

GWTC-2: UN CATÀLEG ESTÈS DE DETECCIONS D'ONES GRAVITACIONALS

Presentem GWTC-2 (sigles de “*Gravitational-Wave Transient Catalog 2*”, o “Catàleg d'Ondes Gravitacionals Transitòries 2”), un catàleg actualitzat de les ones gravitacionals detectades pels observatoris de [LIGO](#) i [Virgo](#) des de la seva primera observació al 2015 fins al final de O3a, la primera meitat del tercer període d'observació. O3a va tenir lloc des de l'1 d'abril a l'1 d'octubre de 2019, i va afegir 39 esdeveniments d'ones gravitacionals a la llista dels 11 esdeveniments ja confirmats a [GWTC-1](#), la qual cosa fa un total de 50 esdeveniments a GWTC-2. Els descobriments a O3a cobreixen un ampli rang de paràmetres astrofísics, i presenten fonts consistents amb la fusió de sistemes binaris de forats negres (BBH, per les seves sigles en anglès, *Binary Black Holes*), sistemes binaris d'estels de neutrons (BNS, per les seves sigles en anglès, *Binary Neutron Stars*), i sistemes binaris de forats negres i estels de neutrons (NSBH, per les seves sigles en anglès, *Neutron Star - Black Hole*).

És important destacar que durant O3a s'han confirmat al voltant de 3 vegades més deteccions d'esdeveniments d'ones gravitacionals respecte als dos períodes d'observació previs (O1 i O2) junts. A més, el detector Virgo ha acompanyat als dos detectors LIGO durant tot O3a, amb almenys un detector actiu el 97% del temps, i amb almenys dos detectors actius el 82% del temps. Alguns esdeveniments especialment interessants de O3a inclouen la segona observació d'ones gravitacionals consistent amb la fusió d'un sistema binari d'estels de neutrons, els primers esdeveniments amb masses inequívocament diferents, i un sistema binari de forats negres molt massiu, amb una massa total pròxima a 150 vegades la massa del Sol. En aquest resum descrivim les millores a LIGO i Virgo que han fet això possible, així com la rellevància d'aquests esdeveniments en el camp de l'astrofísica.

DETECTANT ONES GRAVITACIONALS

Els 39 descobriments d'O3a són el resultat de diverses millores en els observatoris LIGO i Virgo, d'un augment en la qualitat de les dades, i de la varietat d'algoritmes de cerca d'ones gravitacionals. [Recents millores](#) en la instrumentació per a reduir el soroll i augmentar la sensibilitat inclouen làsers més potents, miralls nous i millorats, i un millor control de la llum dispersa. Aquests canvis han portat a un augment en els rangs de freqüència i distància per als tres detectors, estenent així la nostra visió de l'univers. Considerant els tres detectors, la **mitjana*** del rang en el qual podem observar una fusió d'estels de neutrons típica ha augmentat al voltant d'un 63% d'O2 a O3a, com es mostra en la [Figura 1](#).

Un altre pas vital per al descobriment de fonts d'ones gravitacionals és el refinat de les dades que arriben directament dels detectors. Aquest [procés de condicionament de les dades](#) comprèn el calibrat de les dades, la sostracció de soroll, i l'eliminació dels sorolls transitoris (*glitches*, en anglès).

Primer, i gairebé a temps real per a les deteccions inicials, calibrem les variacions de potència òptica mesurades en els detectors per a obtenir una magnitud adimensional de la deformació detectada (*strain*, en anglès). Després, recalibram les dades per a reduir l'error sistemàtic, i eliminem el soroll per a augmentar encara més el rang en el qual podem detectar fonts d'ones gravitacionals, revelant així senyals més febles en les dades.

El problema més comú en l'anàlisi de dades d'ones gravitacionals, relacionat amb la qualitat de les dades, són els *glitches*. Són senyals transitoris de soroll de curta durada, algunes de les quals poden ser produïdes pel disparador mecànic d'una càmera, o per la llum dispersa en el feix del làser. Unes altres, no obstant això, tenen un origen més misteriós, com els *glitches* de banda ampla i durada breu, coneguts com *blips*. Una forma en la qual identifiquem i classifiquem *glitches* en les dades de LIGO i Virgo és a través de la plataforma Gravity Spy, amb l'ajuda de milers de científics ciutadans (consulta com pots ajudar-nos a identificar *glitches* amb [Gravity Spy](#)). Després d'identificar els *glitches* més significatius en les dades, apliquem un mètode de sostracció per a eliminar-los dels candidats a ones gravitacionals, com es mostra en la [Figura 2](#). Vuit dels 39 esdeveniments observats a O3a es van beneficiar d'aquest mètode de sostracció de *glitches* com un *pre-processament* previ a l'anàlisi d'estimació de paràmetres.

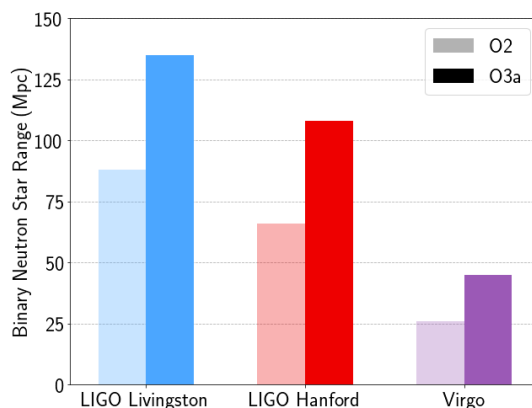


Figura 1: La mitjana del rang d'observació d'un Sistema binari d'estels de neutrons per cada detector durant el segon període d'observació (O2), comparada amb la primera meitat del tercer període d'observació (Oa3).

Nota: 1 megaparsec (Mpc) és al voltant de 3.26 milions d'anys llum.

(Crèdits: LIGO-Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee.)

* Pots trobar les definicions d'alguns termes en negreta al Glosari que es troba a l'última pàgina.

En la cerca d'ones gravitacionals, la identificació dels candidats es produeix en dues escales de temps. En primer lloc, diversos algorismes de cerca processen les dades de manera immediata, amb la finalitat de generar [alertes públiques de detecció](#) en qüestió de minuts. Posteriorment, les dades es tornen a analitzar per a produir la llista de candidats d'aquest catàleg, usant un calibratge de dades millorat, una avaluació de la qualitat de les dades, i millors mètodes per a calcular la significació estadística. Per a decidir quins candidats considerar, establim un llindar en la taxa de falsos positius de dos esdeveniments per any, el ritme al qual esperem observar un esdeveniment com el considerat, però generat fortuïtament a causa del soroll. Dels 39 esdeveniments de O3a, 26 havien estat anunciats prèviament en les alertes de detecció gairebé en temps real, mentre que els altres 13 es presenten en el catàleg GWTC-2 per primera vegada.

A GWTC-2 hem introduït una nomenclatura revisada per als esdeveniments d'ones gravitacionals anunciats. La convenció prèvia d'usar únicament la data d'observació es manté per als esdeveniments publicats prèviament, incloent els més recents GW190412, GW190425, GW190521 i GW190814. Els nous esdeveniments de GWTC-2, no obstant això, porten afegit el temps UTC de la seva detecció; per exemple, GW190701_203306 (veure **Figura 2**) va ser detectat a les 20.33:06 UTC l'1 de juliol de 2019. D'aquesta manera, és possible tenir noms específics per a diversos esdeveniments detectats el mateix dia, alguna cosa que va ocórrer tres vegades durant O3a.

MESURANT PARÀMETRES ASTROFÍSICS

Investiguem la naturalesa astrofísica de cada esdeveniment a través d'un procés anomenat estimació de paràmetres, que revela els valors de diferents propietats astrofísiques característiques de cada esdeveniment. Mesurem *paràmetres extrínsecs* que descriuen la relació entre un sistema binari i nosaltres a la Terra, com la distància a la font, la localització de la font en el cel, i l'orientació del sistema binari des del nostre punt de vista com a observadors. També mesurem *paràmetres intrínsecs*, propietats com les masses i espins de cada **objecte compacte** del sistema binari. A partir dels paràmetres de l'esdeveniment calculem les **formes d'ona gravitacionals**, que representen l'evolució temporal de la deformació deguda a una ona gravitacional. Posteriorment comparem aquesta predicció amb les dades mesurades a LIGO i Virgo, tenint en compte qualsevol soroll present en els detectors. A través d'aquestes tècniques d'estimació de paràmetres produïm [interval·ls de credibilitat](#) del 90%, que representen l'interval de valors raonablement consistents amb les dades.

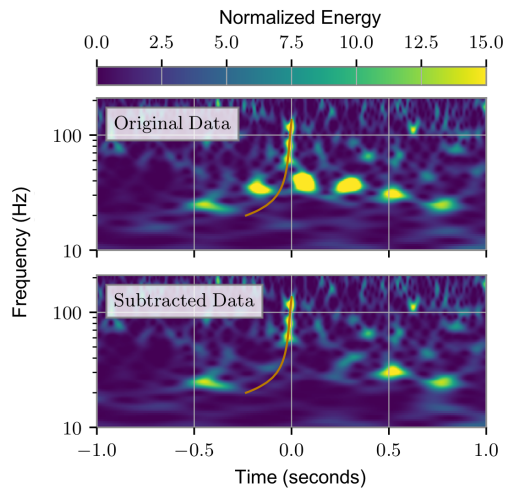


Figura 2: Les dades temps-freqüència de l'esdeveniment GW190701_203306 abans i després de la sostracció de glitches. En aquest cas, la llum dispersa en el detector LIGO Livingston va generar un glitch en forma d'excés de soroll a freqüències menors de ~40 Hz. (Adaptat de la Fig. 5 del nostre [article](#).)

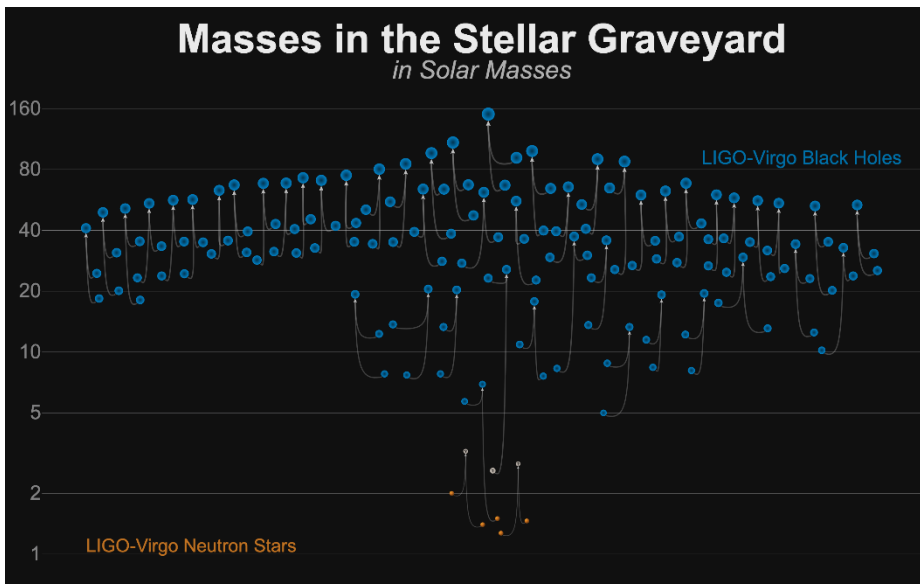


Figura 3: Una col·lecció de masses per a un ampli rang d'objectes compactes. En la gràfica es mostren forats negres (blau), estels de neutrons (taronja), i objectes compactes de naturalesa incerta (grisa) detectats mitjançant ones gravitacionals. Cada fusió de sistemes binaris d'objectes compactes correspon a tres d'aquests objectes: els dos objectes que es fusionen i el romanent final de la fusió. (Crèdits: LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern).

Els nostres 39 esdeveniments cobreixen un ampli rang de masses, codificant abundant informació sobre la història i la formació dels forats negres i estels de neutrons en l'univers. Els senyals d'ones gravitacionals generades molt abans de la fusió depenen principalment d'una combinació especial de les masses individuals dels components, anomenada “**massa de refilada**” (*chirp mass*, en anglès). Altres paràmetres importants relacionats amb la massa inclouen la **massa total** de cada sistema binari (la suma de les masses dels components), i la **raó de masses**, que representa la raó de la massa de l'objecte compacte més lleuger i la del més massiu.

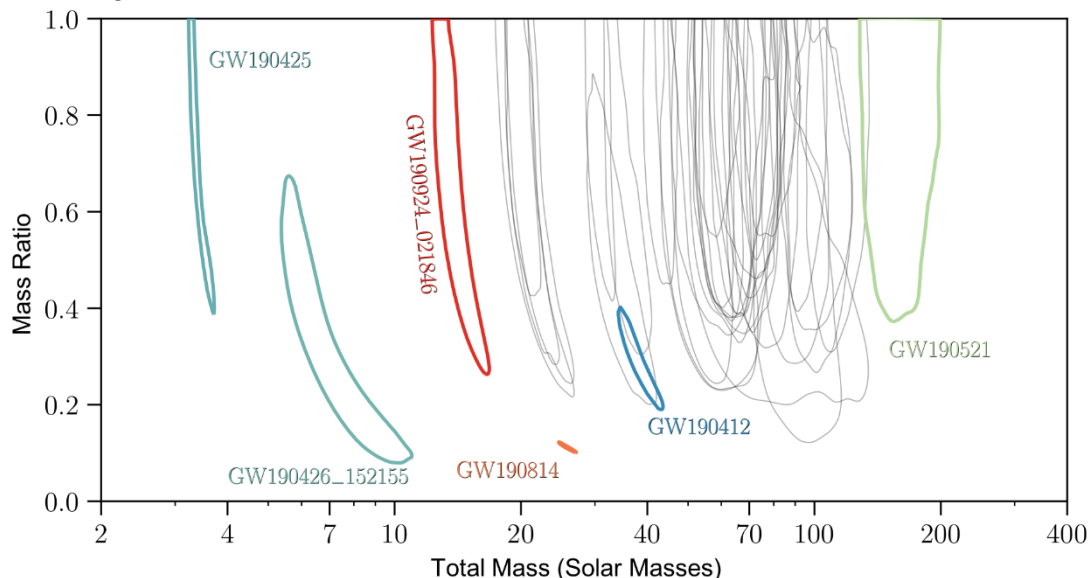


Figura 4: Estimacions de la raó de masses i la massa total per a tots els esdeveniments detectats durant O3a. Els contorns representen els intervals de credibilitat del 90%. Sis esdeveniments únics apareixen destacats. (Adaptat de la Fig. 6 del nostre [article](#).)

DESCOBRIMENTS EXEPCIONALS DE O3a

La **Figura 3** il·lustra la diversitat de les masses a GWTC-2, el rang de les quals comprèn des d'estels de neutrons d'aproximadament 1.4 masses solars fins a forats negres que ronden les 150 masses solars. Les **Figures 4 i 5** destaquen els següents vuit esdeveniments, quatre d'ells descrits en publicacions individuals:

- [GW190412](#): el primer sistema BBH amb masses inequívocament diferents, que a més mostra evidències d'harmònics d'ordre superior
- [GW190425](#): el segon esdeveniment d'ones gravitacionals consistent amb un sistema BNS després de [GW170817](#)
- [GW190426_152155](#): esdeveniment de baixa massa consistent amb un sistema NSBH o un sistema BBH
- [GW190514_065416](#): sistema BBH amb l'espín alineat efectiu més petit de tots els esdeveniments d'O3a
- [GW190517_055101](#): sistema BBH amb l'espín alineat efectiu més gran de tots els esdeveniments d'O3a
- [GW190521](#): sistema BBH amb una massa total superior a 150 vegades la massa del Sol
- [GW190814](#): un sistema altament asimètric de naturalesa ambigua, que correspon a la fusió d'un forat negre de 23 masses solars amb un objecte compacte de 2.6 masses solars, que pot ser el forat negre més lleuger o l'estrella de neutrons més massiva mai observats en un sistema binari d'objectes compactes
- [GW190924_021846](#): probablement el sistema BBH amb la massa més baixa, sent la massa dels dos components superior a 3 masses solars

A més, GWTC-2 inclou esdeveniments que cobreixen l'anomenat “buit en la part inferior de la distribució de masses”, entre 2.5 i 5 masses solars. Durant molts anys, els astrofísics han teoritzat sobre l'existència d'aquest “buit”, a causa de l'escassetat d'observacions en aquest rang de masses. No obstant això, durant O3a han aparegut objectes possiblement situats en aquest “buit”, com les components més lleugeres tant de [GW190814](#) com de [GW190924_021856](#).

Com es veu en la **Figura 4**, [GW190521](#) conté la massa total més gran observada a O3a, que doblega pràcticament la massa de [GW170729](#), el sistema BBH més massiu de [GWTC-1](#). A més, és probable que [GW190521](#) contingui el forat negre individual més massiu detectat mitjançant ones gravitacionals avui dia, amb una massa superior a 90 masses solars. Alguns altres esdeveniments podrien tenir masses totals per sobre de 100 masses solars, incloent [GW190519_153544](#), [GW190602_175927](#), i [GW190706_222641](#).

GWTC-2 presenta sistemes binaris amb masses més diferents que qualsevol font present a GWTC-1, com GW190412 i GW190814, tots dos originats d'una fusió d'un forat negre amb un company més lleuger. Les fusions asimètriques amplifiquen el to dels harmònics d'ordre superior, com es veu en la detecció de [GW190412](#). Aquest catàleg actualitzat inclou altres preeses de l'astronomia d'ones gravitacionals, com l'esdeveniment més llunyà observat fins avui, així com nou esdeveniments localitzats en una regió més petita de l'1% de l'àrea total del cel, tots ells pertanyents a O3a.

Els espins revelen més informació sobre l'evolució dels sistemes binaris d'objectes compactes. Els espins estan relacionats amb el [moment angular](#) d'un cert objecte compacte, i varien des d'una rotació nul·la fins a una rotació màxima. Típicament, els espins es mesuren mitjançant un paràmetre anomenat "espín alineat efectiu", una combinació particular dels espins de cada component del sistema abans de la fusió. La **Figura 5** mostra l'espín alineat efectiu mesurat respecte a la massa de refilada per a cada esdeveniment. Un espín alineat efectiu negatiu indica espins no alineats, donant a entendre que el sistema binari va poder haver-se format en un entorn dens, com un [cúmul globular](#). Com es destaca en la **Figura 5**, és probable que GW190517_055101 tingui el major espín alineat efectiu.

A GWTC-2 no s'ha identificat cap valor clarament negatiu, encara que és probable que GW190514_065416 posseeixi l'espín alineat efectiu més petit. D'altra banda, els espins també poden revelar proves de la presència de [precessió](#) en un sistema binari; GWTC-2 conté esdeveniments que podrien donar suport a una lleugera evidència de precessió, com són GW190412 i GW190521.

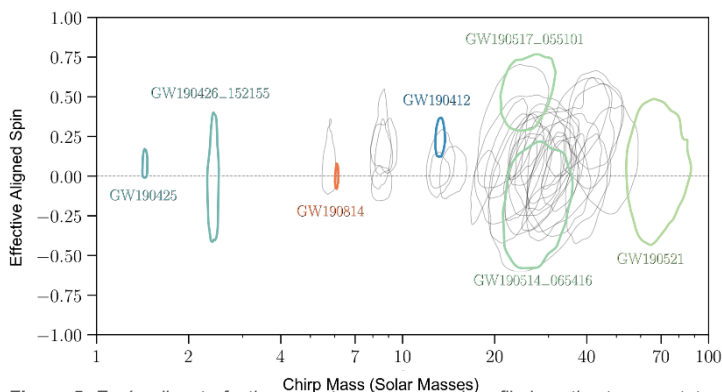


Figure 5: Espín alineat efectiu respecte a la massa de refilada estimats per a tots els esdeveniments d'O3a. Els contorns representen intervals de credibilitat del 90%. (Adaptat de la Fig. 7 del nostre [article](#).)

UN FUTUR BRILLANT PER L'ASTRONOMIA D'ONES GRAVITACIONALS

Per molt irreal que sembli, la detecció d'ones gravitacionals s'ha convertit ja en un fet habitual, després de només cinc anys després de la [primera detecció](#), al setembre de 2015. Ara, amb 50 deteccions d'ones gravitacionals confirmades, som capaços d'estudiar millor les poblacions de forats negres i estels de neutrons en l'univers (vegeu [aquest resum](#)). Aquestes noves observacions d'ones gravitacionals també augmenten el nostre coneixement sobre la Teoria de la Relativitat General (vegeu [aquest resum](#)).

El futur de l'astronomia d'ones gravitacionals és cada vegada més prometedor després d'haver sumat 39 esdeveniments durant els primers sis mesos del tercer període d'observació O3. Les anàlisis de la segona meitat d'O3, anomenada O3b, estan actualment en marxa, i augmentaran el nostre creixent catàleg d'ones gravitacionals transitòries. Després d'O3, els detectors se sotmetran a una sèrie de millores d'enginyeria amb l'objectiu d'augmentar encara més la seva capacitat per a observar esdeveniments astrofísics, a temps per a l'inici del quart període d'observació. Mentre esperem a les millores instrumentals i a la construcció de nous detectors, la comunitat d'ones gravitacionals continuarà explorant la naturalesa dels forats negres i les estrelles de neutrons al llarg de l'univers.

GLOSSARI

Massa de refilada: combinació matemàtica de les masses de cadascun dels objectes compactes d'un sistema binari. La massa de refilada defineix l'augment en freqüència característic durant la fusió per a sistemes binaris de baixa massa.

Objecte compacte: objecte astrofísic extremadament dens, com un forat negre, una nana blanca o una estrella de neutrons.

Forma d'ona gravitacional: representació de l'evolució temporal d'un senyal d'ona gravitacional.

Raó de masses: ràtio de la massa del component més lleuger entre la massa del component més massiu.

Mitjana: valor situat exactament en el mitjà d'una distribució, de tal forma que la meitat dels altres valors està situada per damunt i l'altra meitat per sota d'ella.

Estimació de paràmetres: tècniques estadístiques usades per a inferir els paràmetres astrofísics corresponents a un senyal d'ona gravitacional.

Massa solar: la massa del Sol. S'usa de manera comuna en astronomia com a unitat de massa.

Deformació (strain): el canvi en la longitud del braç del detector degut a la deformació de l'espai-temps després del pas d'una ona gravitacional a través del detector, dividit entre la longitud total del braç.

PER SABER-NE MÉS:

Visita les nostres pàgines web:

<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Llegeix un preprint gratuït de l'article científic complet (en anglès): <https://dcc.ligo.org/P2000061/public>

Les dades dels 39 events descoberts a O3a estan disponibles a través del portal GWOSC, a:

<https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2/>

La pàgina web de GWOSC inclou documentació útil, exemples de codi i tutorials que serveixen de guia per explorar aquests conjunts de dades públiques.



Visita les nostres webs:

<http://www.ligo.org>

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

