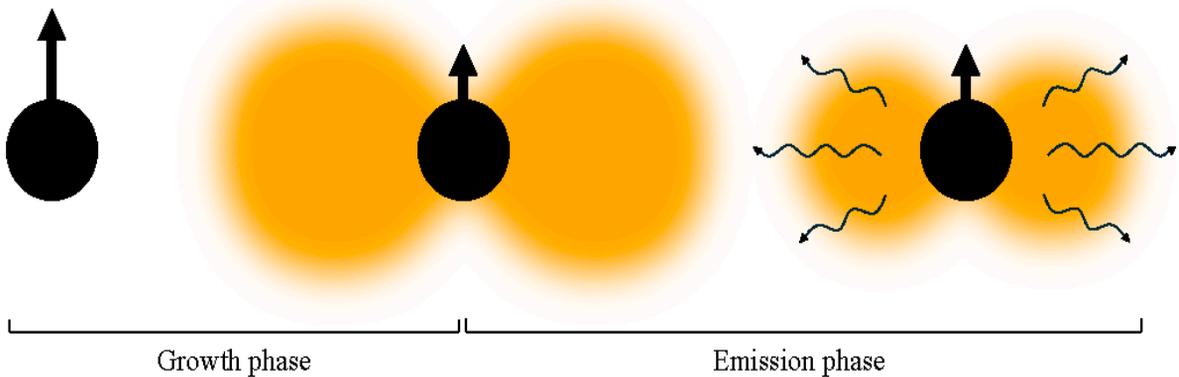


# PODEMOS DETETAR ONDAS GRAVITACIONAIS DE NUVENS DE BOSÕES VETORIAIS ULTRALEVES?

[Ondas Gravitacionais \(OGs\)](#) podem ser usadas para investigar fenômenos exóticos na física de partículas além daqueles conhecidos a partir de experiências com aceleradores na Terra, incluindo os chamados «bosões vetoriais ultraleves». A colaboração [LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#) conduziu as primeiras buscas de ondas gravitacionais de nuvens de bosões vetoriais ultraleves em torno de buracos negros conhecidos. Na ausência de detecção, fomos capazes de descartar a existência de bosões vetoriais com massas  $\sim 1 \times 10^{-13}$  [elettrão-volts](#) [eV].

## O QUE SÃO NUVENS DE BOSÕES ULTRALEVES?

Os [bosões](#) ultraleves são uma classe hipotética de partículas com massas muito pequenas ( $< 10^{-6}$  eV) que são previstas em muitas extensões do [Modelo Padrão da física de partículas](#) e poderiam formar nuvens ao redor de buracos negros em rotação (ver [Figura 1](#)). Como se teoriza que eles interagem muito pouco com o ambiente ao seu redor, são candidatos convincentes à [matéria escura](#). Neste estudo, procuramos especificamente [bosões vetoriais](#), que têm um [número quântico de spin](#)  $s=1$ , e são primos dos bosões escalares ( $s=0$ ) e tensoriais ( $s=2$ ), que também são teorizados.



**Figura 1:** Representação esquemática do crescimento [superradiante](#) e do desvanecimento de uma nuvem de bosões em torno de um buraco negro em rotação. O esquema divide este processo em duas fases distintas: a fase de crescimento (*Growth phase*), durante a qual o buraco negro perde massa-energia para a nuvem de bosões em crescimento, e a fase de emissão de ondas gravitacionais (*Emission phase*), muito mais longa, durante a qual a nuvem de bosões perde energia, irradiando gravitacionalmente.

## COMO AS PROCURAMOS?

A LVK teve como alvo dois tipos de buracos negros, usando dados da primeira parte do quarto período de observação (O4a): os buracos negros remanescentes das fusões binárias [GW230814](#) e [GW231123](#) e o buraco negro galáctico no sistema binário [Cygnus X-1](#). O motivo pelo qual nos interessamos por esses buracos negros específicos é porque têm grandes massas, [spins](#) elevados e/ou estão relativamente próximos, e sabíamos tudo isso com confiança suficiente para permitir a modelação precisa dos sinais OG propostos. Ainda assim, cada fonte tinha as suas próprias vantagens e desvantagens. Em particular, uma vantagem de estudar Cygnus X-1 era o facto de estar muito mais próximo — fica a aproximadamente 7.000 [anos-luz](#) de distância, ainda dentro da nossa própria galáxia — enquanto os remanescentes das fusões ficam a mil milhões de anos-luz de distância, em galáxias distantes. Por outro lado, uma vantagem de visar os remanescentes da fusão era sabermos precisamente quando e como eles nasceram, enquanto o buraco negro em Cygnus X-1 tem uma idade e história muito mais incertas.

Como esses dois tipos de buracos negros têm características muito diferentes, usamos dois métodos diferentes para procurar os seus potenciais sinais de ondas gravitacionais: um método de [modelo oculto de Markov](#) (MOM), adaptado para remanescentes de fusões jovens e isolados, e o método *Binary BSD-VBC*, adaptado para buracos negros antigos em sistemas binários. O MOM é um método de pesquisa flexível, mais adequado para sinais que evoluem rapidamente ou de forma inesperada. Por outro lado, o método BSD funciona melhor para o tipo de fonte cuja frequência de sinal não evolui muito, mas é modulada pelo [efeito de Doppler](#) devido ao movimento binário da fonte.

## O QUE ENCONTRAMOS?

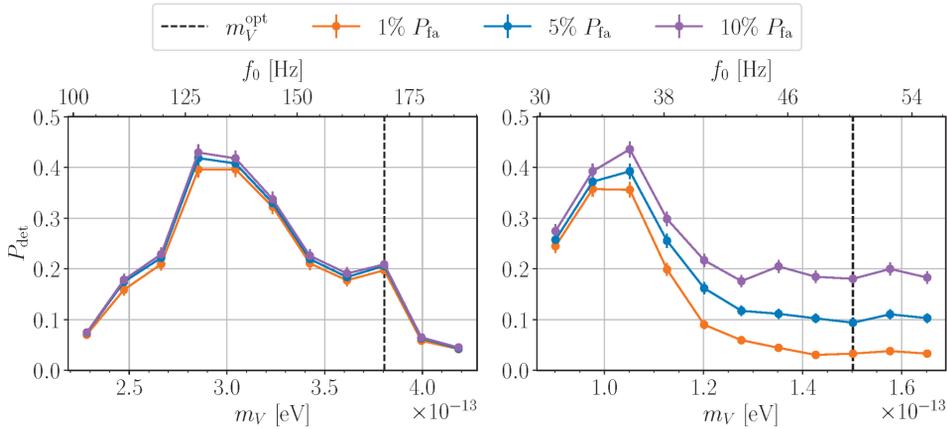
Não foram observados sinais OG provenientes de nuvens de bosões vetoriais nos dados, o que levantou a questão: qual é a probabilidade de existência de bosões vetoriais ultraleves, dado que a LVK não encontrou nada?

## PARA SABER MAIS:

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



Através de uma análise estatística rigorosa, conseguimos responder a essa pergunta... mais ou menos. A **Figura 2** mostra como usamos os resultados da nossa pesquisa focada nos remanescentes da fusão binária para descartar os bósons vetoriais nas faixas de massa  $[0,94; 1,08] \times 10^{-13}$  eV e  $[2,75; 3,28] \times 10^{-13}$  eV, embora a nossa confiança nessa conclusão não seja alta. Por outro lado, espera-se que pesquisas futuras produzam exclusões com maior confiança, à medida que continuamos a atualizar os nossos detetores. A partir da pesquisa direcionada ao buraco negro em Cygnus X-1 (ver **Figura 3**), com base em certas suposições sobre a idade e as condições iniciais do buraco negro, excluímos os bósons vetoriais dentro da faixa  $[0,85; 1,59] \times 10^{-13}$  eV com **95% de confiança**.



**Figura 2:** A confiança estimada ( $P_{\text{det}}$ ) com que podemos descartar a existência de um valor da massa para bósons vetoriais (eixo inferior), dado que as pesquisas que visavam os buracos negros remanescentes de [GW230814](#) (painel esquerdo) e [GW231123](#) (painel direito) não detetaram nada. O eixo superior mostra a frequência correspondente na qual cada massa de bóson emitiria ondas gravitacionais. Para interpretar estes resultados, consideremos a curva laranja que representa uma **probabilidade de falso alarme** ( $P_{\text{fa}}$ ) de 1%; então, podemos dizer que a faixa de massa do bóson com  $P_{\text{det}} > 0,3$  é descartada com 30% de confiança para  $P_{\text{fa}}$  de 1%. Embora esta não seja uma exclusão fiável, observações futuras permitir-nos-ão testar essas faixas de massa do bóson com maior confiança.

## QUAL A IMPORTÂNCIA DISTO?

Só porque não encontramos nada, não significa que os bósons vetoriais ultraleves não existam. O que isto significa é que é menos provável que eles existam com determinadas massas. À medida que consideramos cada vez mais buracos negros, devido à maior sensibilidade dos detetores no futuro, uma de duas coisas acontecerá. Ou detetaremos diretamente um indício de OG produzida por bósons ultraleves, ou, juntamente com outros estudos complementares, reuniremos todas as nossas não detecções até podermos descartar completamente a sua existência. Independentemente do resultado final, este estudo é uma demonstração importante de como os detetores de OG podem ser usados como poderosas sondas de nova física, incluindo, talvez, finalmente desvendar a identidade elusiva da matéria escura.

## GLOSSÁRIO

**Binary BSD-VBC:** Um método de análise que corrige os dados para o desvio de Doppler devido ao movimento orbital da fonte e procura um sinal persistente em mapas de tempo-frequência construídos a partir de [transformadas de Fourier](#) curtas usando uma abordagem semelhante à [transformada de Hough](#).

**Cygnus X-1:** Um sistema binário de raios X de massa elevada localizado a cerca de 7000 anos-luz de distância, na constelação de Cygnus. Contém o primeiro buraco negro já descoberto, que está preso numa órbita mútua com uma estrela variável supergigante azul.

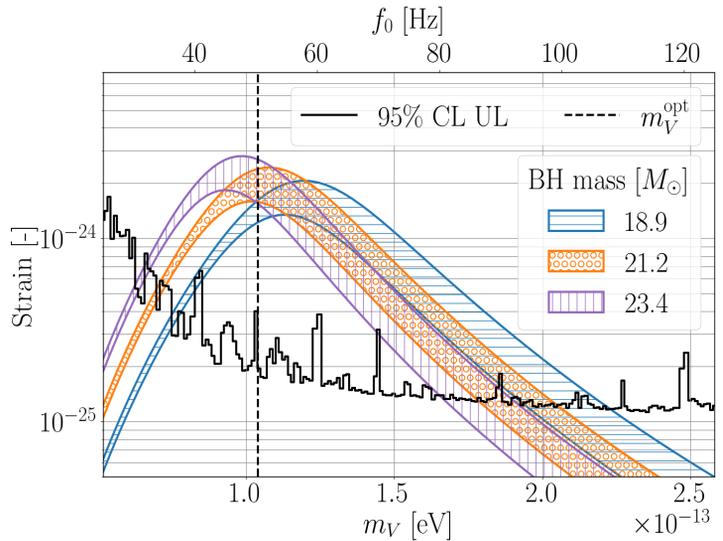
**Eletro-volt:** Unidade de energia comumente usada em física atômica e de partículas, em que 1 eletro-volt (abreviado eV) é igual a cerca de  $1,6 \times 10^{-19}$  Joules.

**GW230814:** Um evento de ondas gravitacionais detetado pela LVK a 14 de agosto de 2023 com uma [relação sinal-ruído](#) muito alta. É o resultado da fusão de um sistema binário de buracos negros com massas semelhantes às do [GW150914](#). Foi observado apenas pelo detetor [LIGO Livingston](#).

**GW231123:** Um evento de ondas gravitacionais detetado pela LVK a 23 de novembro de 2023. É o resultado da maior fusão de buracos negros binários detetada até agora, com um buraco negro remanescente de aproximadamente 220 massas solares. Um ou ambos os seus buracos negros progenitores podem ter estado no [hiato de massa superior](#), uma região da faixa da massa de buracos negros que é desfavorecida pelos modelos de evolução estelar.

**Spin:** Momento angular de um buraco negro em rotação; uma das propriedades definidoras dos buracos negros, juntamente com a massa e a carga.

**Deformação:** A variação fracionária na distância entre dois pontos de referência devido à deformação do espaço-tempo por uma onda gravitacional que passa. A deformação típica mesmo das ondas gravitacionais mais fortes que atingem a Terra é muito pequena — normalmente inferior a  $10^{-21}$ .



**Figura 3:** Limites superiores (curva preta) na amplitude de **deformação** das ondas gravitacionais emitidas por uma nuvem de bósons vetoriais em torno de Cygnus X-1. Isso é mostrado como uma função da massa do bóson (eixo inferior) e da frequência (eixo superior) para um nível de confiança de 95%, dado que nenhuma detecção foi feita. As regiões sombreadas indicam as amplitudes de distorção previstas para este sistema. Para interpretar estes resultados, basta observar onde a curva preta fica abaixo das curvas sombreadas; esta é a região da faixa de massa do bóson onde um sinal seria detetável, mas não foi detetado e, portanto, podemos descartar a existência de um bóson nesta faixa de massa com 95% de confiança.

## PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web:

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

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

Os dados relativos ao mais recente catálogo da LVK GWTC-4.0 estão disponíveis [aqui](#).

Lê este [sumário científico](#) sobre as nossas pesquisas anteriores (O3) sobre nuvens de bósons escalares em torno dos buracos negros em rotação.

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