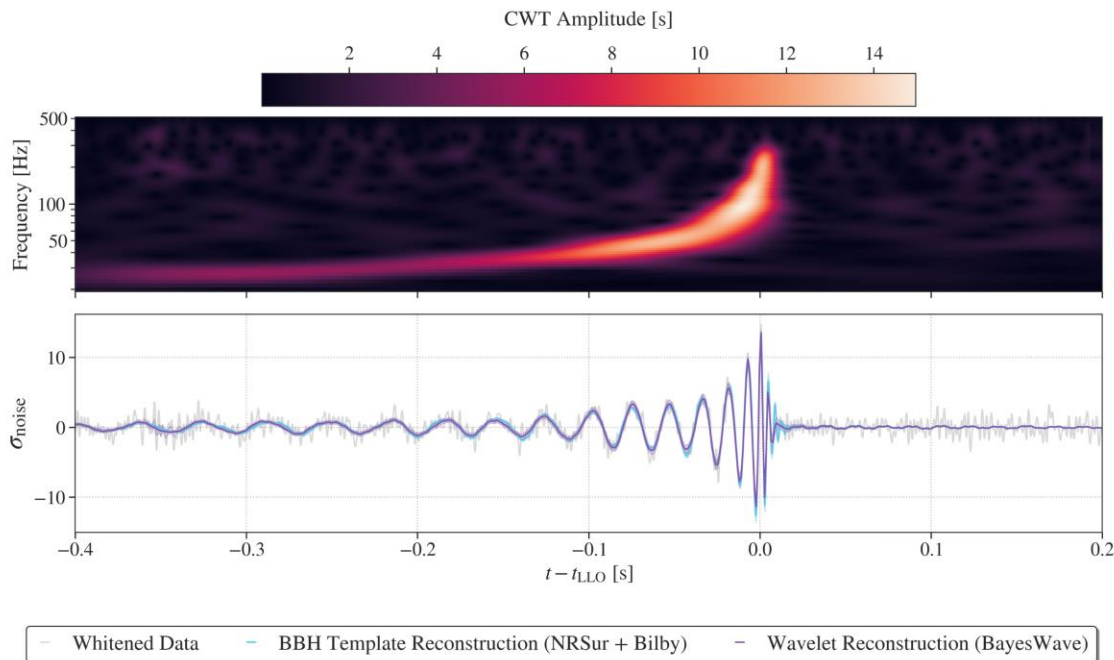


# GW230814: UM FORTE SINAL DE ONDA GRAVITACIONAL DETECTADO POR LIGO LIVINGSTON

As colaborações [LIGO-Virgo-KAGRA](#) observaram um sinal de [onda gravitacional](#) particularmente alto com o detector [LIGO Livingston](#). O evento GW230814 foi detectado em 14 de agosto de 2023 às 23:09:01 UTC. O sinal de onda gravitacional é provavelmente originado da [fusão de dois buracos negros](#).

## DETECÇÃO DO SINAL

GW230814 foi observado durante a primeira parte da quarta [corrida observacional](#) (O4a). No momento da detecção, apenas o detector [Advanced LIGO Livingston](#) estava em operação. Apesar de ter sido observado por um único detector, o sinal se mostrou excepcionalmente alto. A **Figura 1** mostra diferentes representações do sinal GW230814.



**Figure 1:** O sinal de onda gravitacional GW230814. O gráfico do topo mostra a [representação do tempo-frequência](#) do sinal onde regiões mais brilhantes indicam maior amplitude. O método usado para construir essa representação é a Transformada Wavelet Contínua (CWT). O gráfico inferior mostra o sinal representado como uma [série temporal](#). As linhas azul e roxa mostram dois diferentes métodos para a reconstrução do sinal da onda. Está claro que o sinal corresponde à coalescência de um sistema binário compacto, e os dados concordam bem com as reconstruções até a fase de relaxamento (ringdown).

## O QUE SIGNIFICA “FORTE”?

Qualquer dado de observação de ondas gravitacionais contém uma mistura de sinais (proveniente do cosmos) e ruído (decorrente do detector e do ambiente). Medimos a intensidade de um sinal de onda gravitacional usando a [razão sinal-ruído](#) (SNR). Esse número descreve o quão alto é o sinal em comparação ao ruído presente nos dados. Para GW230814 o SNR de um único detector foi cerca de 42. Para uma comparação, a primeira detecção de onda gravitacional, [GW150914](#), também foi considerada alta, com o SNR de 24.

## A FUSÃO DE BURACOS NEGROS QUE PRODUZIU O GW230814

O GW230814 é consistente com um sinal proveniente da fusão de um [sistema binário de buracos negros](#). Para determinar melhor as propriedades desse sistema binário que produziu o sinal — como as massas e [spins](#) dos buracos negros — nós comparamos os dados com sinais simulados baseados na Teoria da [Relatividade Geral](#) (RG) de Einstein. A partir disso, os resultados indicam que GW230814 provavelmente veio da fusão de dois buracos negros com massas de 34 e 28 vezes a massa do Sol — muito semelhantes às do primeiro evento detectado, [GW150914](#).

Esse evento cósmico ocorreu a cerca de 300 [megaparsecs](#) da Terra — aproximadamente 1 bilhão de anos-luz de distância. Porém, como o sinal foi detectado por apenas um detector, não é possível determinar sua posição exata no céu, a menos que o sinal dure muito tempo. Normalmente, é necessário que três ou mais detectores registrem o mesmo sinal para localizar com precisão uma fonte de curta duração como o GW230814 — algo que ocorreu, por exemplo, com o evento [GW170817](#) cerca de 8 anos antes.

## UM SINAL INTRIGANTE: COLOCANDO A RELATIVIDADE GERAL À PROVA

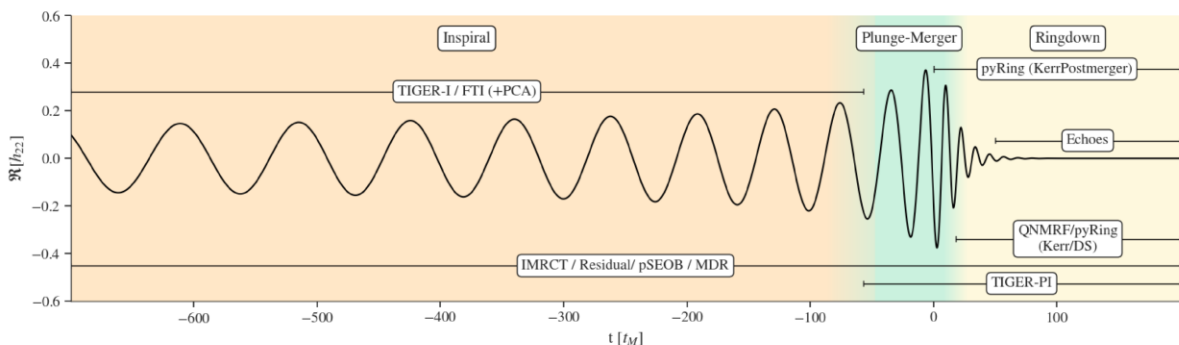
Os sinais de ondas gravitacionais permitem testar a teoria da Relatividade Geral (RG) de Einstein. As colaborações LIGO-Virgo-KAGRA aplicam uma série de testes para verificar se um determinado sinal é consistente com as previsões da RG. Você deve estar se perguntando: por que nós ainda continuamos testando a teoria, se ela já foi confirmada inúmeras vezes no último século? Assim como qualquer teoria física, a RG pode ser apenas uma aproximação de uma teoria mais completa, ainda desconhecida. Foi exatamente isso que aconteceu há cem anos, quando a RG aperfeiçoou a [teoria gravitacional de Newton](#). Explicando fenômenos que as leis de Newton não conseguiam.

Nos testes da RG com ondas gravitacionais, geralmente são usados sinais fortes observados por dois ou mais detectores. No entanto, por ser particularmente intenso, o GW230814 tornou-se um caso interessante mesmo tendo sido visto por apenas um.

Para entender por que ele é especial, precisamos considerar as três etapas que compõem o sinal de uma fusão de buracos negros.

Os sinais gravitacionais provenientes da fusão de sistemas binários compactos são compostos por três estágios principais, ilustrados na **Figura 2**:

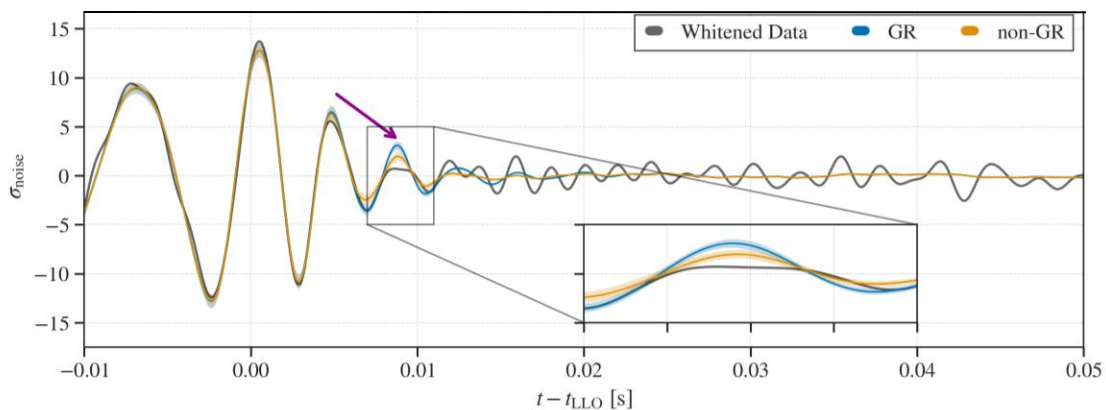
- [A espiral](#) é o momento em que os dois buracos negros orbitam cada vez mais próximos, com a [frequência e amplitude](#) das ondas gravitacionais aumentando gradualmente.
- [A fusão](#) é a fase em que os buracos negros efetivamente se fundem, momento em que a amplitude do sinal é máxima.
- [O relaxamento](#) ocorre após a fusão, quando o buraco negro recém-formado se estabiliza, emitindo ondas gravitacionais com amplitude cada vez menor — como o som de um sino que continua vibrando após ser golpeado, até silenciar.



**Figura 2:** A evolução típica de um sinal de onda gravitacional a partir de um sistema binário compacto em fusão. Este gráfico ilustrativo mostra a amplitude do sinal (eixo vertical) em função do tempo (eixo horizontal). As diferentes fases do sinal são a espiral (laranja), a fusão (verde-claro) e o relaxamento (amarelo). Também são mostrados os nomes técnicos dos diferentes testes de relatividade geral realizados e as partes do sinal que eles consideram — veja o [artigo científico](#) para mais detalhes.

Os testes da Relatividade Geral realizados pelas colaborações LIGO-Virgo-KAGRA analisam diferentes partes do sinal. Os testes que se concentram na fase espiral (espiralamento) do GW230814 mostram que o sinal está de acordo com as previsões da Relatividade Geral (RG). Entretanto, os testes que examinam as fases de fusão e relaxamento (plunge-merger-ringdown) apresentam um resultado intrigante. O relaxamento do GW230814 desaparece mais rapidamente do que seria esperado segundo a RG. Isso é mostrado na **Figura 3**, o pico de amplitude logo após a fusão é menor do que o previsto pelos modelos relativísticos.

O que causa essa diferença entre os dados e a previsão da RG? Diversas vias de investigação foram exploradas. Uma linha de investigação analisou se os modos de redução de tom subdominantes poderiam ser a causa. Os modos de redução de tom subdominantes em um sinal de onda gravitacional são semelhantes aos [harmônicos](#) superiores em ondas sonoras. Outra investigação analisou se o sinal da onda gravitacional poderia ter sido afetado por [lentes gravitacionais](#). No entanto, as evidências não são convincentes para nenhuma dessas explicações.



**Figura 3:** Comparação dos dados do GW230814 (mostrados em cinza) com formas de onda reconstruídas correspondentes a um modelo de RG (azul) e a um modelo não-RG (laranja). A seta roxa destaca a parte do sinal (mostrada ampliada no quadro de inserção) onde a amplitude observada dos dados é menor do que a esperada para RG. Nota-se que o eixo horizontal cobre apenas seis centésimos de segundo (com tempo = 0 correspondendo à fase de mergulho-fusão): os estudos de ondas gravitacionais realmente entraram na era da precisão!

*Crédito da imagem: Rossella Gamba/Koustav Chandra/LIGO-Virgo-KAGRA.*

Uma terceira possibilidade é que a aparente inconsistência possa ser devida a limitações na precisão dos nossos [modelos de forma de onda gravitacional](#), em vez de um desvio real da RG. Um sinal forte como o GW230814 tem maior probabilidade de revelar tais imprecisões à medida que mais detalhes da onda gravitacional se tornam visíveis. Nossos testes indicam que as limitações na precisão da forma de onda podem, de fato, ser uma explicação confiável para a aparente inconsistência.

Outra possível explicação é que a inconsistência se deve a flutuações aleatórias de [ruído](#) nos dados. Uma variação de ruído que ocorra no mesmo instante da fase de relaxamento (ringdown) da onda gravitacional pode fazer com que o sinal apenas pareça inconsistente com a Relatividade Geral (RG). Para testar essa hipótese, realizamos vários testes, de modo semelhante a como se verifica se um dado é viciado, jogando-o muitas vezes. Como não podemos fundir buracos negros sob demanda, utilizamos simulações computacionais dessas fusões, baseadas na RG, para gerar as ondas gravitacionais esperadas. Dessa forma, é possível criar diversos sinais simulados semelhantes ao GW230814 e adicionar a eles ruído realista, porém aleatoriamente variável. Em seguida, os testes da RG são repetidos com cada sinal simulado. Os resultados indicam que também é possível que uma flutuação aleatória de ruído seja a causa da aparente inconsistência observada em relação à teoria da Relatividade Geral.

## A IMPORTÂNCIA DE UMA REDE DE DETECTORES

Observatórios de ondas gravitacionais funcionam melhor como uma rede de detectores. Um sinal de onda gravitacional detectado por vários detectores independentes permite a verificação do sinal, uma melhor estimativa das propriedades da fonte e a localização da origem do sinal no céu.

O caso do GW230814 destaca a importância de uma rede de detectores (assim como foi o caso de outra fusão binária de buracos negros, [GW170814](#), que foi detectado exatamente seis anos antes e foi o primeiro sinal observado por três interferômetros). Ter dados de apenas um detector restringe o conjunto de medições possíveis que podem ser feitas e limita fortemente sua precisão. Embora os cientistas estejam trabalhando arduamente para atingir o objetivo de uma rede global de detectores, não podemos esperar que todas as partes dela estejam funcionando 24 horas por dia, 7 dias por semana. Portanto, quanto maior a rede, melhor! Atualmente (2025), a rede LIGO-Virgo-KAGRA inclui quatro detectores: dois do LIGO localizados nos EUA, o instrumento europeu Virgo na Itália e o KAGRA no Japão. As três colaborações operam a rede globalmente, para maximizar os resultados científicos da busca por ondas gravitacionais.

## UM FUTURO BRILHANTE (E ALTO)

À medida que as Colaborações LIGO-Virgo-KAGRA completam 10 anos desde a [primeira detecção direta de ondas gravitacionais](#), podemos antecipar muitos outros sinais intensos à medida que a sensibilidade da nossa rede de detectores continua a melhorar. Tais eventos proporcionarão novas oportunidades para explorar as propriedades dos buracos negros, além de continuar a testar a Relatividade Geral de Einstein.

### GLOSSÁRIO

**Buraco Negro:** Uma região do espaço-tempo com gravidade tão intensa que impede qualquer coisa, incluindo a luz, de escapar. Os buracos negros têm tamanhos diferentes: os buracos negros de massa estelar se originam do colapso estelar e suas massas variam de algumas massas solares a cerca de 65 massas solares. Os buracos negros de massa intermediária variam em massa de cerca de 100 massas solares a  $10^5$  massas solares. Por fim, os buracos negros supermassivos variam de mais de  $10^5$  massas solares a mais de  $10^9$  massas solares.

**Binário de buracos negros:** sistema de dois buracos negros orbitando um ao redor do outro

**Relatividade Geral:** teoria da gravitação proposta por Albert Einstein em 1915, segundo a qual o espaço e o tempo formam um tecido curvado pela presença de massa e energia, e os corpos se movem seguindo essa curvatura.

**Ondas gravitacionais:** ondulações no espaço-tempo geradas por eventos extremamente energéticos, como fusões de buracos negros ou estrelas de nêutrons.

**Espiral:** fase inicial de uma fusão binária, na qual os corpos perdem energia ao emitir ondas gravitacionais e se aproximam gradualmente.

**Ruído:** flutuações indesejadas nos dados causadas por efeitos instrumentais ou ambientais. O ruído limita a sensibilidade dos detectores.

**Relaxamento:** fase final da fusão, quando o buraco negro formado emite ondas que dissipam suas deformações até atingir o equilíbrio.

**Razão sinal-ruído (SNR):** medida que compara a intensidade do sinal desejado com o nível de ruído de fundo.

**Massa Solar ( $M_{\odot}$ ):** unidade de medida igual à massa do Sol  $2 \times 10^{30}$  kg.

## SAIBA MAIS:

Visite nossos websites:

[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/)



Leia uma pré-publicação gratuita do artigo científico completa [aqui](#) ou no [ArXiv](#).

Dados do Centro de Ciência Aberta de Ondas Gravitacionais (GWOSC) para o evento GW230814 disponíveis [aqui](#).

Dados do GWOSC para o catálogo GWTC-4.0 disponíveis [aqui](#).

Traduzido para o português por Cássius de Melo e Christian Bruziques.