

ESPECTROSCOPÍA DE BURATOS NEGROS E PROBAS DA RELATIVIDADE XERAL CON GW250114

DETECCIÓN DO SINAL GW250114

No 14 de xaneiro de 2025, a colaboración [LIGO-Virgo-KAGRA](#) observou un sinal de [onda gravitacional](#) excepcionalmente forte, denominado GW250114. O sinal foi rexistrado polos detectores LIGO en Hanford, Washington, e Livingston, Louisiana (EE.UU.), durante o segundo segmento da cuarta [campaña de observación](#) LIGO-Virgo-KAGRA (O4b).

GW250114 é recoñecido como o sinal de ondas gravitacionais máis claro observado ata a data, arredor de tres veces máis intenso que a [primeira detección](#) no 2015. Aquí, “máis intenso” refírese á súa maior [razón sinal-ruído](#), unha medida da claridade ca que sobresaen as ondas gravitacionais por enriba do [ruído](#) de fondo dos detectores. O sinal coincide co esperado cando dous [buratos negros](#) de masas case iguais e baixa [velocidade de rotación](#) ou espín achéganse en espiral, colisionan e estabilízanse nun único e maior burato negro.

Outro artigo publicado recentemente en *Physical Review Letters* [anuncia a detección de GW250114](#), presentando as propiedades dos buratos negros e un conxunto selecto de probas de física fundamental. O presente artigo trátase dun estudo complementario, centrado na *espectroscopía de buratos negros* e en probas de precisión da relatividade xeral.

PROBANDO A TEORÍA DE EINSTEIN CON GW250114

Debido a súa excepcional intensidade, GW250114 ofrece unha oportunidade sen precedentes de comprobar se a teoría da [relatividade xeral](#) de Albert Einstein ten validez nas condicións máis extremas coñecidas: os campos gravitacionais intensos e rapidamente cambiantes preto de buratos negros fusionándose. O obxectivo destas probas é verificar se o sinal de onda gravitacional observado é completamente consistente cas predicións de Einstein, ou se algunha desviación podería suxerir nova física máis aló da relatividade xeral.

Unha das ferramentas clave neste caso é a chamada *espectroscopía de buratos negros*. Esta técnica céntrase na fase de relaxación (ou [ringdown](#) en inglés) – a fase xusto despois da fusión, cando o burato negro recién formado está estabilizándose nun estado estable – mediante o estudo dos tons característicos que emite. De forma análoga a unha campá golpeada que vibra en tons determinados, un burato negro recién formado emite ondas gravitacionais nun conxunto característico de [modos cuasinormais](#).

Segundo o [teorema do non-pelo](#), un burato negro en relatividade xeral está completamente descrito pola súa masa, espín e carga electromagnética. En entornos astrofísicos, porén, espérase que calquera carga significativa sexa neutralizada rapidamente, deixando a masa e o espín como as únicas magnitudes relevantes. Isto implica que as frecuencias dos modos cuasinormais e os tempos de atenuación de cada modo están unicamente determinados por estes dous números.

A detección de múltiples tons de relaxación, comprobando se son consistentes cas frecuencias e decaementos esperados, supón unha poderosa proba da relatividade xeral. Estas medidas non só poñen a proba o teorema do non-pelo, senón que tamén permiten buscar desviacións xenéricas respecto as predicións de Einstein, ben polas características exóticas dos buratos negros, ben por modificacións máis fundamentais da teoría da gravidade.

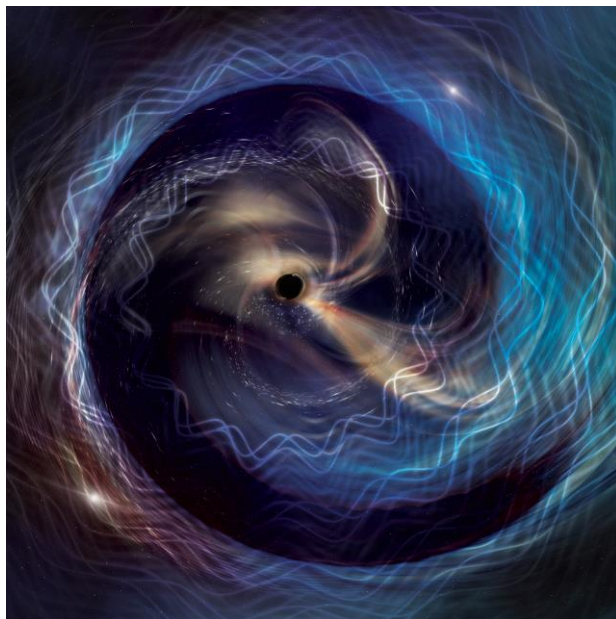


Figura 1. Visualización do burato negro GW250114 tras a fusión, que amosa unha representación artística das ondas gravitacionais producidas durante a fase de relaxación: segundo o burato negro recién formado vai estabilizándose, emite ondas gravitacionais nun conxunto de frecuencias específicas, como os tons característicos dunha campá resoando [Crédito da imaxe: LIGO Scientific Collaboration/Sonoma State University/A. Simmonet]

Na relatividade xeral, a solución única que describe un burato negro astrofísico en rotación é a [métrica de Kerr](#). As nosas medicións espectroscópicas proban, polo tanto, se o remanente formado en GW250114 é consistente cun burato negro de Kerr, e dentro da precisión actual, se as súas propiedades se axustan a esta expectativa.

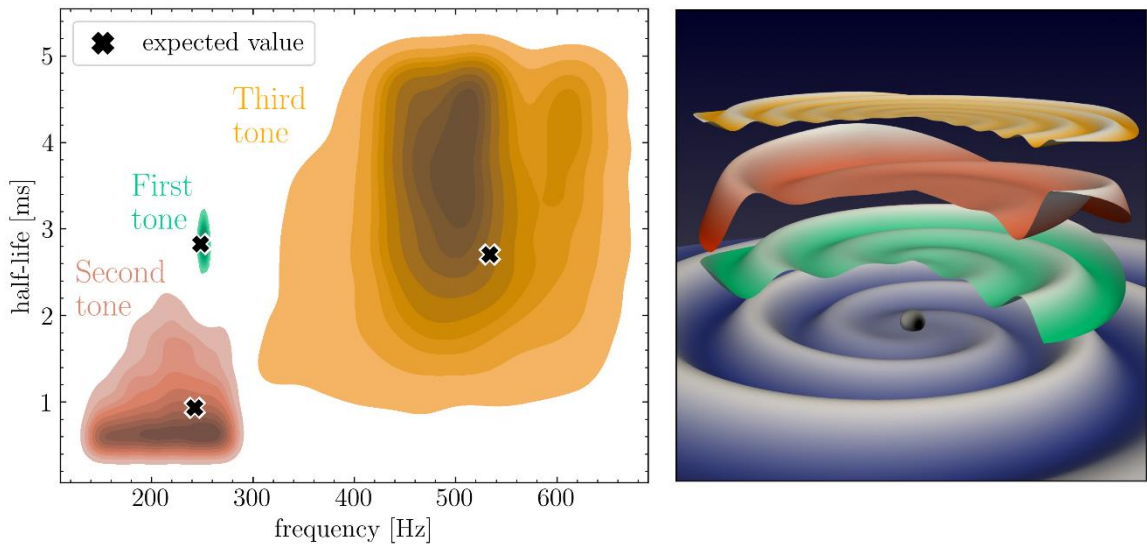


Figura 2. *Panel esquerdo:* Frecuencia e tempo de decaemento (vida media) dos diferentes tons de *ringdown* identificados ou acotados en GW250114. As rexións coloreadas mostran os resultados de análises que permiten que as frecuencias e os tempos de decaemento dos modos cuasinormais varíen libremente. A rexión vermella corresponde ao sobreton detectado na análise só do *ringdown* (segundo ton), mentres que as rexións verde e amarela corresponden ao ton fundamental (primeiro ton) e ao ton secundario de frecuencia máis alta (terceiro ton) obtidos da análise do sinal completo. Os marcadores negros indican os valores preditos para un burato negro de Kerr coa masa e o espín inferidos da análise do sinal completo, asumindo a relatividade xeral. O sombreado indica rexións de probabilidade, do 90% (máis claro) ao 10% (máis escuro). *Panel dereito:* Descomposición do sinal de onda gravitacional (espiral inferior, en azul) emitido polo burato negro remanente (esfera inferior) nos diferentes tons, para unha simulación numérica que corresponde cos parámetros medidos de GW250114. As superficies verde, vermella e amarela corresponden ao primeiro (fundamental), segundo (sobreton) e terceiro tons, respectivamente.

ESCOITANDO O RINGDOWN: TON FUNDAMENTAL, SOBRETON E UN TONO SECUNDARIO DE MAIOR FRECUENCIA

Usando análises baseados só na fase de relaxación ou *ringdown*, que se centran unicamente na parte do sinal posterior á fusión, buscamos estes tons sen empregar ningunha información da fase previa de [espiral](#). Atopamos que os datos favorecen unha descrición co ton fundamental principal e o seu primeiro sobreton, que é unha versión de máis rápida desaparición da mesma vibración. O primeiro sobreton pode seguirse durante uns tres milisegundos despois da fusión, momento a partir do cal xa non pode distinguirse por riba do ruído do detector. A súa amplitude e fase medidas coinciden con detalladas [simulacións de relatividade numérica](#) de fusións de buratos negros en relatividade xeral. As frecuencias e tempos de decaemento dos tons resultan consistentes coas predicións teóricas dentro das incertezas de medida. A medida do sobreton móstrase no **Fig. 2** (sombreado vermello), xunto co marcador negro que indica o valor esperado para un burato negro de Kerr coa masa e o espín estimados a partir dunha análise do sinal completo baixo a asunción da relatividade xeral.

Tamén analizamos o sinal completo —incluíndo a fase de espiral, a fusión e a relaxación— con modelos calibrados con simulacións numéricas, mais permitindo que as frecuencias e os tempos de decaemento dos tons varíen libremente, en vez de fixalos á predición de Kerr. Ao incorporar información de todo o sinal, podemos medir as propiedades da relaxación con aínda máis precisión. Con este método, a frecuencia do ton fundamental mídese cunha precisión do 2%, e o seu tempo de decaemento cunha do 9%, ambos en excelente acordo coa relatividade xeral. Esta análise tamén ofrece as primeiras restricións sobre un ton secundario de frecuencia máis alta, que vibra aproximadamente ao dobre da frecuencia do fundamental, de novo coincidindo coas predicións teóricas. Ambos resultados móstranse no **Fig. 2**, onde o ton fundamental e o secundario aparecen sombreados en verde e amarelo, respectivamente.

En conxunto, as análises só da relaxación e do sinal completo ofrecen probas complementarias, confirmando que as propiedades do remanente son consistentes cas esperadas para un burato negro de Kerr cando se miden de diferentes xeitos.

MAIS INFORMACIÓN:

Visita as
nosas
páxinas web: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



CONSISTENCIA EN TODO O SINAL (ESPIRAL – FUSIÓN – RINGDOWN)

Tamén comprobamos as predicións da relatividade xeral noutras partes do sinal, máis alá da relaxación. Na fase inicial de aproximación en [espiral](#) ou *inspiral*, onde os buratos negros orbitan un ao outro máis lentamente que na fusión final, non atopamos ningunha evidencia de desviacións respecto das predicións de Einstein. Tamén comparamos a masa e o espín do burato negro final estimados a partir da parte temperá do sinal cos valores inferidos da posterior fusión e relaxación, atopando de novo concordancia.

Notablemente, a intensidade de GW250114 permítenos establecer límites sobre posibles desviacións da relatividade xeral que non só son comparables, senón que nalgúns casos resultan dúas ou tres veces máis estritos ca os obtidos combinando información de dúas de sinais no último [Catálogo de Ondas Gravitacionais Transitorias](#) (GWTC-4.0), que inclúe sinais ata o primeiro segmento da cuarta campaña de observación de LIGO-Virgo-KAGRA (O4a). Algunhas destas melloras ilustranse na **Fig. 3**.

Finalmente, comprobamos se, ao subtraer dos datos a mellor forma de onda gravitacional posible prevista pola relatividade xeral, queda algún patrón inexplicado. Non é así, e o sinal restante compórtase como ruído ordinario do detector.

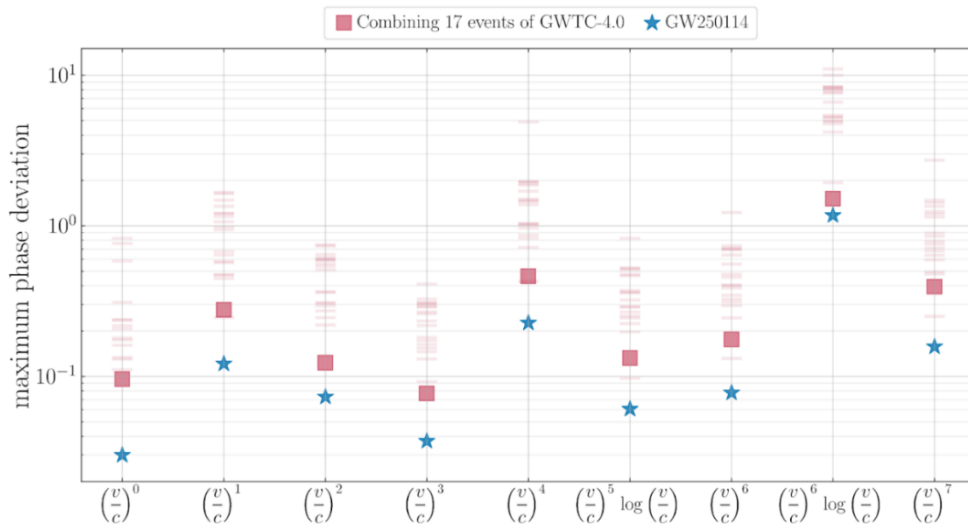


Figura 3. Límites superiores medidos ao 90% sobre posibles desviacións da relatividade xeral na [expansión posnewtoniana](#) da fase de *inspiral* do sinal de onda gravitacional. O marco posnewtoniano describe a fase de *inspiral* como unha serie en potencias da velocidade orbital do sistema binario (v/c) , onde c é a velocidade da luz, con cada coeficiente predito de xeito único pola relatividade xeral. Para o termo $(v/c)^0$, a relatividade xeral predí que o coeficiente é exactamente cero, de maneira que o límite corresponde a unha desviación absoluta; para todas as demais ordes, os límites representan desviacións fraccionarias. As estrelas azuis mostran as restricións medidas a partir de GW250114. Para comparación, as bandas vermellas claras marcan resultados de sinais individuais de GWTC-4.0, e os cadrados vermelloscinza indican restricións combinadas do catálogo a partir de 17 eventos. En todas as ordes posnewtonianas, as medidas de GW250114 establecen límites superiores que son de dúas a tres veces máis estritos cós obtidos combinando múltiples eventos.

EINSTEIN RESISTE

En todas as probas, GW250114 coincide coas expectativas da relatividade xeral, dentro da precisión das observacións actuais. A intensidade e claridade deste sinal convértena na confirmación máis precisa ata o momento da teoría de Einstein para fusións de buratos negros, axustando de xeito significativo os límites sobre canto podería diferir dela calquera teoría alternativa da gravidade. Xunto co [artigo da detección](#) — que proba a [lei da área de Hawking](#) e ofrece resultados complementarios sobre a natureza de Kerr do remanente—, este estudo ilustra o amplo alcance científico aberto por GW250114.

Mentres a colaboración LIGO-Virgo-KAGRA celebra unha década desde a primeira detección de ondas gravitacionais de fusións de buratos negros, as melloras espectaculares na sensibilidade dos detectores permítenos agora rexistrar sinais como GW250114 cunha claridade sen precedentes. Cada novo avance promete sinais aínda máis intensos no futuro. GW250114 é, polo tanto, un adiamento da ciencia transformadora que farán posible as próximas campañas de observación: deteccións máis potentes revelarán as propiedades dos buratos negros con maior detalle e levarán a teoría de Einstein ata os seus límites últimos.

MÁIS INFORMACIÓN:

Visita as nosas páxinas web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Le unha versión preliminar do artigo completo [aquí](#).

Le unha versión preliminar do artigo da detección de GW250114 [aquí](#).

Os datos de Gravitational-Wave Open Science Center para GW250114 [aquí](#).

Os datos de GWOSC para GWTC-4.0 [aquí](#).

Traducido ao galego por Sofía Bussièrres López a partir da versión orixinal en inglés.