

GW190521: LA COL·LISIÓ DE FORATS NEGRES MÉS MASSIVA OBSERVADA FINS AVUI

QUÈ OBSERVEM?

El 21 de maig del 2019, els detectors [Advanced LIGO](#) i [Advanced Virgo](#) observaren un senyal d'ona gravitacional procedent de la fusió d'un parell de [forats negres](#) amb propietats extraordinàries. El senyal, catalogat com GW190521, presenta una duració i un pic de freqüència menor al de qualsevol altre senyal produït per un sistema binari de forats negres observats fins avui.

L'interval de temps en el que un senyal produït per un sistema binari de forats negres es registra a la banda de sensibilitat dels detectors Advanced LIGO i Advanced Virgo és inversament proporcional a la massa total del sistema binari. En el cas de GW190521, aquest interval de temps es d'aproximadament 0.1 segons, molt més breu que, per exemple, [GW150914](#), la primera fusió d'un sistema binari de forats negres mai detectada. De forma similar, la freqüència màxima del senyal que s'aconsegueix en una fusió d'un sistema binari de forats negres és també inversament proporcional a la massa total del sistema binari. En el cas de GW190521, aquesta freqüència màxima va ser del voltant de 60Hz, de nou molt menor que en el cas de GW150914, la freqüència màxima del qual va ser del voltant de 150Hz. Era evident des d'un primer moment (veure la Figura 1) que LIGO i Virgo tenien un parell de forats negres molt grans entre mans.

La Figura 2 mostra les masses estimades dels forats negres que produïren el senyal GW190521. Mentre que el major dels dos forats negres presenta una massa del voltant d'unes 85 vegades la [massa del Sol](#) (denotada pel símbol M_{\odot}), el més lleuger presenta una massa propera a les 65 M_{\odot} . Tots dos objectes són molt més massius que cap dels altres forats negres [detectats en fusions per LIGO i Virgo fins ara](#), i fins i tot el forat negre més lleuger ja és més massiu que molts dels romanents formats en aquests esdeveniments de fusió (veure la Figura 3).

Respecte a GW190521, el forat negre romanent de la fusió "pesa" al voltant de 142 M_{\odot} , que el col·loca al capdavant en la llista dels majors forats negres observats per LIGO-Virgo. La massa del forat negre romanent és aproximadament 8 M_{\odot} menor que les masses combinades dels dos forats negres que es fusionaren, aquesta diferència de massa va ser convertida en energia, en forma d'ones gravitacionals.

PER QUÈ ÉS TAN INTERESSANT GW190521?

Les masses extraordinàriament grans dels forats negres que produïren GW190521 serveixen per a més que presumir; desafien la nostra comprensió sobre la formació dels forats negres i serveixen com a laboratori únic per entendre el funcionament de la gravetat.

Produint grans forats negres

Els astrònoms classifiquen els forats negres en funció de la seva massa. Aquesta classificació resulta útil ja que els forats negres als diferents extrems d'aquest espectre de masses es formen de moltes maneres diferents.

Al centre de la majoria, si no totes, les grans galàxies s'hi troba un forat negre supermassiu amb una massa que varia des de centenes de mils fins a mils de milions de vegades la massa del Sol.

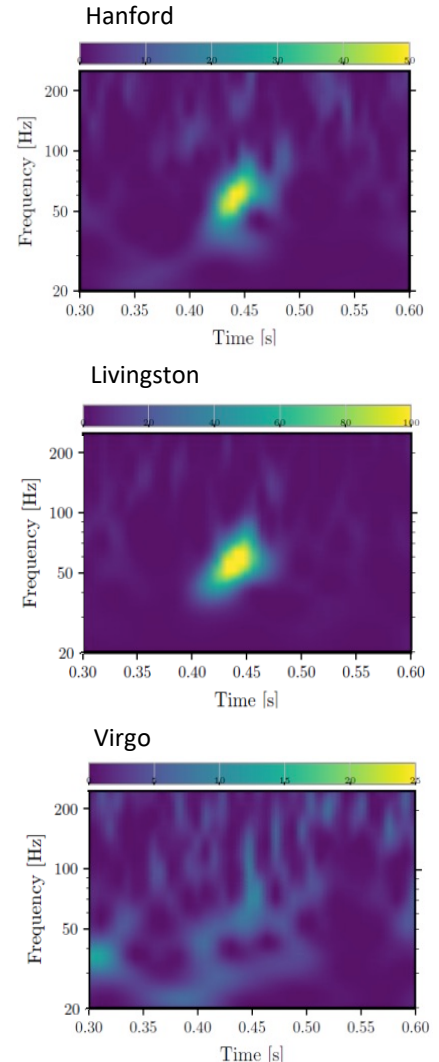


Figura 1. Representació de la freqüència en funció del temps de les dades que contenen el senyal GW190521, observat per LIGO Handford (figura superior), LIGO Livingston (figura central) i Virgo (figura inferior). Els temps es mostren relatius a les 03:02:29 UTC del 21 de maig de 2019. L'energia en un cert valor de temps i freqüència està representada per un codi de colors. Noti's l'extremadament curta durada del senyal així com el seu pic en freqüència al voltant de 60 Hz. (Adaptació de la Figura 1 del nostre [article sobre el descobriment de GW190521](#)).



Visita les nostres pàgines web:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

La nostra pròpia galàxia, la Via Làctia, alberga [al seu centre un forat negre](#) amb una massa del voltant de 4 milions de vegades la massa del Sol. La manera exacta en la qual aquests forats negres monstrosos es formen és encara una mica misteriosa. No obstant això, el procés de formació va començar probablement quan l'Univers era molt més jove, donant d'aquesta manera temps als forats negres per a créixer fins aconseguir aquesta grandària.

A l'altre extrem de l'espectre de masses s'hi troben els [forats negres de massa estel·lar](#), els quals es creu que es formaren a partir del col·lapse del nucli d'una estrella massiva, durant [explosions de Supernova](#). Els forats negres de massa estel·lar presenten masses en el rang des de unes poques fins a unes desenes de vegades la massa del Sol, i els parells d'aquests objectes constitueixen les fusions de forats negres observades fins al moment per LIGO-Virgo.

Entre els forats negres de massa estel·lar i els supermassius s'hi troba el misteriós regne dels [forats negres de massa intermèdia](#), les masses dels quals oscil·len entre 100 i aproximadament 100.000 vegades la massa del Sol. Encara que de moment no hi ha observacions conclouents de forats negres de massa intermèdia, existeixen diferents escenaris de formació. Gràcies a les millores en les capacitats d'observació de telescopis i detectors d'ones gravitacionals, la cerca de forats negres de massa intermèdia ha estat represa a fons recentment.

Basant-nos en el coneixement teòric sobre el funcionament intern dels estels massius i en els escenaris de formació de forats negres es pensa que els forats negres amb masses entre 65 i 130 vegades la massa del Sol, no poden haver estat formats després del col·lapse d'un estel. I així és com GW190521 arruïna la festa, ja que la massa del forat negre més massiu que es fusiona (el forat negre "primari") es situa justament en l'interval en el que no s'espera que els forats negres es produeixin directament per col·lapse estel·lar, i on el forat negre romanent de la fusió pot ser classificat com un forat negre de massa intermèdia.

L'observació de LIGO-Virgo de GW190521 suggereix que, o bé els estels poden formar forats negres massius, o bé que *alguns* forats negres observats per LIGO-Virgo es formen per altres mecanismes, pot ser com a resultat d'una fusió prèvia entre parells de forats negres més petits, el que obri una via de formació de forats negres fins hi tot més grans a través d'experimentar *un altre* procés de fusió de forats negres. Aquest escenari de *multi-fusió* requereix que la formació de forats negres ha d'ocórrer en entorns especials on existeixin suficients forats negres en la rodalia perquè es produeixin els múltiples processos de fusió. Els astrònoms proposen els [cúmuls estel·lars](#) densos o els discs de [nuclis galàctics actius](#) com a possibles exemples de tals entorns especials.

L'observació de GW190521 també suggereix que el terreny dels forats negres de massa intermèdia podria estar poblat en part per romanents de les fusions de forats negres de massa estel·lar. De manera similar, els forats negres supermassius podrien també formar-se mitjançant aquest mecanisme.

Posant a prova el nostre coneixement sobre la gravetat

La nostra comprensió teòrica sobre el funcionament de la gravetat està descrita per la [Teoria de la Relativitat General](#) (RG) d'Einstein. Els físics utilitzen la RG per predir les senyals d'ones gravitacionals produïdes per fusions de forats negres. Al seu torn, aquestes prediccions s'usen per a ajudar a analitzar les dades de LIGO-Virgo. Per altra banda, les observacions de senyals d'ones gravitacionals poden ser utilitzades per comprovar les prediccions de la pròpia teoria, i per buscar indicis de qualsevol desviació de la RG que puguin apuntar cap a [teories alternatives de la gravetat](#).

L'ús d'ones gravitacionals com a laboratoris de física no es res nou: les fusions de forats negres observades prèviament per LIGO-Virgo han estat utilitzades per posar a prova la nostra comprensió de la RG. Llavors, què fa que l'observació de GW190521 sigui tan especial?

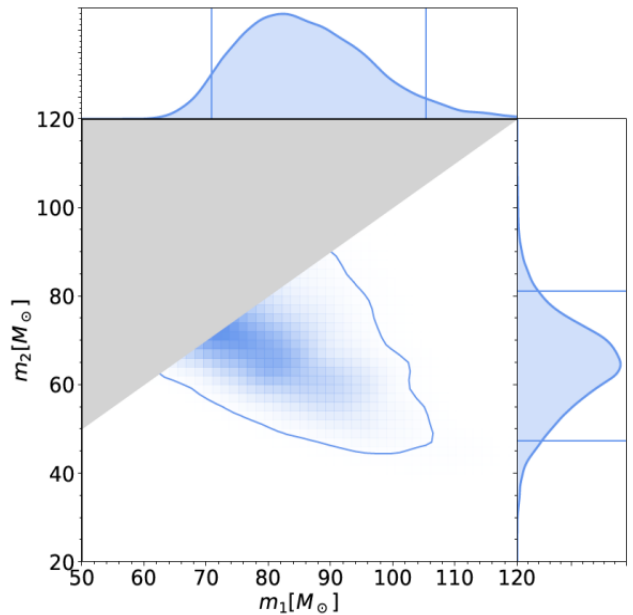


Figura 2. Masses estimades dels forats negres que van col·lidir per generar l'ona gravitacional GW190521, mostrat com a distribucions de probabilitat. Segons l'anàlisi de LIGO-Virgo, els valors reals de les masses dels forats negres presenten un 90% de probabilitat d'estar localitzats dins del contorn blau en la figura central (la qual mostra la probabilitat conjunta per ambdues masses). El mateix és cert per les línies verticals i horitzontals en la distribució amb forma de campana a les parts superior i dreta de la figura, que mostren les mesures de les masses per als forats negres individualment. La regió en gris no es considera per la convenció de LIGO-Virgo de que la massa "primària" m_1 és sempre major o igual a la massa "secundària", m_2 .

El senyal d'ona gravitacional d'una col·lisió de dos forats negres pot dividir-se en **tres fases** (veure la Figura 4): la fase en la que els dos forats negres estan encara suficientment separats i orbiten un al voltant del altre en espiral (*inspiral*, en anglès); a continuació tenim la fase de fusió, on els dos forats negres s'uneixen (*merger*, en anglès); finalment, la fase de relaxació (*ringdown*, en anglès), on el forat negre romanent "sona" com una campana colpejada abans de que torni a un estat estable final.

Tal i com s'ha esmentat abans, les ones gravitacionals procedents de forats negres s'han detectat a les dades de LIGO-Virgo en diferents finestres de temps i aconseguen el màxim d'emissió a diferents freqüències, depenent de les masses dels forats negres. Com a resultat, els detectors són sensibles a diferents parts del senyal d'ona gravitacional, depenent de les masses de sistema binari. Els senyals procedents de forats negres amb masses més petites s'observen més clarament durant les fases d'espiral i fusió. D'altra banda, les masses molt més grans dels forats negres que produïren GW190521 ens proporcionen la millor oportunitat fins al moment per estudiar l'última part de la fase de fusió i la fase de relaxació del senyal d'ona gravitacional.

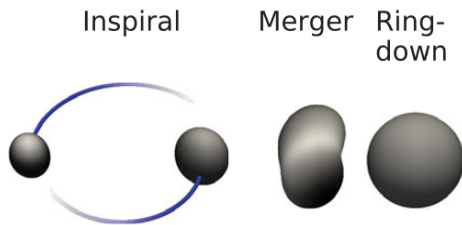


Figura 4. Representació esquemàtica de les tres diferents fases d'un senyal d'ona gravitacional procedent d'una col·lisió de dos forats negres.

A l'igual que amb tots els senyals procedents de forats negres observats fins al moment, la teoria de la RG va passar les proves basades en GW190521. Una d'aquestes proves consistí en analitzar la part del senyal deguda a la relaxació del sistema de manera separada de les fases d'espiral i de fusió, per comprovar si aquestes eren consistents entre elles. També es dugueren a terme proves buscant característiques addicionals en el senyal, predites per algunes teories alternatives de la gravetat, i es comprovaren altres per hipòtesi (per exemple, oposades de la fusió de dos forats negres) sobre la pròpia font del senyal. Cap d'aquests estudis va ser capaç de contradir la interpretació de que GW190521 prové de la fusió de dos forats negres d'acord a la física descrita a la teoria de la RG.

RESUM

L'observació del senyal de l'ona gravitacional GW190521 és un esdeveniment excepcional que ha batut rècords i que empeny els límits del nostre coneixement sobre la formació de forats negres, proporcionant una nova forma d'estudiar la gravetat en el seu règim més extrem. També suggereix l'existència d'una població de fusions de forats negres de gran massa que poden descobrir-se durant [futures campanyes d'observació de LIGO i Virgo](#).

L'anàlisi del extrem superior de la població de forats negres de massa estel·lar ens ajudarà a construir una imatge més clara dels processos que produeixen els forats negres, i els entorns en el que resideixen. GW190521 pot gaudir de la seva posició com el parell de forats negres més gran observat fins ara, però millor que no es relaxi ja que pot ser que no mantingui la seva posició per molt de temps. LIGO i Virgo seguiran buscant ones gravitacionals amb una sensibilitat encara més millorada, i futurs detectors seran molt més potents, especialment en les baixes freqüències, on s'haurien d'amagar molts més forats negres massius. Entre els nous detectors ja projectats, s'inclouen [l'Einstein Telescope](#) i el [Cosmic Explorer](#), baix terra, i [LISA](#), a l'espai. Els rècords estan fets per rompre'ls!

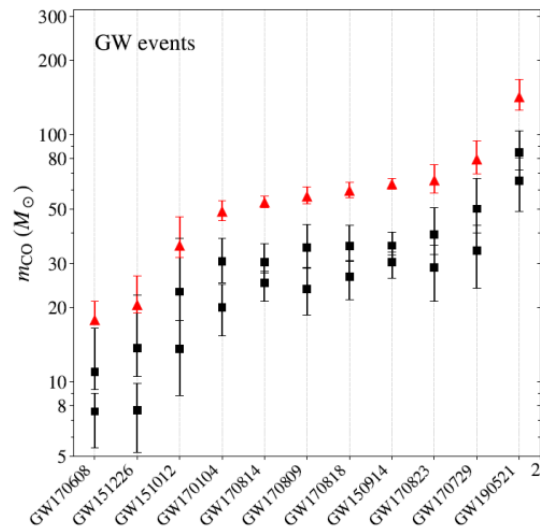


Figura 3. Gràfica que mostra les masses individuals dels forats negres de GW190521 (quadres en negre), en comparació amb les masses d'altres fusions de forats negres detectades durant els dos primers períodes d'observació, O1 i O2, de LIGO i Virgo. Per cada esdeveniment la massa del romanent després de la fusió s'indica amb un triangle vermell. A tots els casos la longitud de la barra vertical representa l'interval d'incertesa en l'estimació de la massa. Les masses excepcionals de GW190521 estan clarament fora d'aquest gràfic. (Adaptació de la Figura 10 del nostre article sobre [implicacions astrofísiques de GW190521](#).)

PER A SABER MÉS:

Visita les nostres pàgines web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

Llegeixi les notes de premsa de LIGO i Virgo sobre el descobriment de GW190521:

www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf

<http://www.virgo-gw.eu/GW190521>

Llegeixi l'article company de lliure accés que descriu el descobriment de GW190521:

<https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

Llegeixi l'article científic company que descriu les implicacions astrofísiques de GW190521:

<https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

Les dades de GW190521 estan disponibles en el Gravitational-Wave Open Science Centre: [aquí](#).