

# ESPECTROSCOPIA DE BURACOS NEGROS E TESTES DA RELATIVIDADE GERAL COM GW250114

## A DETEÇÃO DO SINAL GW250114

A 14 de janeiro de 2025, a colaboração [LIGO-Virgo-KAGRA](#) observou um sinal de [onda gravitacional](#) excepcionalmente forte, denominado GW250114. O sinal foi registado pelos detetores LIGO em Hanford, Washington, e Livingston, Louisiana, durante o segundo segmento do quarto [período de observação](#) LIGO-Virgo-KAGRA (O4b).

O GW250114 destaca-se como o sinal de onda gravitacional mais nítido observado até agora, cerca de três vezes mais alto do que a [primeira deteção](#) em 2015. Aqui, “mais alto” refere-se à sua maior [relação sinal-ruído](#), uma medida da elevação das ondas gravitacionais face ao [ruído](#) de fundo dos detetores. O sinal corresponde ao esperado quando [dois buracos negros](#) de massa quase igual e de baixo [spin](#) espiralam, colidem e se fundem num único buraco negro maior.

Outro artigo publicado recentemente na *Physical Review Letters* [relata a deteção do GW250114](#), apresentando as propriedades dos buracos negros e um conjunto de testes de física fundamental. Este artigo serve como um estudo complementar, com foco na *espectroscopia de buracos negros* e testes de precisão da relatividade geral.

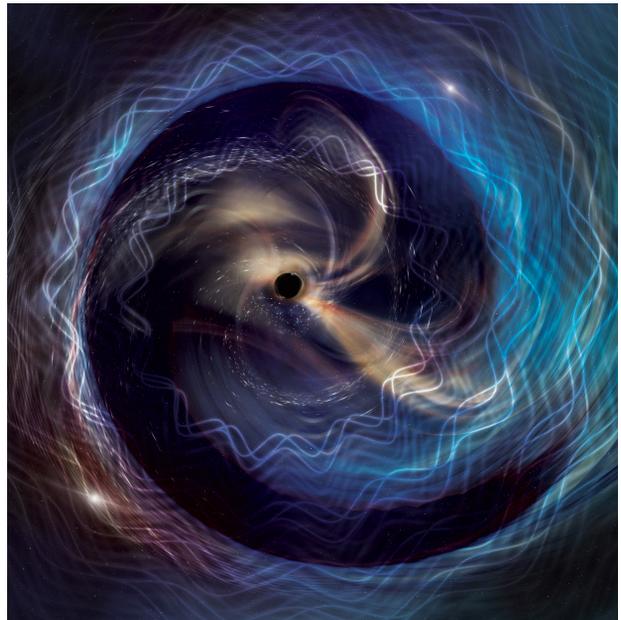
## TESTAR A TEORIA DE EINSTEIN COM GW250114

Devido à sua intensidade excepcional, o GW250114 oferece uma oportunidade única para testar se a teoria da [relatividade geral](#) de Albert Einstein se verifica nas condições mais extremas conhecidas: os campos gravitacionais intensos e em rápida evolução próximos de buracos negros em fusão. O objetivo destes testes é verificar se o sinal de ondas gravitacionais observado é totalmente consistente com as previsões de Einstein ou se algum desvio pode sugerir uma nova física além da relatividade geral.

Uma das principais ferramentas para isso é chamada de *espectroscopia de buracos negros*. Esta técnica foca-se no [relaxamento](#) — a fase logo após a fusão, quando o buraco negro recém-formado se está a estabilizar —, estudando os tons distintos que ele emite. Muito parecido com um sino a tocar que emite tons distintos, um buraco negro recém-formado emite ondas gravitacionais num conjunto de [modos quasinormais](#) característicos.

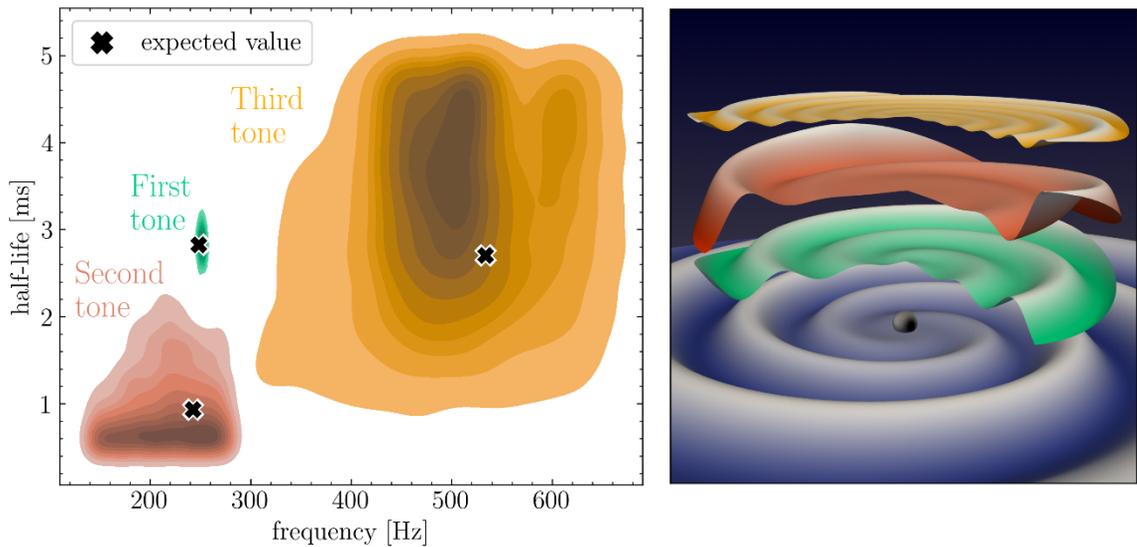
De acordo com o [teorema da ausência de cabelo](#), um buraco negro em relatividade geral é completamente descrito pela sua massa, spin e carga eletromagnética. Em ambientes astrofísicos, no entanto, espera-se que qualquer carga significativa seja neutralizada muito rapidamente, deixando a massa e a rotação como as únicas quantidades relevantes. Isto significa que as frequências dos modos quasinormais e a rapidez com que cada um se desvanece são fixadas exclusivamente por esses dois números.

Detetar múltiplos tons do relaxamento e verificar se são consistentes com as frequências e tempos de decaimento esperados fornece um teste poderoso da relatividade geral. Tais medições não apenas investigam o teorema da ausência de cabelo, mas também permitem procurar desvios genéricos das previsões de Einstein, sejam eles decorrentes de características exóticas dos buracos negros ou de modificações mais fundamentais na teoria da gravidade.



**Figura 1.** Visualização do buraco negro pós-fusão GW250114, mostrando uma representação artística das ondas gravitacionais produzidas durante a fase de relaxamento: à medida que o buraco negro recém-formado se estabiliza, emite ondas gravitacionais num conjunto de frequências específicas, como os tons distintos de um sino a tocar. [Crédito da imagem: LIGO Scientific Collaboration/Sonoma State University/A. Simmonet]

Na relatividade geral, a única solução que descreve um buraco negro astrofísico em rotação é a [métrica de Kerr](#). As nossas medições espectroscópicas testam, portanto, se o remanescente formado em GW250114 é consistente com um buraco negro de Kerr e, dentro da precisão atual, se as suas propriedades realmente se alinham com essa expectativa.



**Figura 2.** *Painel esquerdo:* Frequência e tempo de decaimento (meia-vida) dos diferentes tons de relaxamento identificados ou limitados por GW250114. As regiões coloridas mostram os resultados das análises que permitem que as frequências do modo quasinormal e os tempos de decaimento variem livremente. A região vermelha corresponde ao harmónico detetado na análise apenas da fase de relaxamento (segundo tom), enquanto as regiões verde e amarela correspondem ao tom fundamental (primeiro tom) e ao tom secundário de frequência mais alta (terceiro tom) obtidos a partir da análise do sinal completo. Os marcadores pretos indicam os valores previstos para um buraco negro de Kerr com a massa e o spin inferidos a partir da análise do sinal completo, assumindo a relatividade geral. O sombreado denota regiões de probabilidade, de 90% (mais claro) a 10% (mais escuro). *Painel direito:* Decomposição do sinal de onda gravitacional (espiral inferior, em azul) emitido pelo buraco negro remanescente (esfera inferior) em diferentes tons, para uma simulação numérica que corresponde aos parâmetros medidos do GW250114. As superfícies verde, vermelha e amarela correspondem ao primeiro (fundamental), segundo (harmónico) e terceiro tons, respetivamente.

## OUVIR O SOM DO RELAXAMENTO: TOM FUNDAMENTAL, HARMÓNICO E UM TOM SECUNDÁRIO DE FREQUÊNCIA MAIS ALTA

Usando análises que se concentram exclusivamente na parte do sinal após a fusão, a fase de relaxamento, procuramos esses tons sem usar nenhuma informação da [espiral](#) anterior. Descobrimos que os dados favorecem uma descrição com o tom fundamental principal e o seu primeiro harmónico, que é uma versão mais rápida da mesma vibração. O primeiro harmónico pode ser rastreado por cerca de três milissegundos após a fusão, após o que não pode mais ser resolvido acima do ruído do detetor. A sua amplitude e fase medidas concordam com simulações com [relatividade numérica](#) detalhadas de fusões de buracos negros em relatividade geral. As frequências e os tempos de decaimento dos tons são consistentes com as previsões teóricas dentro das incertezas de medição. A medição do harmónico é mostrada na **Figura 2** (sombreado vermelho), ao lado do marcador preto que indica o valor esperado para um buraco negro de Kerr com a massa e o spin estimados a partir de uma análise de sinal completo sob a suposição da relatividade geral.

Também analisamos o sinal completo – incluindo a espiral, a fusão e o relaxamento – com modelos calibrados para simulações numéricas, mas permitindo que as frequências e os tempos de decaimento dos tons variem livremente, em vez de fixá-los de acordo com a previsão de Kerr. Ao incorporar informações de todo o sinal, podemos medir as propriedades do relaxamento com ainda mais precisão. Com este método, a frequência do tom fundamental é medida com uma precisão de cerca de dois por cento e o seu tempo de decaimento com cerca de nove por cento, ambos em excelente concordância com a relatividade geral. Esta análise também fornece as primeiras restrições a um tom secundário de frequência mais alta, que soa a aproximadamente duas vezes a frequência do fundamental, mais uma vez correspondendo às previsões teóricas. Ambos os resultados são mostrados na Fig. 2, onde os tons fundamental e secundário aparecem em verde e amarelo, respetivamente.

Juntas, as análises apenas do relaxamento e do sinal completo oferecem testes complementares, confirmando que as propriedades do remanescente são consistentes com as esperadas para um buraco negro de Kerr quando medidas de diferentes maneiras.

### PARA SABER MAIS:

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

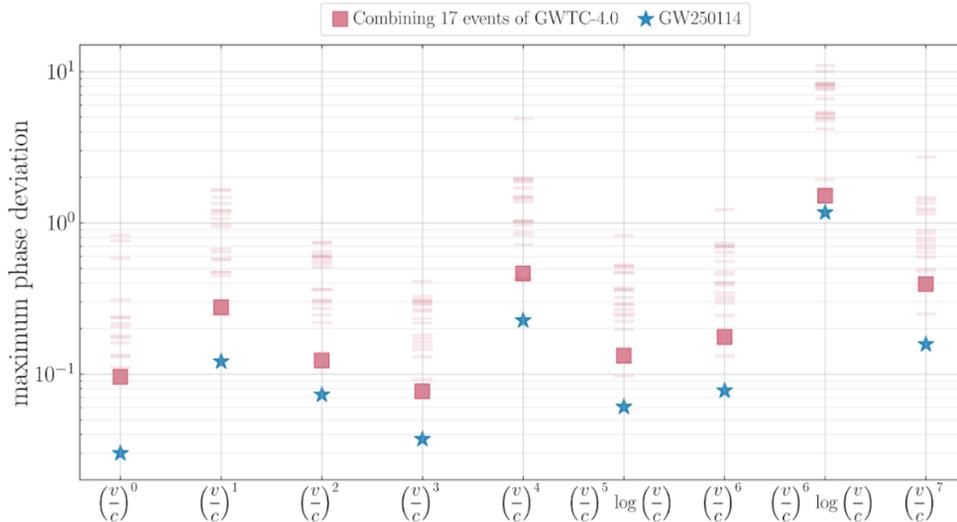


## CONCORDÂNCIA EM TODO O SINAL ESPIRAL-FUSÃO-RELAXAMENTO

Também testamos as previsões da relatividade geral para outras partes do sinal, além do relaxamento. Na fase inicial da [espiral](#), em que os buracos negros se orbitam um ao outro mais lentamente do que na fusão final, não encontramos evidências de desvios das previsões de Einstein. Também comparamos a massa e o spin do buraco negro final estimados a partir da parte inicial do sinal com os valores inferidos a partir da parte posterior da fusão e do relaxamento, encontrando novamente concordância.

Notavelmente, a intensidade do GW250114 permite-nos impor restrições a possíveis desvios da relatividade geral que não só são comparáveis, mas, em alguns casos, duas a três vezes mais rigorosas do que as obtidas pela combinação de informações de dezenas de sinais no mais recente [quarto Catálogo de Transientes de Ondas Gravitacionais](#) (GWTC-4.0), que inclui sinais até ao primeiro segmento do quarto período de observação LIGO-Virgo-KAGRA (O4a). Algumas dessas melhorias são ilustradas na **Figura 3**.

Por fim, verificamos se subtrair dos dados a melhor forma de onda possível da relatividade geral deixa algum padrão inexplicável. Isso não acontece, e o sinal restante comporta-se como um ruído comum do detetor.



**Figura 3.** Limites superiores de 90% medidos para possíveis desvios da relatividade geral na [expansão pós-Newtoniana](#) da fase de espiral do sinal de ondas gravitacionais. O modelo pós-Newtoniano descreve a fase de espiral como uma série em potências da velocidade orbital do binário  $(v/c)$ , onde  $c$  é a velocidade da luz, com cada coeficiente previsto exclusivamente pela relatividade geral. Para o termo  $(v/c)^1$ , a relatividade geral prevê que o coeficiente seja exatamente zero, portanto, o limite corresponde a um desvio absoluto; para todas as outras ordens, os limites representam desvios fracionários. As estrelas azuis mostram as restrições medidas a partir do GW250114. Para comparação, as faixas vermelhas claras marcam os resultados de sinais GWTC-4.0 individuais, e os quadrados vermelhos indicam restrições combinadas do catálogo de 17 eventos. Em todas as ordens pós-Newtonianas, as medições do GW250114 estabelecem limites superiores que são duas a três vezes mais rigorosas do que aqueles obtidos pela combinação de vários eventos.

## EINSTEIN MANTÉM-SE FIRME

Em todos os testes, o GW250114 corresponde às expectativas da relatividade geral, dentro da precisão das observações atuais. A intensidade e nitidez deste sinal faz dele a confirmação mais precisa até agora da teoria de Einstein para fusões de buracos negros, restringindo significativamente os limites de quanto qualquer teoria alternativa da gravidade poderia diferir dela. Juntamente com o [artigo sobre a detecção](#), que testa a [lei da área de Hawking](#) e fornece resultados complementares sobre a natureza do remanescente como um buraco negro de Kerr, este estudo ilustra a amplitude da ciência desbloqueada pelo GW250114.

Enquanto a colaboração LIGO-Virgo-KAGRA celebra uma década desde a primeira detecção de ondas gravitacionais provenientes da fusão de buracos negros, melhorias dramáticas na sensibilidade do detetor permitem-nos agora registrar sinais como o GW250114 com nitidez sem precedentes. Cada novo avanço promete sinais ainda mais fortes no futuro. O GW250114 é, portanto, uma antevisão da ciência transformadora que as próximas observações permitirão: detecções mais fortes revelarão as propriedades dos buracos negros com mais detalhes e levarão a teoria de Einstein aos seus limites finais.

## 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 do artigo científico [aqui](#).

Lê uma pré-impressão do artigo sobre a detecção do GW250114 [aqui](#).

Divulgação dos dados do GW250114 pelo Gravitational-Wave Open Science Center (GWOSC) [aqui](#).

Os dados relativos ao GWTC-4.0 foram publicados pelo GWOSC [aqui](#).

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