

TESTES À RELATIVIDADE GERAL COM AS MAIS RECENTES E INTENSAS OBSERVAÇÕES DE FUSÕES DE SISTEMAS BINÁRIOS DE OBJETOS COMPACTOS

Em julho de 2026, a [colaboração LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#) publicou os seus resultados mais recentes sobre os testes à [Relatividade Geral](#) usando sinais de [ondas gravitacionais](#) (OGs) provenientes da fusão de objetos compactos, tais como [estrelas de nêutrons](#) e [buracos negros](#). Ao combinar 77 novos sinais de elevada significância provenientes do quarto período de observação, 72 da sua segunda parte (O4b) e 5 da primeira (O4a), com 91 eventos testados anteriormente, este constitui o maior e melhor conjunto de dados usado para testar a teoria de Einstein. Em todos os testes realizados, a Relatividade Geral volta a ser validada, e os limites para possíveis desvios são agora significativamente mais estritos do que anteriormente.

(visite o nosso glossário para as definições de alguns dos termos técnicos neste resumo: <https://ligo.org/glossary/>)

A teoria da Relatividade Geral de Einstein é a teoria da gravitação aceite atualmente. Nos 111 anos desde que Einstein a propôs, a teoria tem sido rigorosamente testada de diversas formas, passando sempre com distinção. No entanto, permanece sob escrutínio constante: qualquer desvio observado, por menor que seja, poderá fornecer pistas para uma nova física para além da teoria de Einstein, tal como uma [teoria quântica da gravidade](#) ou a natureza da [energia escura](#). As OGs são uma previsão direta da Relatividade Geral, confirmada pela [primeira observação direta da fusão de dois buracos negros em setembro de 2015](#). As observações da [aproximação em espiral](#) e fusão de buracos negros de massa estelar oferecem uma oportunidade única para verificar se a Relatividade Geral se mantém válida em condições onde a gravidade é mais intensa e varia mais rapidamente.

Ao longo da última década, a colaboração LVK tem utilizado rotineiramente observações de OGs para testar a Relatividade Geral. Estes testes confirmaram que quaisquer desvios à Relatividade Geral, se existirem, terão de ser extremamente pequenos, abaixo da capacidade de medição dos detetores. À medida que mais eventos de OGs são observados, os nossos testes tornam-se cada vez mais rigorosos. Apresentamos agora os resultados de 72 novos sinais de elevada significância provenientes da fusão de buracos negros na segunda parte do mais recente [período de observação](#) (O4b), além de 5 sinais adicionais da primeira parte (O4a) que ainda não tinham sido analisados. Somado aos 91 eventos testados em observações anteriores, este constitui o maior conjunto de dados alguma vez utilizado para testar a Relatividade Geral. Este conjunto de dados é também de uma qualidade excecional: inclui um número sem precedentes de sinais observados com uma [relação sinal-ruído](#) notável, cujas formas de onda claras tornam possíveis novos testes e refinam os já existentes. O evento de maior destaque é o [GW250114](#), o sinal de OG mais intenso alguma vez observado. Em todos os testes realizados, a Relatividade Geral volta a ser validada, e os limites para possíveis desvios são agora significativamente mais estritos. (Vê o [resumo científico](#) anterior para os resultados dos testes baseados em dados até O4a).

Como testamos a Relatividade Geral? A teoria de Einstein fornece um modelo bem estabelecido para descrever a gravitação e, nas últimas décadas, registaram-se grandes progressos na modelação precisa de OGs provenientes de fusões de sistemas binários de objetos compactos. Os testes à Relatividade Geral baseiam-se em: (i) avaliar a consistência interna da teoria ao longo das diferentes fases da coalescência (vê a Figura 1), ou (ii) procurar "distorções" específicas nos sinais de OGs motivadas por violações plausíveis da Relatividade Geral.

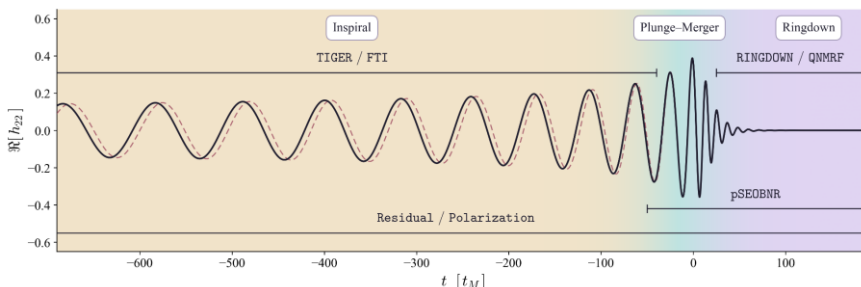


Figura 1: Esquema de um sinal de OG proveniente da fusão de um sistema binário de buracos negros. O eixo horizontal representa o tempo e o eixo vertical acompanha a oscilação da onda. O sinal está dividido em três regiões (da esquerda para a direita: aproximação em espiral, fusão e amortecimento), cada uma delas analisada por um conjunto diferente de testes à Relatividade Geral. As linhas de delimitação indicam os nomes dos testes e a parte do sinal que cada um analisa. Um sinal hipotético que se desvia da previsão da Relatividade Geral é sobreposto como uma linha tracejada.

PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Possíveis desvios à Relatividade Geral poderiam surgir durante a geração de OGs, durante a sua propagação, ou pelo facto de os objetos em fusão não serem os buracos negros descritos pela Relatividade Geral. No entanto, estes testes devem ser interpretados com cuidado: as flutuações no ruído instrumental, bem como as limitações na precisão dos modelos de sinal utilizados na análise, podem imitar desvios aparentes à Relatividade Geral e têm de ser cuidadosamente distinguidas de efeitos físicos genuínos.

UMA MULTIPLICIDADE DE TESTES

O grande número e a elevada qualidade das observações de OGs disponíveis permitem aos cientistas da LVK realizar uma grande variedade de testes à Relatividade Geral.

A verificação mais geral consiste em confirmar a consistência global dos sinais de OGs observados com as previsões da Relatividade Geral. Isto pode ser feito subtraindo aos dados o sinal previsto pela Relatividade Geral que melhor se ajusta e analisando a diferença, a que chamamos resíduo, comparando-o com o ruído instrumental esperado. Uma vez que as observações que consideramos são efetuadas com pelo menos dois e, por vezes, três detetores, a consistência dos resíduos entre os vários detetores (tendo em conta o tempo de viagem da luz entre os locais) fornece uma verificação adicional: um sinal de OG genuíno deve aparecer como uma componente correlacionada entre os detetores, ao passo que o ruído instrumental em cada detetor não é correlacionado.

Uma segunda classe de testes examina o conteúdo de polarização do sinal. Semelhante às ondas de luz, as OGs na Relatividade Geral têm apenas duas [polarizações](#), chamadas “+” e “x”. No entanto, teorias alternativas da gravitação podem ter até seis modos de polarização independentes. Os testes de polarização verificam se os dados são consistentes apenas com os dois modos previstos pela Relatividade Geral, ou se o campo gravitacional oscila de uma forma mais geral. A presença de modos de polarização adicionais pode ser testada recorrendo a observações de múltiplos detetores. (Vê a Fig. 5 [deste resumo](#) para saber mais.)

Outros testes focam-se diretamente em determinar se a evolução dos sistemas binários de buracos negros, bem como a emissão e propagação das OGs, se desviam das previsões de Einstein. Os testes de *propagação* avaliam se as ondas chegam aos nossos detetores inalteradas após a sua longa viagem pelo universo. Por exemplo, a Relatividade Geral prevê que as OGs viajam à [velocidade da luz](#) e interagem de forma muito fraca com a matéria. Em contrapartida, algumas teorias alternativas da gravitação (como as que envolvem um [gravitão massivo](#) ou [energia escura](#)) sugerem que as OGs podem propagar-se a velocidades diferentes e sofrer *dispersão*. Isto significaria que frequências diferentes chegariam em momentos ligeiramente diferentes, de forma semelhante ao modo como as ondas de rádio se dispersam ao viajar através de um [plasma](#). Os testes de *geração* de OGs analisam se a forma como os objetos em sistemas binários realizam o movimento em espiral e se fundem concorda com o previsto pela Relatividade Geral. Isto pode ser testado introduzindo parâmetros adicionais no modelo de sinal que imitam os efeitos de teorias alternativas. Se os dados sugerirem que estes parâmetros são consistentes com zero, a teoria de Einstein passa no teste. Caso contrário, o resultado pode indiciar uma nova física para além da Relatividade Geral.

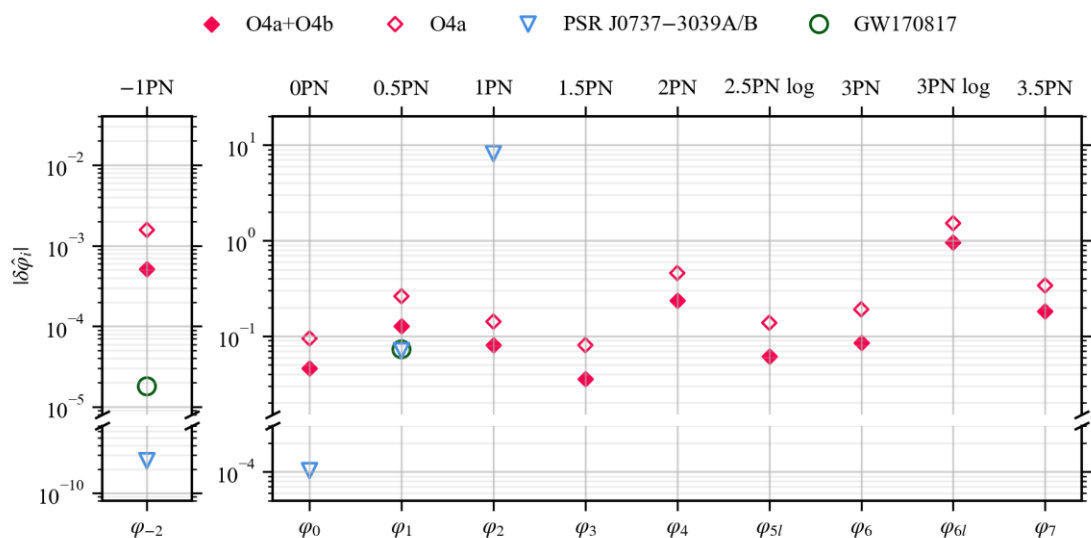


Figura 2: Limites para os chamados coeficientes [pós-Newtonianos](#), que governam a fase do sinal de ondas gravitacionais. O eixo horizontal lista os coeficientes, ordenados pela fase da evolução do sistema binário em que entram no sinal, desde grandes separações (à esquerda) até ao final do movimento em espiral imediatamente antes da fusão (à direita). O eixo vertical representa a magnitude do desvio permitido, sendo que os marcadores mais baixos significam limites mais estritos. A análise atual (losangos vermelhos preenchidos) resulta em limites significativamente mais estritos do que o resultado anterior (losangos vermelhos vazios). Para os coeficientes de ordem mais baixa, são mostrados para comparação os limites do pulsar duplo [PSR J0737–3039A/B](#) (triângulos azuis) e da fusão de estrelas de neutrões [GW170817](#) (círculos verdes).

Por fim, um conjunto de testes foca-se no buraco negro final resultante da fusão. Inicialmente distorcido pela dinâmica violenta da coalescência, o remanescente emite OGs, de forma análoga a um sino que, ao ser tocado, liberta as suas vibrações sob a forma de som, sendo esta fase conhecida como “[amortecimento](#)”. Estas ondas são irradiadas a frequências específicas e amortecem ao longo de escalas de tempo características, ambas determinadas pela massa e rotação finais do buraco negro remanescente. Esta é a base do “[teorema da ausência de cabelo](#)”: todas as distorções do buraco negro (os “cabelos”) são dissipadas por radiação, deixando um estado final descrito exclusivamente pela sua massa e rotação¹. À semelhança de um coro cujo som se vai desvanecendo no final de uma canção, as “vozes” individuais do buraco negro (os componentes [harmônicos](#) do amortecimento) transportam informação detalhada sobre a sua origem. Os cientistas podem, portanto, obter informações sobre a massa e a rotação de um buraco negro analisando o espectro de frequências e o tempo de amortecimento da sua fase final. Detetar um único harmónico, o que acontece habitualmente, permite efetuar verificações de consistência com os parâmetros inferidos antes e durante a fusão, ao passo que a resolução de mais do que um harmónico e a verificação da consistência dos parâmetros do buraco negro inferidos a partir de cada uma delas fornece um teste direto ao teorema da ausência de cabelo.

ENTÃO, EINSTEIN ESTÁ CERTO?

Para cada um dos eventos considerados, verificamos que os resíduos são consistentes com o ruído, o que indica que os sinais de OGs são bem descritos pela Relatividade Geral. Não encontramos qualquer indício de modos de polarização adicionais para além dos dois previstos pela teoria de Einstein, nem evidência de desvios à Relatividade Geral na geração de OGs. No entanto, a presente análise estabelece limites significativamente mais estritos para possíveis desvios do que anteriormente, conforme ilustrado na **Figura 2**.

Realizámos também análises dedicadas ao amortecimento, as vibrações finais do buraco negro recém-formado. Em todos os casos, as frequências e os tempos de amortecimento medidos permanecem consistentes com os previstos para buracos negros na Relatividade Geral, e as massas e rotações do remanescente inferidas a partir do amortecimento concordam com as estimadas a partir do resto do sinal.

As deteções mais recentes fazem mais do que simplesmente aumentar a amostra: algumas delas tornam possíveis testes qualitativamente novos. O caso mais marcante é o do [GW250114](#), o evento de OG mais forte observado até à data, que permitiu estabelecer os limites mais precisos para desvios no amortecimento (vê também estes resumos científicos anteriores [\[1\]](#) [\[2\]](#)). Tanto para o GW250114 como para o GW240621, a análise do amortecimento identificou um harmónico subdominante a par do dominante, conforme ilustrado na **Figura 3**, o que é consistente com as vibrações esperadas para os buracos negros da Relatividade Geral. O [GW241011](#), o sinal de um sistema binário no qual um dos buracos negros é muito mais pesado do que o outro e possui uma rotação rápida, é diferente da maioria dos sistemas observados até agora e fornece limites estritos contra potenciais modificações na aproximação em espiral. O [GW240925](#), um dos eventos mais fortes, foi registado enquanto um detetor estava a ser afetado por incertezas de calibração, tendo sido possível incluí-lo apenas através da inferência conjunta da calibração instrumental e das propriedades da fonte, uma verificação importante, dado que os erros de calibração poderiam, de outro modo, ser confundidos com desvios à Relatividade Geral.

Estes resultados confirmam que a Relatividade Geral permanece consistente com as observações de OGs, não exigindo modificações ou uma nova física. Além disso, ao combinar os 77 eventos recém-testados com deteções anteriores, estabelecemos limites ainda mais estritos para possíveis desvios à Relatividade Geral. À medida que os detetores LIGO-Virgo-KAGRA continuam a melhorar, espera-se que os próximos períodos de observação forneçam sinais ainda mais fortes e testes ainda mais rigorosos à teoria de Einstein.

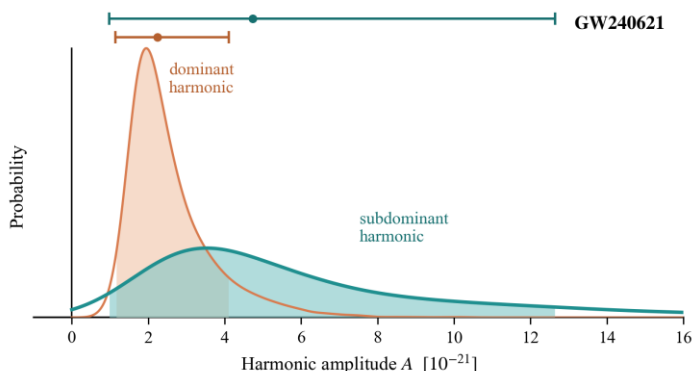


Figura 3: Distribuições de probabilidade para as amplitudes do harmónico de amortecimento dominante (laranja) e subdominante (azul-petróleo) do sinal GW240621, medidas conjuntamente pouco tempo após a fusão (cerca de 1,5 milissegundos, ou aproximadamente duas vezes o tempo que a luz demora a percorrer uma distância comparável ao tamanho do buraco negro final). O eixo horizontal representa a amplitude em unidades de 10^{-21} , a escala típica das OGs nos nossos detetores. As bandas sombreadas assinalam a região de credibilidade de 90% de cada harmónico, ou seja, o intervalo mais estreito que contém essa probabilidade. Os marcadores acima das curvas resumem o mesmo intervalo, juntamente com a amplitude mediana (ponto preenchido) para cada harmónico. Ambas as regiões excluem o zero, o que indica que o harmónico subdominante é medido de forma confiável a par do dominante. O harmónico subdominante amortece muito mais rapidamente do que o dominante, pelo que, embora a sua amplitude possa igualar ou exceder brevemente a do harmónico dominante nesta fase inicial, ele desvanece-se rapidamente enquanto o harmónico dominante subsiste por mais tempo.

PARA SABER MAIS:

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

Lê uma pré-impressão de acesso livre do artigo científico “Tests of General Relativity with the signals from the GWTC-5” [aqui](#) ou no [arxiv](#).

Os dados relativamente ao GWTC-5.0 foram publicados pelo Gravitational-Wave Open Science Centre [aqui](#).

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

1. Desprezando a carga eletromagnética. Em meios astrofísicos, qualquer carga significativa deverá ser neutralizada muito rapidamente, restando a massa e a rotação como as únicas grandezas relevantes.