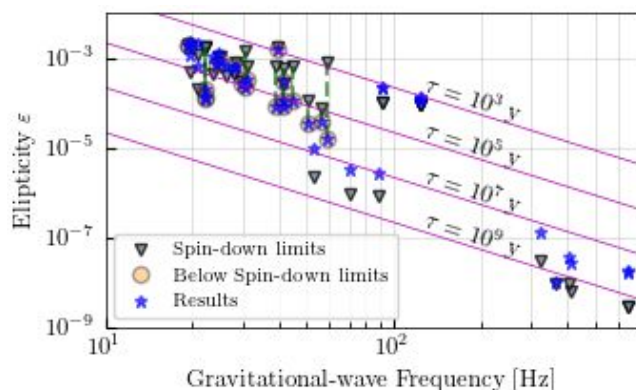
Também pode ocorrer que dados EM ruidosos não nos deixem restringir adequadamente a evolução da frequência da emissão do pulsar ao longo do tempo. Consequentemente, esses efeitos reduzem nossas chances de detecção se não forem devidamente considerados.

## O QUE DESCOBRIMOS?

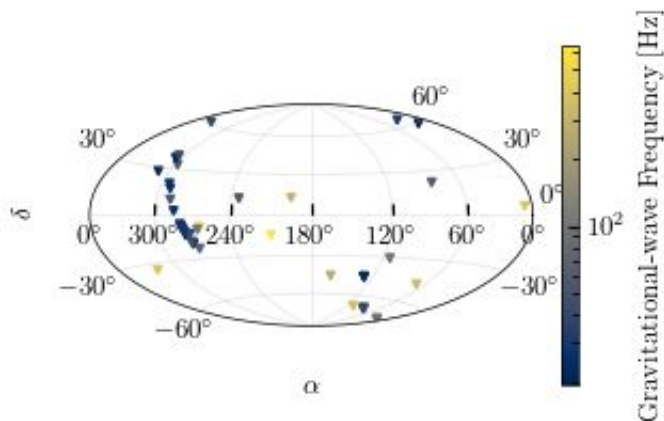
Infelizmente, não registramos nenhuma detecção de nossos alvos usando os dados de O4ab coletados pelos observatórios [LIGO Hanford](#) e [LIGO Livingston](#).

A deformação dessas ENs é medida pelo que chamamos de “[elipticidade](#)”. A não detecção de OCs em O4ab indica que suas elipticidades são inferiores aos [limites superiores](#) (ver **Figura 4**). Ou seja, os cientistas obtiveram estimativas mais precisas das distorções máximas dessas fontes, mesmo que pequenas demais para gerar um sinal detectável.

Nossos resultados na **Figura 4** são comparados com os chamados [limites de desaceleração rotacional](#), uma amplitude máxima teórica para cada uma das estrelas. Para mais da metade dos alvos, relatamos um limite superior abaixo dos limites de desaceleração rotacional da estrela, restringindo a fração de energia perdida devido à emissão de OCs. Nosso limite superior mais rigoroso para a elipticidade de ENs é para J0711-6830 (com uma frequência de OCs esperada em torno de 364 Hz), correspondendo a deformações da estrela ligeiramente acima de 100 [micrômetros](#) (onde um micrômetro equivale a um milionésimo de metro) para um raio de 10 Km. Tais limites também implicam limites superiores para a energia das OCs emitidas: no caso do [pulsar da Nebulosa do Carangueio](#) (em torno de 60 Hz), descobrimos que a estrela perde, no máximo, apenas 0,04% de sua energia através de emissões de OCs!



**Figura 4.** (Fig. 6 do nosso artigo) Estrelas: limites superiores experimentais para a elipticidade de cada pulsar em função da frequência esperada das OCs. Triângulos: limites superiores teóricos para a elipticidade, assumindo que a [desaceleração de rotação](#) dos pulsares se deve inteiramente à emissão de OC. Linhas roxas: pulsares de uma certa idade ( $\tau$  na figura), que perdem energia através da emissão de OGs, devem estar localizados próximos à mesma linha.



**Figura 3:** (Fig. 1 do nosso artigo) Localização no céu, em [coordenadas equatoriais](#), dos alvos analisados.

Embora não tenhamos encontrado ondas gravitacionais nesta busca, melhoramos nossos limites superiores anteriores graças a um período de coleta de dados mais longo e às melhorias nos detectores. No geral, este é um resultado importante porque impõe restrições mais rigorosas às teorias que descrevem as estrelas de nêutrons e nos ajuda a chegar ainda mais perto de uma compreensão abrangente da física complexa das estrelas de nêutrons.

## SAIBA MAIS:

Visite nossos sites:

<https://ligo.org/>  
[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/> (KAGRA)

Leia uma versão preliminar gratuita do artigo científico completo [aqui](#) ou no arXiv.

Leia uma introdução às OGs contínuas [aqui](#).