

ESPECTROGRAFIA DE FORATS NEGRES I VALIDACIONS DE RELATIVITAT GENERAL AMB GW250114

DETECTANT EL SENYAL GW250114

El 14 de gener del 2025, la col·laboració [LIGO-Virgo-KAGRA](#) va observar un senyal d'[ones gravitacionals](#) excepcionalment fort, anomenat GW250114. El senyal va ser registrat pels detectors LIGO a Hanford, Washington, i Livingston, Louisiana, durant el segon segment de la quarta [campanya d'observació](#) de LIGO-Virgo-KAGRA (O4b).

GW250114 destaca com el senyal d'ones gravitacionals més clar observat a dia d'avui, uns tres cops més intens que la [primera detecció](#). Aquí, "més intens" es refereix a una [raó senyal-soroll](#) més alta, una mesura de la clarietat amb la que les ones gravitacionals sobresurten del [soroll](#) de fons dels detectors. El senyal coincideix amb el que esperem quan [dos forats negres](#) de masses quasi equivalents i [moment angular](#) baix s'acosten en espiral, col·lideixen i es converteixen en un únic forat negre, més gros.

Un altre article acabat de publicar al *Physical Review Letters* [anuncia la detecció de GW250114](#), presentant les propietats dels dos forats negres i un conjunt selecte de validacions de física fonamental. Aquest article serveix d'estudi complementari, centrant-se en *espectrografia de forats negres* i validacions precises de la relativitat general.

POSANT A PROVA LA TEORIA D'EINSTEIN AMB GW250114

Deguda a la seva intensitat excepcional, GW250114 ofereix una oportunitat sense precedents per a comprovar si la teoria de la [relativitat general](#) de l'Albert Einstein segueix sent vàlida en les condicions més extremes conegudes: els camps gravitatoris ràpidament canviants i intensos prop de les fusions de forats negres. L'objectiu d'aquestes validacions és comprovar si el senyal observat és completament consistent amb les prediccions d'Einstein, o si alguna desviació podria suggerir nova física més enllà de la relativitat general.

Una de les eines clau per a comprovar-ho s'anomena *espectrografia de forats negres*. Aquesta tècnica es centra en el [ringdown](#) – la fase immediatament posterior a la fusió, quan el forat negre acabat de formar s'està relaxant a un estat d'equilibri – mitjançant l'estudi dels tons distintius que emet. Anàlogament a una campana repicada que ressona a tons específics, un forat negre acabat de formar emet ones gravitacionals en un conjunt característic de [modes quasinormals](#).

Segons el [teorema de no-pèl](#), en relativitat general un forat negre es pot descriure completament amb la seva massa, moment angular i càrrega electromagnètica. En entorns astrofísics, no obstant, qualsevol càrrega acabarà neutralitzada ràpidament, deixant la massa i el moment angular com a úniques quantitats rellevants. Per tant, les freqüències dels modes quasinormals i de la rapidesa de cadascun en atenuar-se estan fixats de manera única per aquests dos números.

La detecció de múltiples tons del ringdown i la comprovació de la seva consistència amb les freqüències i els temps d'atenuació constitueix una validació robusta de la relativitat general. Aquestes mesures no tan sols exploren el teorema de no-pèl, sinó que també permeten buscar desviacions genèriques respecte les prediccions d'Einstein, tant sorgint de característiques exòtiques dels forats negres com de modificacions més fonamentals de la teoria de la gravetat.

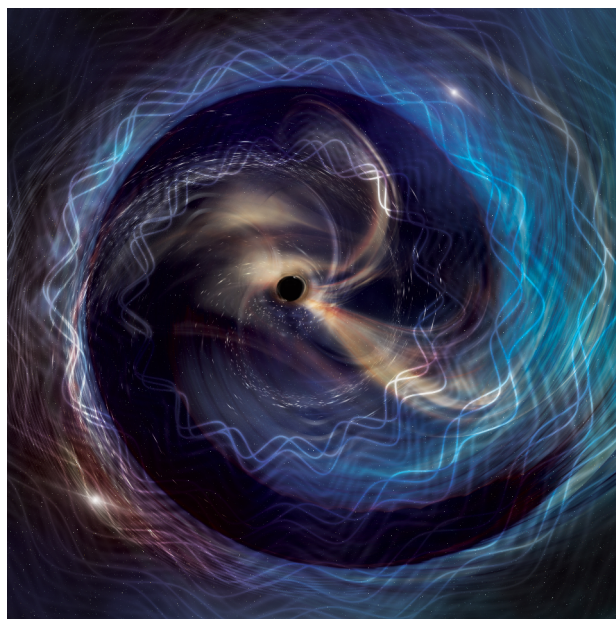


Figura 1. Visualització del forat negre posterior a la fusió GW250114, mostrant una representació artística de les ones gravitacionals produïdes durant la fase del ringdown: a mesura que el forat negre acabat de formar s'estabilitza, emet ones gravitacionals en un conjunt de freqüències específiques com els diferents tons d'una campana ressonant. [Crèdit de la imatge: LIGO Scientific Collaboration/Sonoma State University/A. Simmonet]

En relativitat general, la solució única que descriu un forat negre astrofísic en rotació és la [mètrica de Kerr](#). Les nostres mesures espectroscòpiques validen, per tant, que el forat negre final format a GW250114 és consistent amb un forat negre de Kerr i, dins de la precisió actual, que les seves propietats coincideixen amb aquesta expectativa.

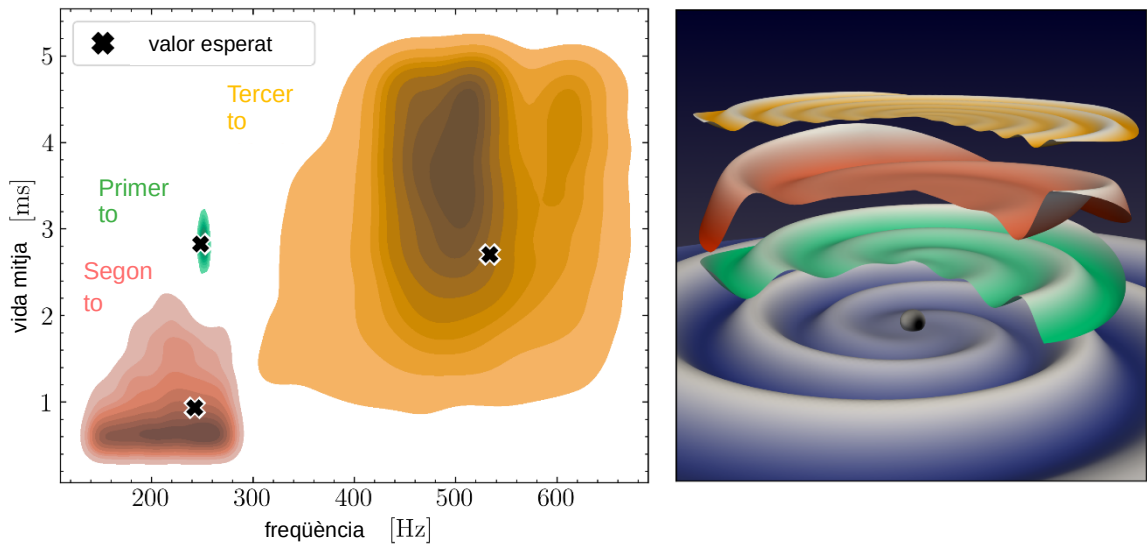


Figura 2. *Panell esquerre:* Freqüència i temps d'atenuació (vida mitja) dels diferents tons de ringdown identificats o delimitats a GW250114. Les regions acolorides mostren els resultats de les anàlisis que permeten variar lliurement les freqüències dels modes quasineormals. La regió vermella correspon al sobreto detectat en l'anàlisi restringida al ringdown (segon to), mentre que les regions verdes i grogues corresponen als tons fonamentals (primer to) i secundari de més alta freqüència (tercer to) obtinguts a partir de l'anàlisi del senyal complet. Els marcadors negres indiquen els valors predits per a un forat negre de Kerr amb una massa i moment angular obtinguts de l'anàlisi del senyal complet assumint la relativitat general. L'ombrejat denota regions de densitat de probabilitat, de 90% (més clar) al 10% (més fosc). *Panell dret:* Descomposició del senyal de la ona gravitacional (espiral inferior blava) emesa pel forat negre final (esfera inferior) en els diferents tons, per a una simulació numèrica coincident amb els paràmetres mesurats de GW250114. Les superfícies verda, vermella i groga corresponen al primer (fonamental), segon (sobreto) i tercer to respectivament.

ESCOLTANT EL RINGDOWN: TO FONAMENTAL, SOBRETO I UN TO SECONDARI DE MAJOR FREQÜÈNCIA

Utilitzant anàlisis restringides al ringdown, que es centren només en la part del senyal posterior a la fusió, busquem aquests tons sense utilitzar cap informació de la fase inicial d'[inspiral](#) (aproximament en espiral). Trobem que les dades afavoreixen una descripció amb el to *fonamental* principal i el seu primer sobreto, que és una versió més ràpidament atenuada de la mateixa vibració. El primer sobreto es pot seguir durant uns tres mil·lisegons després de la fusió, després dels quals ja no es pot distingir sobre el soroll de fons del detector. La mesura de la seva amplitud i fase concorden amb [simulacions de relativitat general](#) detallades de fusions de forats negres. Les freqüències i temps d'atenuació dels tons són consistents amb les prediccions teòriques dins les incerteses de les mesures. La mesura del sobreto es mostra a la **Figura 2** (ombrejat vermell), juntament amb el marcador negre que indica el valor esperat per a un forat negre de Kerr amb massa i moment angular estimats per una anàlisi del senyal complet sota l'assumpció de la relativitat general.

També analitzem el senyal complet – incloent l'inspiral, fusió i ringdown – amb models calibrats amb simulacions numèriques, tot i permetent a les freqüències i els temps d'atenuació variar lliurement, enlloc de fixar-les a la predicció de Kerr. Mitjançant la incorporació d'informació del senyal complet, podem mesurar les propietats del ringdown encara amb més precisió. Amb aquest mètode, la freqüència del to fonamental s'ha mesurat fins a un dos per cent de precisió aproximadament, i el seu temps fins a un nou per cent aproximadament, ambdós en excel·lent coincidència amb la relativitat general. Aquesta anàlisi també proporciona les primeres delimitacions en un to secundari de major freqüència, que ressona al voltant del doble de la freqüència del fonamental, de nou coincidint amb les prediccions teòriques. Ambdós resultats es mostren a la Fig.2, on els tons fonamental i secundari apareixen en ombrejats verd i groc, respectivament.

En conjunt, les anàlisis restringides al ringdown i les del senyal complet ofereixen verificacions complementàries, confirmant que les propietats del forat negre final són consistents amb les esperades per a un forat negre de Kerr quan es mesuren de maneres diferents.

DESCOBRIU-NE MÉS:

Visiteu les nostres pàgines web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



CONSISTÈNCIA AL LLARG DEL SENYAL INSPIRAL-FUSIÓ-RINGDOWN

També validem les prediccions de la relativitat general per a altres parts del senyal, a part del ringdown. A la fase inicial d'[inspiral](#), quan els forats negres orbiten un al voltant de l'altre més lentament que a la fusió final, no trobem evidència de desviacions respecte les prediccions d'Einstein. També comparem la massa i el moment angular del forat negre final estimats a partir de la part inicial del senyal amb els valors obtinguts de la fusió posterior i el ringdown, trobant de nou acord.

Notablement, la intensitat de GW250114 ens permet imposar restriccions en possibles desviacions respecte la relativitat general que no només són comparables, sinó en alguns casos són dos o tres cops més estrictes que les restriccions obtingudes mitjançant la combinació d'informació de desenes de senyals en l'últim [catàleg d'ones gravitacionals transitoris](#) (GWTC-4.0), que inclou senyals fins el primer segment de la quarta campanya d'observació LIGO-Virgo-KAGRA (O4a). Algunes d'aquestes millores s'il·lustren a la **Figura 3**.

Finalment, comprovem si havent restat de les dades la millor forma d'ona en relativitat general roman algun patró inexplicat. No en deixa, per tant, el senyal restant es comporta com a soroll ordinari del detector.

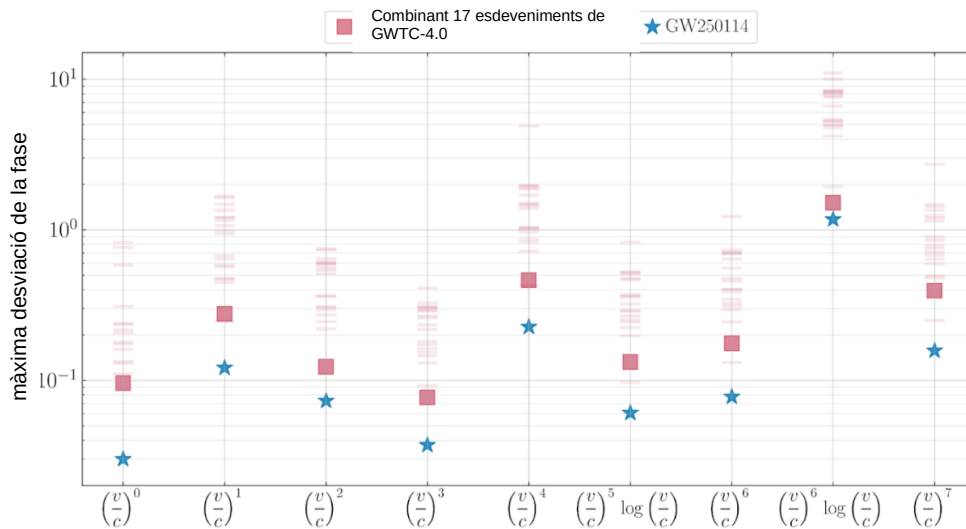


Figura 3. Mesures dels límits superiors del 90% en possibles desviacions respecte la relativitat general en l'[expansió post-Newtoniana](#) de la fase d'inspiral del senyal de l'ona gravitacional. El marc post-Newtonià descriu la fase d'inspiral com a una sèrie de potències de la velocitat orbital de la binària (v/c) , on c és la velocitat de la llum, amb cada coeficient predit de forma única per la relativitat general. Per al terme $(v/c)^1$, la relativitat general prediu un coeficient de valor exactament zero, així que el límit correspon a una desviació absoluta; per a tots els altres ordres, els límits representen desviacions fraccionals. Les estrelles blaves mostren els límits mesurats amb GW250114. Com a comparativa, les bandes vermell clares indiquen els resultats de senyals individuals de GWTC-4.0, i els quadrats vermells indiquen límits de la combinació de 17 senyals del catàleg. Al llarg de tots els ordres post-Newtonians, les mesures obtingudes a partir de GW250114 estableixen límits superiors que són dos o tres cops més estrictes que aquells obtinguts combinant múltiples senyals.

EINSTEIN AGUANTA

En cada validació, GW250114 coincideix amb les previsions de la relativitat general, dins la precisió de les observacions actuals. La intensitat i claredat d'aquest senyal el converteixen en la confirmació més precisa fins ara de la teoria d'Einstein per a les fusions de forats negres, estrenyent significativament els límits sobre quant podrien diferir-ne cap de les teories alternatives de la gravetat. Juntament amb l'[article de la detecció](#), que verifica la [lei de l'àrea de Hawking](#) i ofereix resultats complementaris sobre la naturalesa de Kerr del forat negre final, aquest estudi il·lustra l'ampli abast de la ciència que obre GW250114.

Mentre la col·laboració LIGO-Virgo-KAGRA celebra una dècada des de la primera detecció d'ones gravitacionals provinents de les fusions de forats negres, les notables millores en la sensibilitat del detector permeten ara registrar senyals com GW250114 amb una claredat sense precedents. Cada nou avenç promet senyals encara més forts en el futur. GW250114 és per tant un avançament de la ciència transformadora que les properes campanyes d'observació faran possible: deteccions més fortes revelaran les propietats dels forats negres en més detall i portaran la teoria d'Einstein fins els seus límits més extrems.

DESCOBRIU-NE MÉS:

Visiteu les nostres pàgines web:

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

Llegiu una versió preliminar gratuïta de l'article científic complet [aquí](#) o a [arxiv](#).

Llegiu una versió preliminar gratuïta de l'article de la detecció de GW250114 [aquí](#) o a [arxiv](#).

La publicació de dades del Gravitational-Wave Open Science Center per a GW250114 està disponible [aquí](#).

La publicació de dades del GWOSC pel GWTC-4.0 està disponible [aquí](#).

Traduït al català per Helena Ubach i revisat per Daniel Marín Pina de l'original en anglès que podeu trobar [aquí](#).