

CERCA DE COALESCÈNCIES EXCÈNTRIQUES DE FORATS NEGRES DURANT EL TERCER PERÍODE D'OBSERVACIÓ DE LIGO I VIRGO

QUÈ FA ESPECIALS ALS FORATS NEGRES BINARIS EXCÈNTRICS?

Els observatoris d'ones gravitacionals LIGO i Virgo han descobert fins ara gairebé 100 fusions de sistemes binaris compactes. La gran majoria d'aquestes són fusions de binaries de forats negres. L'origen astrofísic d'aquests esdeveniments violents encara és un misteri.

Els senyals d'ones gravitacionals porten informació sobre diverses propietats dels forats negres binaris. Una d'aquestes propietats és l'excentricitat orbital del sistema binari: com més el·líptiques siguin les òrbites dels forats negres, més excèntric es diu que és el sistema binari. Aquesta propietat aparentment poc coneguda del sistema binari revela en realitat detalls clau sobre l'origen dels forats negres que es fusionen.

La majoria dels forats negres de l'Univers es formen quan moren estrelles massives. La manera com dos forats negres formen un sistema binari i eventualment es fusionen pot succeir de diverses maneres diferents. Per exemple, dues estrelles que orbiten l'una a l'altra poden acabar formant de manera natural un sistema binari de forats negres. Al mateix temps, dos forats negres que inicialment estan lluny poden apropar-se per casualitat en llocs de l'Univers on resideixen molts forats negres en un volum petit, com ara als centres de les galàxies.

Què té a veure això amb l'excentricitat? Quan els forats negres orbiten entre si, emeten ones gravitacionals, ondulacions en el teixit de l'espai-temps, que fan que orbitin cada vegada més a prop fins que finalment es fusionen, ja que les ones eliminen energia orbital i moment angular del sistema. Al mateix temps, l'emissió d'ones gravitacionals també actua per fer l'òrbita del sistema binari més circular. Els sistemes binaris que orbiten entre si durant molt de temps (per exemple, mil milions d'anys) acaben sense cap excentricitat.

Si detectem un sistema binari que té una òrbita excèntrica, pot significar dues coses: els forats negres només van estar en un sistema binari durant un curt període de temps abans de fusionar-se, de manera que les ones gravitacionals no van tenir temps de fer la seva òrbita més circular. Això pot passar si els forats negres es troben per casualitat i la seva òrbita és petita des del principi. En segon lloc, alguna cosa a part dels dos forats negres podria haver interferit amb l'òrbita fent-la més excèntrica. Això podria ser un tercer objecte proper, com un altre forat negre o una estrella, o fins i tot gas que pot envoltar els forats negres.

Per tant, detectar l'excentricitat és una eina forense que ens permet explorar el passat dels forats negres.

En aquesta anàlisi, presentem una recerca dedicada a cercar coalescències de forats negres binaris excèntrics (eBBH, de l'anglès eccentric Binary Black Holes) durant el tercer període d'observació de LIGO i Virgo. També determinem les implicacions astrofísiques dels resultats d'aquesta recerca.

COM LES HEM BUSCAT

Hi ha diversos reptes que trobem quan busquem sistemes eBBH. A causa del fet que l'excentricitat orbital evoluciona constantment com a resultat de l'emissió d'ones gravitacionals, és difícil definir aquesta magnitud i modelar els senyals d'ones gravitacionals provinents de sistemes binaris excèntrics. Actualment, no existeix cap banc de plantilles per a eBBH, fet que fa que les cerques basades en models no siguin adequades per trobar eBBH. Per tant, en el nostre anàlisi, vam emprar l'algorisme de cerca coherent mínimament modelat, WaveBurst, per buscar senyals de eBBH.

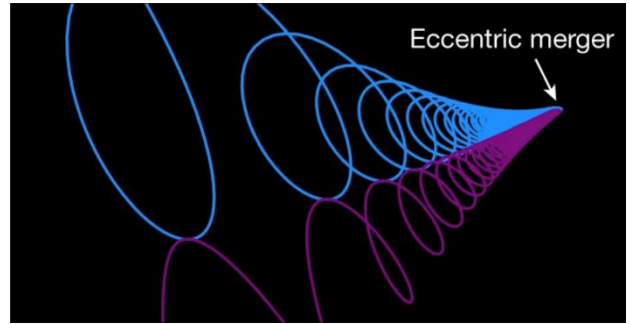


Figura 1: Il·lustració d'una fusió excèntrica de forats negres binaris en el disc AGN (Nucli Galàctic Actiu, de l'anglès Active Galactic Nuclei). Es preveu que una elevada fracció de forats negres binaris en el disc AGN tinguin òrbites excèntriques a causa de les interaccions amb altres forats negres dins del disc. [Credit: Samsing, J et al. [Nature 603, 237–240 \(2022\)](https://doi.org/10.1038/s41586-022-0340-4).]

FIGURES EXTRETES DE LA PUBLICACIÓ

Per més informació sobre aquestes figures i sobre com van ser produïdes, llegiu la preimpresió disponible gratuïtament en aquest link: [preprint](#).

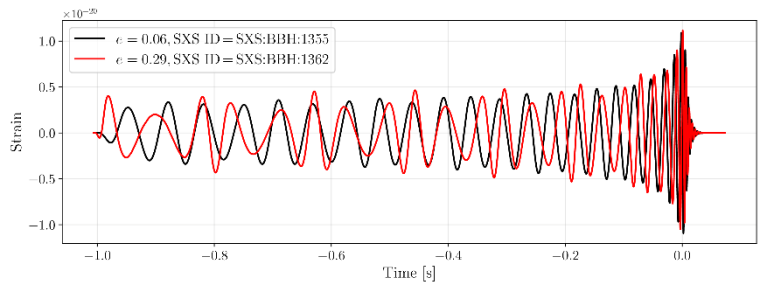


Figura 2: (Figura 1 de l'article) Aquesta figura mostra les formes simulades excèntriques de l'ona gravitacional per dues excentricitats diferents, en un sistema binari de masses iguals que té una massa total de $90 M_{\odot}$ (on M_{\odot} denota la massa del Sol) i que es troba a una distància de 100 Mpc, que aproximadament són 325 milions d'anys llum. La forma d'ona vermella descriu una binària caracteritzada per una excentricitat notablement gran, comprada amb la forma d'ona negra. Les simulacions comencen a una separació orbital que es trasllada a una freqüència d'emissió de $f_{low}=15$ Hz.

ESBRINA MÉS:

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



Aquest algoritme de cerca busca desviacions coincidents respecte al soroll esperat del detector en dos o més dels detectors de LIGO i Virgo amb supòsits mínims sobre la morfologia del senyal. Hem optimitzat aquest algoritme per ser més sensible als sistemes binaris excèntrics utilitzant simulacions de relativitat numèrica d'avantguarda de la col·laboració Simulating eXtreme Spacetimes (SXS). Vam dur a terme la cerca optimitzada per a eBBH durant el tercer període d'observació dels detectors de LIGO i Virgo.

QUÈ HA TROBAT LA NOSTRA CERCA

La cerca d'eBBH va recuperar un nou candidat que no havia estat reportat prèviament en cerques dirigides a sistemes binaris de forats negres gairebé circulars. Vam dur a terme diversos anàlisis de seguiment per comprendre millor el nou candidat més significatiu.

Com a primer pas, vam verificar que aquest candidat no havia tingut lloc durant cap artefacte instrumental o ambiental conegut. A continuació, vam estimar les propietats d'aquest candidat utilitzant un model d'ona quasi circular. Aquesta anàlisi va indicar que, si fos real, el nou candidat seria més coherent amb un senyal d'una coalescència de forats negres binaris de massa elevada (assumint que es va originar en un sistema amb una excentricitat orbital baixa o moderada). A través d'aquestes investigacions no vam poder determinar conclouentment si l'esdeveniment era d'origen astrofísic o si era el resultat d'una fluctuació de soroll intrínseca als detectors. A causa de la manca de proves conclouents que confirmessin si l'esdeveniment detectat era astrofísic, vam continuar sota la suposició que la cerca no va detectar cap senyal excèntrica durant la resta de l'anàlisi.

QUÈ IMPLIQUEN ELS NOSTRES RESULTATS

Tot i que la nostra cerca no va identificar un candidat d'eBBH amb una significança elevada, vam utilitzar aquesta no detecció per determinar les implicacions astrofísiques dels nostres resultats caracteritzant la sensibilitat de la nostra cerca a aquests sistemes. Per fer-ho, vam injectar senyals simulats de relativitat numèrica amb una àmplia gamma de masses totals (des de $70 M_{\odot}$ fins a $200 M_{\odot}$, on M_{\odot} denota la massa del Sol) i ratios de masses (q entre 0,33 i 1,0) en les dades del tercer període d'observació de LIGO i Virgo, i els vam recuperar utilitzant la cerca d'eBBH. Amb aquests resultats, vam poder quantificar el volum-temporal sensible de la nostra cerca com a funció dels paràmetres de les fonts d'eBBH (vegeu Figura 4). El volum-temporal sensible que vam calcular per a la nostra cerca estableix un límit superior sobre la taxa de fusió de forats negres binaris en AGNs i cúmuls estel·lars densos, que és coherent amb el que prediuen els models de població.

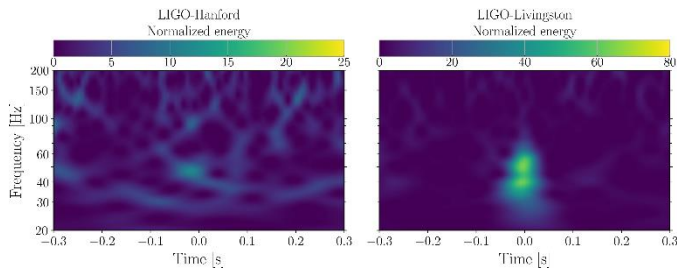


Figura 3: (Figura 5 de l'article) Espectrograms del candidat no més significatiu identificat per la cerca d'eBBH pels detectors LIGO-Hanford (esquerra) i LIGO-Livingston (dreta). Les relacions senyal-soroll individuals en els detectors LIGO-Hanford i LIGO-Livingston són de 5,6 i 10,9, respectivament. Com que les energies en els dos detectors són molt diferents, utilitzem escales diferents en la barra de colors.

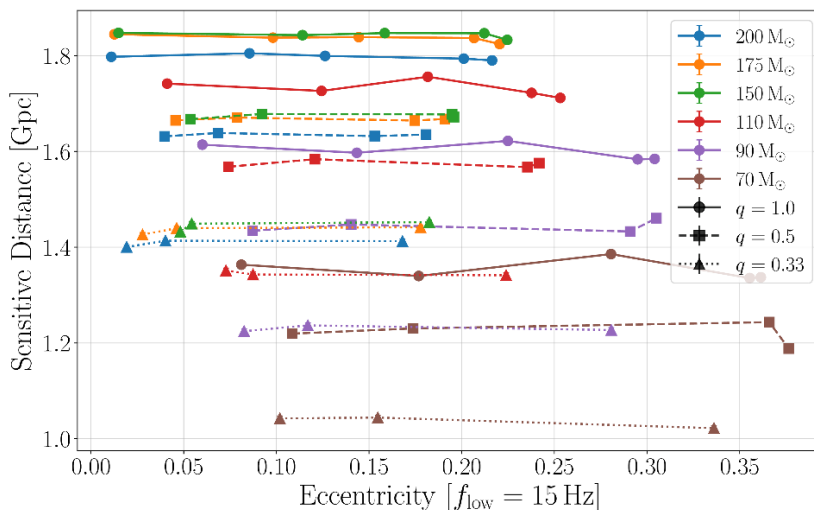


Figura 4: (Figura 4 de l'article) Aquesta figura mostra a quanta distància podem veure sistemes d'eBBH (en gigaparsecs, on 1 gigaparsec equival a 3.26 bilions d'anys llum) en funció de l'excentricitat orbital per diferents masses totals del Sistema binari i per diferents ratios de les masses dels forats negres individuals. Les formes dels marcadors representen sistemes amb ratios de massa diferents i els colors representen les diverses masses totals considerades (en unitats de la massa del Sol). L'eix horitzontal denota l'excentricitat del Sistema binari a una separació orbital que correspon a una freqüència d'emissió 15 Hz.

GLOSSARI

Ones gravitacionals: Aquestes són ondulacions en l'espai-temps generades per alguns dels processos més violents de l'univers, com la fusió d'estrelles de neutrons o forats negres.

Forat Negre: Una regió a l'espai tan densa que res, ni tan sols la llum, pot escapar del seu intens camp gravitacional.

Excentricitat: Aquest paràmetre s'utilitza per quantificar l'el·lipticitat de l'òrbita d'un sistema binari de forats negres. Valors més alts d'excentricitat indiquen una elongació més pronunciada de l'òrbita. Per a forats negres binaris amb òrbites àmplies, l'excentricitat es pot aproximar mitjançant l'excentricitat kepleriana. A mesura que la separació orbital disminueix, els efectes relativistes es tornen més pronunciats i l'excentricitat kepleriana divergeix de l'excentricitat mesurable per les ones gravitacionals.

Ratí de masses: Denotat per q . Definit com: $q = m_2/m_1$, on m_2 i m_1 són les masses més lleugera i més pesada, respectivament.

S Volum-temporal sensible: El volum d'espai-temps dins del qual el nostre algoritme de cerca pot detectar esdeveniments d'ones gravitacionals amb una significança superior a un llindar preestablert.

WaveBurst coherent (cWB): L'algoritme cWB és un mètode per detectar senyals d'ones gravitacionals sense dependre de plantilles de senyals gravitacionals teòriques. L'algoritme funciona comparant els senyals mesurats en múltiples detectors per veure si un esdeveniment destaca per sobre del soroll de fons d'una manera consistent.

Nuclí Galàctic Actiu (AGN): Un AGN és una regió petita i brillant present al centre d'algunes galàxies, on el material que cau cap al forat negre supermassiu central allibera enormes quantitats d'energia.

ESBRINA MÉS:

Visita les nostres pàgines web:

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

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