

TESTANDO A RELATIVIDADE GERAL COM AS ÚLTIMAS OBSERVAÇÕES DE FUSÃO DE BINÁRIAS COMPACTAS

A [teoria da Relatividade Geral](#) de Einstein é a teoria da gravidade atualmente aceita. Durante os últimos 110 anos desde que Einstein introduziu a Relatividade Geral (RG), ela foi exaustivamente testada de várias maneiras, sempre aprovada com excelência. Ainda assim, a teoria permanece sob constante escrutínio. As [ondas gravitacionais](#) (OG) são uma previsão direta da RG, confirmadas pela [primeira observação direta da colisão de dois buracos negros em setembro de 2015](#). As observações de [espiral](#) e fusão de [buracos negros](#) de massa estelar fornecem uma oportunidade única para verificar se a RG continua válida em regimes de gravidade intensa e altamente dinâmica.

Na última década, a [colaboração LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#) tem utilizado regularmente catálogos de observações de ondas gravitacionais para testar a RG. Esses testes confirmam que, se existirem desvios em relação à teoria, eles devem ser muito pequenos—abaixo da capacidade de medição dos detectores. No entanto, à medida que mais eventos de ondas gravitacionais são observados, nossos testes se tornam cada vez mais rigorosos. Com 42 nova fusões de buracos negros de alta significância detectadas durante a primeira parte do atual [período de observação](#) (O4a), é hora de reexaminar a validade da RG com esse conjunto de dados ampliado.

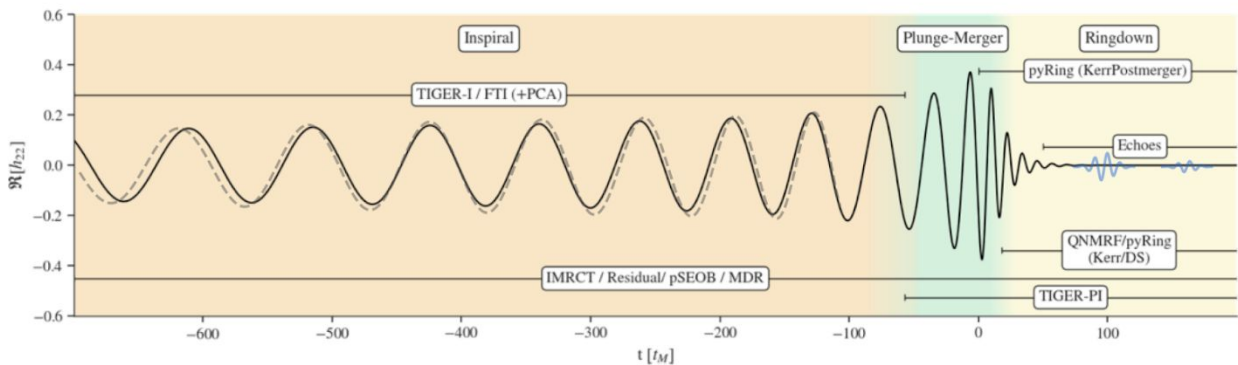


Figura 1: O sinal de onda gravitacional proveniente da fusão de um sistema binário de buracos negro. A figura destaca as regiões de espiral, fusão e relaxamento do sinal. Os nomes dos testes e o intervalo de tempo em que cada um é aplicado também estão indicados. Um sinal hipotético distorcido, que se desvia da previsão da Relatividade Geral, é mostrado como uma linha tracejada. Possíveis “ecos,” esperados caso o remanescente da fusão não fosse um buraco negro, são ilustrados em azul.

Como nós testamos a Relatividade Geral? A RG fornece uma estrutura bem estabelecida para descrever a gravidade e, nas últimas décadas, houve grande progresso—tanto analítico quanto numérico—na modelagem precisa de ondas gravitacionais provenientes de fusões de sistemas binários compactos. Os testes de Relatividade Geral baseiam-se em (i) avaliar a consistência interna da teoria ao longo de diferentes etapas da coalescência, or (ii) procurar por “distorções” específicas nos sinais de ondas gravitacionais, motivadas por possíveis violações da Relatividade Geral.

Possíveis desvios da RG podem surgir durante a geração ou propagação das ondas gravitacionais, ou porque os objetos em fusão não são buracos negros conforme descrito pela Relatividade Geral. Contudo, esses testes devem ser interpretados com cautela: flutuações do ruído instrumental e limitações decorrentes do uso de formas de onda gravitacional computacionalmente eficientes (mas ligeiramente menos precisa) podem imitar desvios aparentes da Relatividade Geral, devendo ser cuidadosamente desvinculados de efeitos físicos genuínos.

UMA PLENITUDE DE TESTES

O grande número e a alta qualidade das observações de OG disponíveis permitem que os cientistas do LVK realizem uma ampla variedade de testes da RG. Além dos testes descritos com mais detalhes abaixo, nossos artigos apresentam diversos outros testes que exploram características mais fracas (conhecidas como **modos subdominantes**) dos sinais de OG ou examinam se os buracos negros são deformados por sua [rotação](#), como esperado. Além disso, examinamos se o centro de massa do sistema binário mostra sinais de aceleração—um efeito astrofísico que, se não for considerado adequadamente, pode ser interpretado erroneamente como um desvio da RG.

Os primeiros testes que destacamos aqui concentram-se em examinar diretamente se a evolução dos sistemas binários de buracos negros, bem como a emissão e propagação de ondas gravitacionais, desviam-se das previsões de Einstein. Por exemplo, a RG prevê que as OG viajam à [velocidade da luz](#) e interagem muito fracamente com a matéria. Em contraste, algumas teorias alternativas (como as que envolvem um [gráviton massivo](#) ou [energia escura](#)) sugerem que as ondas gravitacionais podem se propagar a velocidades diferentes e sofrer *dispersão*—significando que diferentes frequências chegam em momentos ligeiramente distintos, semelhante às ondas de rádio que se dispersam ao atravessar um [plasma](#). Isso pode ser testado introduzindo parâmetros adicionais no modelo do sinal que imitem os efeitos dessas teorias alternativas. Se os dados indicarem que esses parâmetros são consistentes com zero, a teoria de Einstein passa no teste. Caso contrário, o resultado pode sugerir uma nova física além da RG.

Outra classe de testes é projetada para verificar a consistência geral dos sinais observados com as previsões da RG, ou a consistência interna entre diferentes partes do sinal.

A consistência geral pode ser testada subtraindo-se a forma de onda de melhor ajuste da RG dos dados e analisando os resíduos, comparando-os com o ruído instrumental esperado. Como as observações que consideramos para esses testes são feitas com pelo menos dois e até três detectores, a consistência dos resíduos entre os detectores—levando em conta o tempo de deslocamento da luz entre os locais—fornece uma verificação adicional: enquanto um sinal genuíno deve aparecer correlacionado entre os detectores, o ruído instrumental em cada detector não é correlacionado.

A consistência interna pode ser testada dividindo-se o sinal em diferentes segmentos e analisando cada parte separadamente. Se a RG estiver correta, os parâmetros inferidos a partir de diferentes partes do sinal devem ser concordantes. Por, exemplo, os sinais detectados pelo LVK geralmente codificam informações de todas as três fases da coalescência: a [espiral](#) de dois buracos negros, sua fusão, e o [relaxamento](#) (ringdown) do buraco negro remanescente. O teste de consistência "espiral-fusão-relaxamento" compara a massa e o spin do buraco negro final inferidos a partir da fase de espiral de baixa frequência com os valores inferidos a partir da fase pós-fusão de alta frequência.

Semelhante à luz, a RG permite apenas duas [polarizações](#), chamadas “mais” e “cruz”. Os testes de polarização verificam se as OG possuem *apenas* os dois estados de polarização da RG, ou se a onda pode oscilar de maneira mais geral. Teorias alternativas podem apresentar até seis modos de polarização. A presença de modos adicionais pode ser testada por meio de observações com múltiplos detectores. (Veja Fig. 5 [deste resumo](#) para mais informações.)

O buraco negro formado na fusão de um sistema binário é inicialmente distorcido pela dinâmica violenta da coalescência. Como um sino que vibra e libera som, o buraco negro emite ondas gravitacionais. Essas ondas são irradiadas com frequências específicas e decaem em escalas de tempo características, ambas determinadas pela massa e spin do buraco negro remanescente.

SAIBA MAIS:

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



Isso constitui a base do "teorema da calvície": todas as distorções do buraco negro — ou “cabelos” — são irradiadas, deixando para trás um estado final descrito unicamente por dois parâmetros. Assim como um coral que se dissipa ao final de uma canção, as “vozes” individuais do buraco negro — os componentes [harmônicos](#) do ringdown — carregam informações detalhadas sobre sua origem. Portanto, os cientistas podem aprender sobre a massa e o spin de um buraco negro analisando seu espectro de frequência no relaxamento e tempo de decaimento. A detecção de um único harmônico — o que geralmente ocorre — permite realizar verificações de consistência com os parâmetros inferidos antes e durante a fusão. A principal característica de um buraco negro é seu horizonte de eventos, além do qual nenhum sinal pode escapar — diferentemente de uma superfície sólida que poderia atuar como um “espelho” e produzir os chamados “sinais de eco” após a fusão, que também buscamos.

ENTÃO, EINSTEIN ESTÁ CORRETO?

Para todos os eventos considerados, verificamos que os resíduos são consistentes com o ruído, indicando que as OG são bem descritas pela RG. As massas e spins finais, inferidos a partir das partes de baixa e alta frequência das formas de onda, são consistentes entre si.

Também não encontramos nenhuma evidência de desvios das previsões da RG, seja na geração ou na propagação das OG codificadas na forma dos sinais. Da mesma forma, não há indicação de modos de polarização adicionais aos previstos pela RG. A análise atual impõe limites mais rigorosos sobre possíveis desvios da RG, conforme ilustrado na **Figura 2** abaixo.

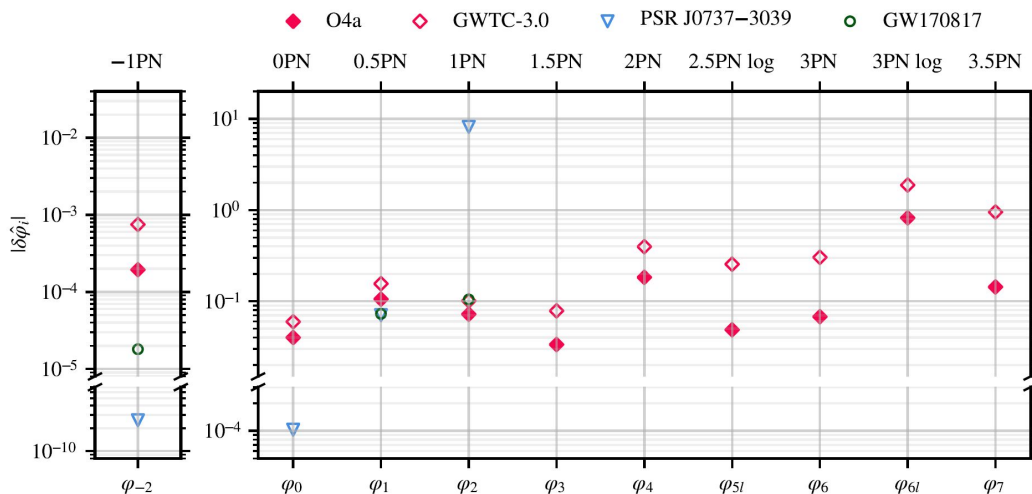


Figura 2: São mostradas as restrições aos chamados coeficientes pós-newtonianos, que regem a fase da onda gravitacional. Esses coeficientes capturam possíveis desvios da Relatividade Geral em diferentes estágios da evolução binária (desde grandes separações, à esquerda, até a espiral tardia, pouco antes da fusão, à direita). A análise atual fornece limites significativamente mais rigorosos (mais baixos) para esses desvios em comparação com resultados anteriores.

Da mesma forma, a análise do ringdown produz resultados consistentes com as massas e spins do buraco negro final, estimadas sob as suposições da RG. Nós também não encontramos indícios de ecos pós-fusão, que seriam esperados caso o remanescente não fosse um buraco negro.

A colaboração LVK conduziu recentemente testes da RG usando dois eventos excepcionalmente intensos que não foram incluídos neste trabalho: **GW230814**, anteriormente o evento mais intenso já detectado (observado apenas pelo LIGO Livingston) e **GW250114**, o novo recordista em intensidade de sinal. Embora **GW230814** inicialmente parecesse promissor para testar a RG, a ausência de dados coincidentes de outros detectores impediu verificações cruzadas para um excesso de ruído instrumental, destacando a importância das observações com múltiplos detectores. Em contraste, **GW250114** – que foi detectado por ambos observatórios LIGO – possibilitou testes de alta precisão da RG, incluindo uma verificação direta do **teorema da área de Hawking** e as restrições

mais rigorosas até agora sobre os desvios pós-newtonianos e de relaxamento. No entanto, esse evento ocorreu mais tarde durante o quarto Período de Observação e, portanto, não faz parte do conjunto de dados considerados neste trabalho.

Em geral, esses resultados confirmam que a Relatividade Geral continua consistente com as observações de ondas gravitacionais, sem necessidade de modificações ou nova física. Além disso, ao combinar os 42 eventos recém testados com detecções anteriores, impusemos restrições ainda mais rigorosas sobre possíveis desvios da Relatividade Geral.

SAIBA MAIS:

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

Este resumo científico é baseado em três novos artigos da Colaboração LVK. Leia uma versão preliminar gratuita dos artigos científicos completos:

GWTC-4.0: Tests of General Relativity I. Overview and General Tests. Read [here](#) or on [arXiv](#).

GWTC-4.0: Tests of General Relativity II. Parametrized Tests. Read [here](#) or on [arXiv](#).

GWTC-4.0: Tests of General Relativity III. Tests of the Remnants. Read [here](#) or on [arXiv](#).

Divulgação de dados em Gravitational-Wave Open Science Center:

Dados para GW230814: <https://doi.org/10.7935/ami3-kd70>

Dados para GW250114: <https://doi.org/10.7935/1q4j-2028>