

UNA NOVA FONT D'ONES GRAVITACIONALS: SISTEMES BINARIS D'UN ESTEL DE NEUTRONS I UN FORAT NEGRE

QUÈ HEM DESCOBERT?

Dia 5 de gener de 2020, el [detector Advanced LIGO](#), a [Livingston](#) (Louisiana, EUA), i el [detector Advanced Virgo](#), a Itàlia, observaren ones gravitacionals consistents amb un tipus de sistema astronòmic completament nou. Les ones gravitacionals es produïren pel final de dos dels objectes més extrems de l'univers girant l'un al voltant de l'altre: un, un [estel de neutrons](#), i l'altre, un [forat negre](#). LIGO i Virgo observaren les darreres òrbites ([fase d'espiral](#)), seguides de la fusió de l'estel de neutrons amb el forat negre. Sorprenentment, tan sols 10 dies després, fou observat, aquesta vegada pels dos detectors Advanced LIGO detectors (a Livingston i també a Hanford, Washington) i pel detector Virgo, un segon senyal d'ona gravitacional procedent de la fase d'espiral i la fusió d'un estel de neutrons amb un forat negre,. Aquesta és la primera vegada que s'han observat ones gravitacionals procedents d'una combinació d'estels de neutrons i forats negres (vegeu la [figura 1](#)). Abans d'aquest nou descobriment, les ones gravitacionals observades procedien de fusions de parells de forats negres i de parells d'estels de neutrons. Els nostres nous descobriments han estat anomenats **GW200105** i **GW200115**.

Aquests dos descobriments representen les primeres deteccions de sistemes d'estels de neutrons i forats negres (ENFN). Durant algunes dècades, s'havia predit l'existència dels sistemes ENFN, però no se'n tenia cap evidència observacional convincent fins ara. Amb l'observació d'ENFN, hem vist finalment els tres tipus de sistemes binaris que poden formar-se amb forats negres i estels de neutrons. Els sistemes formats per forats negres i estels de neutrons reben el nom de [sistemes d'objectes compactes](#). Aquests nous descobriments, juntament amb les futures observacions de sistemes d'objectes compactes, ajudaran a saber més coses del naixement, la vida i mort dels estels, així com sobre els entorns en els quals es formen.

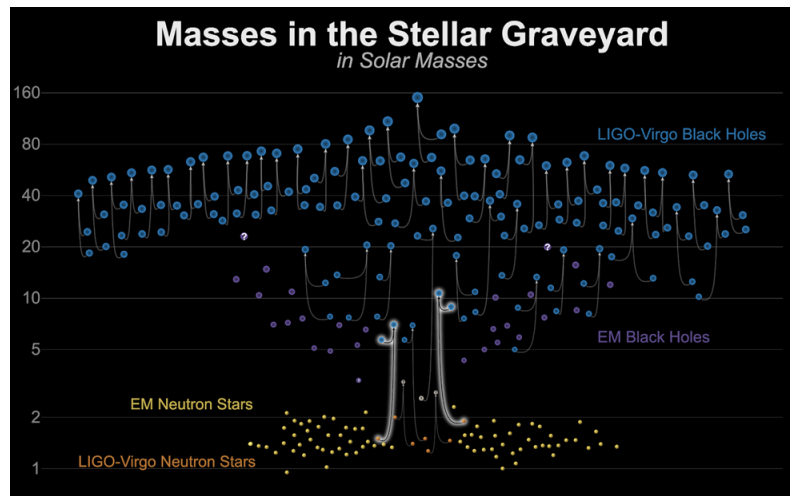


Figura 1: masses d'estels de neutrons i forats negres detectats a través d'ones gravitacionals i observacions electromagnètiques. Els cercles grocs i porpres representen les observacions electromagnètiques d'estels de neutrons i forats negres, respectivament, mentre que els cercles taronges i blaus són les corresponents deteccions utilitzant ones gravitacionals. Els nostres senyals, GW200105 i GW200115, estan destacats i corresponen a les fusions d'estels de neutrons amb forats negres. (Crèdit de la imatge: LIGO-Virgo & Frank Elavsky, Aaron Geller, Northwestern University.)

DETECTAM SENYALS D'ONES GRAVITACIONALS

La cerca de senyals d'ones gravitacionals a les dades registrades pels detectors utilitza un [filtre adaptat](#) (*matched filtre*, en anglès). Aquest mètode compara les dades observades amb soroll amb prediccions de senyals a partir de la [relativitat general](#) d'Einstein. El filtre adaptat pot identificar senyals d'ones gravitacionals procedents de dades amb soroll d'una manera similar a com podem distingir instruments individuals en una peça musical. Considerem que GW200115 és un senyal d'ona gravitacional d'origen astrofísic amb un nivell de confiança molt elevat, amb una possibilitat que es degui a soroll aleatori a les dades per sota d'**1 esdeveniment en 100.000 anys**. La naturalesa astrofísica de GW200105 és més complexa d'establir estadísticament, però clarament sobresurt per sobre de tots els efectes de soroll mai vists, i considerem que la possibilitat que un senyal així es degui a soroll està per sota d'**1 esdeveniment en 2,8 anys**.

Visita les nostres pàgines

web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Les fusions de ENFN poden, en principi, produir llum en tot l'[espectre electromagnètic](#). Desafortunadament, la posició en el cel de les fonts s'ha pogut mesurar només de manera molt imprecisa, dins una àrea del cel entre 2.400 i 29.000 vegades la grandària de la lluna plena. Tenint en compte, a més, la gran distància a la qual es trobava la font (ho comentam amb més detall més a baix), això feia bastant improbable l'observació de llum en l'espectre electromagnètic, i no se n'ha observat cap. Les futures observacions de fusions d'ENFN podrien produir llum observable, la qual cosa probablement podria revelar com el forat negre «distorciona gravitatòriament» (esqueixa) l'estel de neutrons. Això podria proporcionar informació sobre la forma extrema de la matèria que forma els estels de neutrons.

PROPIETATS DE LES FONTS

Les ones gravitacionals codifiquen informació valuosa sobre el seu origen, com per exemple les masses del forat negre i l'estel de neutrons. El forat negre i l'estel de neutrons que van donar lloc a GW200105 eren d'aproximadament 8,9 vegades i 1,9 vegades més massives que el nostre Sol (amb massa representada per M_{\odot}), respectivament. L'esdeveniment GW200105 va ocórrer fa aproximadament 800 milions d'anys, centenars de milions d'anys abans que els primers dinosaures apareguessin a la Terra. Per a l'esdeveniment GW200115, estimam que el forat negre i l'estel de neutrons tenien masses al voltant de $5.7 M_{\odot}$ i $1.5 M_{\odot}$ respectivament, i la seva fusió va succeir al voltant de fa mil milions d'anys. Les masses estan representades a la **figura 2**.

Trobam que la rotació del forat negre per a GW200105 podria estar entre 0 i fins a un 30% de la rotació màxima dels forats negres, mentre que, per a GW200115, la rotació se situa entre 0 i un 80% de la rotació màxima. No tenim proves contundents de la rotació de l'estel de neutrons, ja que les nostres mesures no hi són sensibles (vegeu la **figura 3**).

Per què pensem que hem observat un sistema ENFN? Per a produir les ones gravitacionals observades, els objectes han de ser molt compactes i densos en comparació amb els estels típics, perquè, en cas contrari, es farien trossos abans de la fusió. Atès que les masses dels objectes més massius en

tots dos sistemes binaris són de $8,9 M_{\odot}$ i $5,7 M_{\odot}$, els únics objectes coneguts que podrien associar-se a aquestes masses són forats negres. Les masses dels objectes més lleugers estan al voltant de $1,9 M_{\odot}$ i $1,5 M_{\odot}$, molt més lleugers que qualsevol forat negre conegut. Aquestes masses són consistents amb estels de neutrons coneguts, com les que s'han observat a la Via Làctia, o empleant ones gravitacionals (p.ex., [GW170817](#)). Les masses dels forats negres són consistents amb les prediccions de models de formació i evolució estel·lar.

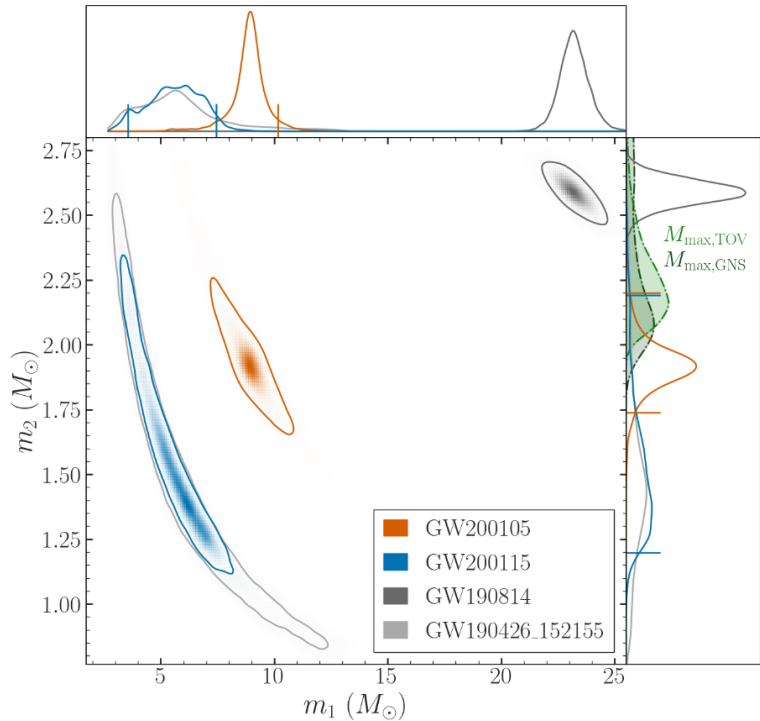


Figura 2: resum de la nostra informació sobre les masses dels objectes que van originar GW200105 i GW200115. L'eix horitzontal representa la massa de l'objecte més massiu (el forat negre), mentre que l'eix vertical representa la massa de l'objecte més lleuger (l'estrella de neutrons). La regió ombrejada indica les combinacions de masses consistents amb les dades, en taronja per al primer esdeveniment, i en blau per al segon. Les zones ombrejades més fosques indiquen major concordança, és a dir, més probabilitat per a aquestes combinacions de masses. El gràfic a la part superior resumeix la informació corresponent a les masses dels forats negres; per exemple, la corba blava mostra que el forat negre de GW200115 tenia una massa entre unes $3,5 M_{\odot}$ i unes $7,5 M_{\odot}$. El gràfic a la part dreta resumeix la informació corresponent a les masses dels estels de neutrons; per exemple, la corba taronja indica que l'estel de neutrons de GW200105 tenia una massa entre $1,75 M_{\odot}$ i $2,2 M_{\odot}$. Les regions ombrejades en verd a la part dreta resumeixen també la informació astronòmica disponible actualment sobre com de massius poden ser els estels de neutrons, i mostren que els nostres objectes observats tenen masses prou petites per ser estels de neutrons. La figura també mostra informació sobre dos descobriments anteriors d'ones gravitacionals anteriors: GW190814, que és probablement la fusió d'un forat negre de $23 M_{\odot}$ amb un altre forat negre de $2,5 M_{\odot}$ (el més lleuger mai observat); i GW190426_152155, un senyal que sembla un sistema *ENAN, però que és tan feble que no és clar si té origen astrofísic.

COM ES FORMAREN, I AMB QUINA FREQUÈNCIA SUCCEEIX?

Com es formaren aquests sistemes ENFN? Hi ha dues possibilitats principals. La primera comença amb dos estels girant un al voltant de l'altre. Els estels tenen masses tals que en envellir eventualment esclaten en explosions de supernova, deixant com a romanent un forat negre i un estel de neutrons. Aquesta opció rep el nom de «evolució binària aïllada». L'altra possibilitat és que els estels de neutrons i els forats negres es formin per separat en explosions de supernova no relacionades, i només després es trobin tots dos objectes. Aquesta opció rep el nom de "interacció dinàmica", i pot ocórrer en els entorns estel·lars densos, com els [cúmul·s globulars](#). Per a distingir entre aquestes dues possibilitats, les orientacions de les rotacions dels forats negres proporcionen un indicatiu clar. A l'evolució binària aïllada, la direcció de rotació dels forats negres tendeix a alinear-se amb l'òrbita del sistema binari, és a dir, esperam que l'estel de neutrons orbiti en el pla equatorial del forat negre. En canvi, a l'escenari de la interacció dinàmica, no hi ha una preferència per cap direcció particular de rotació, i, per tant, l'òrbita de l'estel de neutrons podria tenir qualsevol orientació relativa al pla equatorial del forat negre.

Les rotacions inferides dels forats negres de GW200105 no ens permeten distingir entre aquests escenaris de formació. No obstant això, per a GW200115, trobam que molt probablement la direcció de rotació del forat negre és oposada a la direcció de l'òrbita del sistema binari. Per exemple, si l'estel de neutrons orbita al voltant del forat negre en sentit horari, el forat negre giraria sobre el seu eix en sentit antihorari. Això ens dona una pista que la font de GW200115 podria haver-se format en un entorn dens, com un cúmul globular.

Quants sistemes ENFN a l'univers es fusionen en un període determinat de temps? L'observació de dos sistemes ENFN ens indica que entre 5 i 15 d'aquests sistemes es fusionen per any dins una distància de mil milions d'anys llum. A més, aquesta estimació de la taxa de fusions podria ser explicada tant únicament per l'evolució binària aïllada com únicament per la interacció dinàmica en cúmul·s d'estels joves, però no podem descartar cap escenari específic.

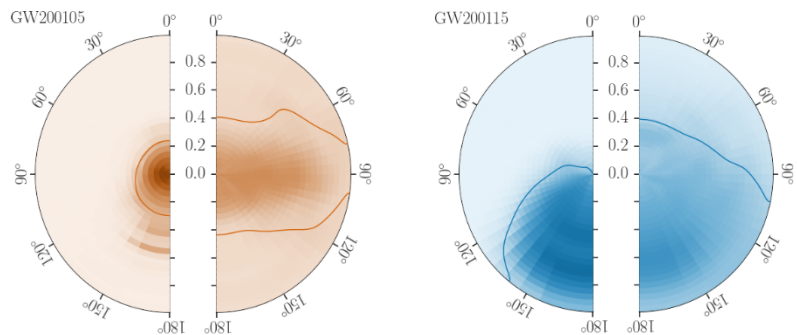


Figura 3: intensitat i direcció de la rotació inferida dels forats negres (discos a l'esquerra) i estels de neutrons (discos a la dreta) de GW200105 i GW200115. El radi del disc indica la intensitat de la rotació, i varia entre 0 (no hi ha rotació) i 1 (màxima rotació dels forats negres). La direcció de rotació es mostra com un angle que varia entre 0° (objectes girant en la mateixa direcció que l'òrbita del sistema binari) i 180° (objectes girant en direcció oposada a l'òrbita del sistema binari). Les zones ombrejades indiquen els valors probables de la intensitat i direcció de la rotació. El disc més a l'esquerra té zones ombrejades més intenses prop del centre, la qual cosa indica que el forat negre de GW200105 té una rotació que és probablement molt petita. La zona ombrejada del segon disc s'estén cap avall, la qual cosa indica que el forat negre de GW200115 podria girar en sentit oposat al moviment orbital.

PER SABER-NE MÉS:

Visita les nostres pàgines web:

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

Llegeixi una versió accessible i gratuïta de l'article científic complet [aquí](#).

Traducció al català per Alicia Sintes, Cristina Martí i Rodrigo Tenorio (a partir de la versió original en anglès a https://www.ligo.org/science/Publication-NSBH_Discovery)

GLOSSARI

Fase d'espiral: moviment orbital d'objectes en un sistema binari com, per exemple, un sistema d'un estel de neutrons i un forat negre. A mesura que el sistema binari perd energia per l'emissió d'ones gravitacionals, l'estel de neutrons i el forat negre orbiten més i més aviat, i s'acosten de cada vegada més, fins a que arriben a fusionar-se.

Estel de neutrons: relíquia d'un estel massiu que ha arribat al final de la seva vida. Quan un estel massiu ha esgotat el seu combustible nuclear, mor d'una manera catastròfica, una supernova, que sovint acaba amb la formació d'un estel de neutrons: un objecte tan massiu i dens que els àtoms no poden mantenir-ne l'estructura tal i com normalment es troben en la Terra. Aquests estels són tan massius com el nostre Sol, però només tenen diverses desenes de quilòmetres de diàmetre.

Forat negre: regió de l'espai-temps amb una gravetat tan intensa que evita que qualsevol cosa, fins i tot la llum, fugi. Els [forats negres](#) tenen grandàries diferents: els [forats negres de massa estel·lar](#) s'originen en els col·lapses estel·lars i les seves masses varien entre unes poques masses solars i al voltant de 65 masses solars; els [forats negres de massa intermèdia](#) varien entre unes 100 masses solars i 10⁶ masses solars; finalment, els [forats negres supermassius](#) varien entre més de 10⁶ masses solars i més de 10⁹ masses solars.

Sistema binari compacte: Sistema format per dos romanents estel·lars, p. ex., estels de neutrons i forats negres, que giren l'un al voltant de l'altre molt propers.

Filtrat adaptat: tècnica per a detectar senyals enterrats dins dades sorolloses. Les plantilles de senyals d'ona gravitacional calculades a partir de la relativitat general són escanejades en totes les dades, i avisen quan patrons comparables apareixen en les dades.

Relativitat general: teoria de la gravetat proposada per Albert Einstein l'any 1915. En aquesta teoria, espai i temps són un teixit mal·leable que es deforma en presència de matèria i energia, on els objectes segueixen les trajectòries a través d'aquest espai corbat.

Cúmul globular: grup molt dens d'esteles lligades gravitacionalment.

Espectre electromagnètic: la llum visible varia de vermella a violeta, però fora d'aquest rang de colors que els nostres ulls poden veure, l'espectre continua. Més enllà del vermell tenim l'infraroig, les microones i les ones de ràdio, i més enllà del violeta tenim l'ultraviolat, els raigs X i els raigs gamma. Aquest és l'espectre de la radiació electromagnètica, i els astrònoms utilitzen cada part de l'espectre per aprendre més sobre l'univers. Tota la radiació electromagnètica ve donada per oscil·lacions dels camps elèctric i magnètic, i es diferencien en la seva freqüència o longitud d'ona (la grandària d'una oscil·lació).

Any llum: Unitat de distància equivalent a la distància que la llum recorre en un any. Un any llum és aproximadament igual a 9,46 bilions de quilòmetres (o devers 5,88 bilions de milles).

Mo (massa solar): massa del Sol (al voltant de 2x10³⁰ kilograms). La massa solar és una unitat comuna per a representar masses en astronomia.