

GWTC-4.0: CERCANT L'EFECTE DE LENT GRAVITATÒRIA EN ONES GRAVITACIONALS

Les [ones gravitacionals](#) —oscil·lacions en l'espai-temps produïdes per les [fusions de binàries compactes](#), com aquelles detectades per la [col·laboració LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#)— foren predites per la [teoria de la relativitat general](#) d'Einstein. La teoria d'Einstein també ens informa que la matèria corba l'espai i el temps de manera que qualsevol senyal viatjant a través d'aquella regió es veuria deflexida per aquesta curvatura. Aquest fenomen, anomenat [efecte de lent gravitatòria](#) (o deflexió gravitatòria), és matemàticament semblant a l'efecte de lent de la llum quan per exemple travessa un vidre (podria ser que estigues utilitzant aquest mateix fenomen per a llegir aquestes paraules!). La deflexió gravitatòria de llum deguda a objectes massius a l'espai s'ha observat [des de fa més de cent anys](#), i ha esdevingut una eina habitual dels astrònoms, però fins ara encara no s'ha detectat l'efecte de lent gravitatòria en ones gravitacionals.

En [aquest estudi](#), hem buscat empremtes de l'efecte de lent gravitatòria en els recents senyals de [forats negres binaris](#) en el nostre [catàleg LIGO-Virgo-KAGRA](#) més recent (GWTC-4.0), que inclou les deteccions fetes durant la primera part de la quarta [campanya d'observació](#) de LVK (O4a).

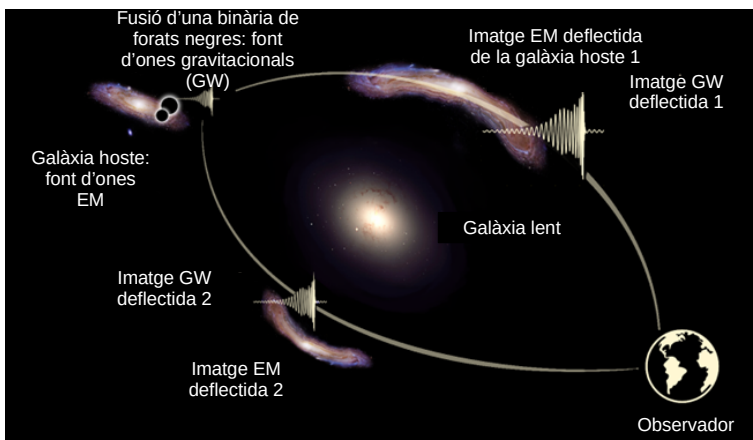


Figura 1: Il·lustració esquemàtica del procés de deflexió forta, on el senyal emès originalment passa prop d'una lent i es produeixen múltiples "còpies" d'aquell senyal, cadascuna amb la seva pròpia trajectòria i diferent magnificació. Aquestes múltiples còpies arriben a l'observador de la Terra en temps d'arribada diferents, detectant-se com a senyals distints. L'esquema il·lustra la deflexió forta d'una ona gravitacional (GW), superposada a una representació de la deflexió forta de la llum, és a dir, una font electromagnètica (EM): també es mostren imatges distorsionades de la galàxia on se situa la font d'ones gravitacionals tal com s'observarien amb telescopis. [Crèdit de la imatge: Laura Uronen, CUHK.]

QUINES EMPREMES DEIXA LA LENT GRAVITATÒRIA EN LES ONES GRAVITACIONALS?

Com que tota la matèria corba l'espai i el temps, hi ha un ampli conjunt de diferents objectes (corresponents a un ampli rang de *masses*) que podrien deflectir l'ona gravitacional durant el seu viatge fins la Terra. Varien des d'estrelles individuals, passant per camps d'estrelles, fins a galàxies i cúmuls de galàxies—i no és sorprenent que, amb les possibles lents abastant un rang amb tantes escales de massa diferent, les potencials empremtes de les lents gravitatòries sobre les ones gravitacionals siguin igual de diverses.

Considerem primer l'extrem més massiu de l'escala, el de les galàxies i cúmuls de galàxies (en l'ordre de centenars de milions de [masses solars](#) o més). Si una ona gravitacional passa prou a prop d'un objecte tan massiu, pateix l'anomenada [deflexió forta](#), on es produeixen múltiples còpies d'aquell senyal. Aquest fenomen es mostra a la **Figura 1**, que il·lustra l'efecte de la deflexió forta tant per a un senyal de llum (de la galàxia d'on prové el senyal d'ones gravitacionals) com pel propi senyal d'ones gravitacionals. Cada còpia del senyal viatja al llarg de la seva pròpia trajectòria i experimenta diferents parts del camp gravitatori produït per la lent gravitatòria, així que les veiem en diferents temps d'arribada amb diferents magnificacions—que canvien l'amplitud de l'ona gravitacional, fent que la font sembli més propera o més llunyana. Tanmateix, la forma del senyal no queda modificada excepte un desplaçament global de la fase—de manera semblant a les imatges invertides a través de les reflexions d'un vidre.

Això vol dir que podem buscar aquests múltiples senyals buscant aquells esdeveniments d'ones gravitacionals que semblin mostrar similituds en els [paràmetres que hi mesurem](#). Per exemple, podria passar que observem múltiples esdeveniments que semblen provenir de sistemes binaris amb masses semblants, o de regions similars al cel, però que d'entrada puguin semblar estar a diferents distàncies. És clar que podria ser coincidència, així que hem de ser minuciosos en les nostres examinacions i provar d'eliminar (o com a mínim reduir) aquells "[falsos positius](#)". Això es duu a terme en un procés de múltiples etapes.

Primer, fem servir algoritmes ràpids que examinen els esdeveniments d'ones gravitacionals, buscant similituds en els seus paràmetres i avaluant la compatibilitat entre diferents combinacions de senyals sota la premissa que hagin patit l'efecte de lent gravitatòria (al que en referim com "la hipòtesi de lent").

DESCOBRIU-NE MÉS:

Visiteu les nostres pàgines web:

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



Aquest primer pas escurça la llista de senyals candidats amb efecte de lent gravitatòria que més endavant passen a anàlisis més sofisticades, però més intensives computacionalment, que proven de determinar com de significatius són aquests potencials candidats. També hem de tenir en compte que, com que diferents senyals tindran diferents magnificacions, podria haver senyals sota el llindar de detecció: tan “silenciosos” que les cerques estàndard de LVK per a senyals d’ones gravitacionals no els poden trobar. Tanmateix, estan presents dins les dades que rebem i per tant fem cerques enfocades a buscar aquests candidats.

Encara que sovint busquem deflexió forta a escales grans, buscant les múltiples còpies del mateix senyal, sota certes condicions pot ser que només un sol senyal d’ones gravitacionals sigui identificable. Aquest escenari ocorre en el que es coneix com cas de Tipus II [1], i en aquestes circumstàncies l’efecte de lent gravitatòria es tradueix en petites diferències en els diferents modes de freqüència del senyal que poden ser detectades.

Fixant-nos ara en les lents més petites, menys massives, en aquest cas les múltiples imatges encara es produeixen quan el senyal passa prou a prop de la lent, però degut al fet que la lent és molt més petita també ho són les deflexions i la diferència de temps d’arribada que produeix la lent. Això significa que en lloc de múltiples senyals separats, tan sols observem un senyal que té els distintius [patrons \(bates\) d’interferència](#)—en els quals dos senyals de freqüències lleugerament diferents interfereixen entre si mateixos. Teòricament, aquests patrons són detectables en les dades de LVK, i per tant els busquem en aquest estudi.

QUÈ HEM TROBAT?

Després d’examinar amb les nostres anàlisis ràpides més de tres mil cinc-cents parelles de senyals provinents de diferents combinacions d’esdeveniments d’ones gravitacionals detectades a O4a, tan sols poques desenes d’aquestes parelles passen a les anàlisis més intensives. No obstant, cap d’aquests mostra suport significatiu de deflexió i per tant s’han descartat. Per les cerques de senyals sota el llindar de detecció tampoc s’han trobat candidats destacats. Addicionalment, les anàlisis de deflexió forta de Tipus II tampoc han trobat suport significatiu a favor de la hipòtesi de lent pels nous esdeveniments. Tanmateix, aquests resultats encara són útils: hem utilitzat la no-detecció de deflexió forta per obtenir els límits de cada quan les binàries de forats negres es fusionen a [redshift](#) alt, com es mostra a la **Figura 2**.

A partir de la nostra cerca de distorsions en senyals individuals, causades per lents menys massives, la gran majoria de senyals no mostra suport a favor de la hipòtesi de lent—no mostren distorsions més enllà del nivell que podríem esperar, per pura casualitat, en una població de senyals sense deflexió. Només hi ha una sola excepció: [l’esdeveniment GW231123](#), la detecció que va ser [anunciada separatament](#) com a “esdeveniment excepcional” en avançament de la publicació del [catàleg de O4a](#) complet. Com es mostra a la **Figura 3**, les nostres anàlisis troben que GW231123 sembla mostrar molt més suport a favor de la hipòtesi de lent que el que s’esperaria per a un senyal no deflectiu. De fet, en base a un “fons” (background) de tan sols 250 esdeveniments sense efecte de lent, un valor del suport de la hipòtesi de lent al nivell de GW231123 només passaria per pura casualitat en menys d’un 0.39% dels casos.

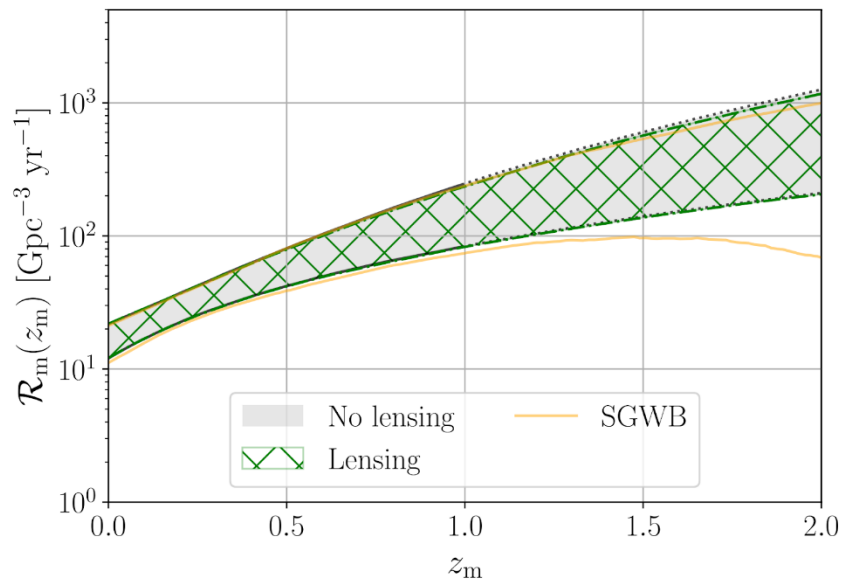


Figura 2: (Figura 11 del nostre [article](#).) El ritme de fusió de forats negres obtingut en funció del redshift. Els nostres límits en el ritme de fusions (mostrat en la regió envermellada en verd) obtinguts a partir de la no-detecció de deflexió forta en aquest estudi són comparables amb els límits obtinguts directament de les propietats de les binàries de forats negres que es van detectar en el nostre [nou catàleg](#) (mostrat en gris) i amb els límits del ritme de fusió obtingut de la no-detecció d’un [fons estocàstic d’ones gravitacionals](#) (mostrat en línies taronges).

EL CURIÓS CAS DE GW231123

El senyal GW231123 és molt curt; l’hem observat només amb pocs cicles en l’ona gravitacional abans de la fusió, al llarg d’aproximadament una desena part d’un segon. Segons les nostres anàlisis estàndard (és a dir, assumint que no hi ha lent) d’aquest senyal, GW231123 apareix com un sistema binari de forats negres pesat, amb un [moment angular molt alt](#) (de fet, és [el sistema més massiu d’aquest tipus observat amb ones gravitacionals fins ara](#)). Misteriosament, no obstant, els paràmetres obtinguts per GW231123 en aquests anàlisis sense lent semblaven variar significativament, depenent del model particular per a l’emissió d’ones gravitacionals (referit com “[waveform](#)”) utilitzat. D’altra banda, quan es van analitzar empremtes de deflexió gravitatòria

[1]. En la deflexió forta hi ha tres tipus d’“imatge”. S’anomenen Tipus I, II i III. Cada imatge s’associa a cadascuna d’aquestes classes depenent del desplaçament de la fase que experimenta. Aquest desplaçament pot prendre un d’aquests valors: (I) 0, (II) $\pi/2$, o (III) π . El valor del desplaçament de la fase que experimenta ve determinat per la posició per on el senyal viatja dins el camp gravitatori al llarg de la seva trajectòria cap a nosaltres.

a GW231123, aquestes diferències entre models de waveforms semblaven reduir-se—mentre que una de les components del senyal encara s'obtenia com més massiva i amb moment angular elevat, l'altre component apareixia com més lleugera i amb un moment angular més moderat. Quan s'analitza una ona gravitacional deflectida ja s'entén que, si l'efecte de lent gravitacional no es té en compte, pot causar que el senyal s'obtingui amb un moment angular més elevat del que realment té. Aquest comportament seria consistent amb el que es troba amb GW231123, si fos el cas que aquest esdeveniment fos realment deflectit. Tanmateix, hem de romandre cauts abans de treure tal conclusió i considerar cautelosament altres possibles explicacions.

Una possibilitat és que, donada la brevetat del senyal, la qualitat de les dades en certes freqüències associades amb certes característiques de [l'espectre de soroll](#) dels nostres detectors pugui ser motiu de preocupació. Quan examinem les diferències entre els senyals amb i sense l'efecte de lent proposats per a aquest esdeveniment, però, sembla que cap de les línies espectrals és responsable de donar suport a la hipòtesi de lent. En un [cas anterior](#) on hi havia un lleuger suport a favor de l'efecte de lent en aquest sentit, vam trobar que havia estat degut a les dades d'un sol detector—el que suggeria que, més que per l'efecte de lent, el soroll transitori n'era la causa més probable. En canvi, pel cas de GW231123, quan examinem les dades de cadascun dels detectors individualment trobem que les dades encara donen suport a favor de la hipòtesi de lent—el que significa que la causa és comuna en ambdós detectors.

Per tant, si GW231123 està deflectit, és important preguntar-se “quina probabilitat hi ha d'observar un sistema deflectit com aquest?” En el nostre estudi modellem la lent com a una massa puntual, i hi ha informes recents que el satèl·lit [Swift](#) podria haver observat la deflexió d'[esclats de raigs gamma](#) per una lent puntual com aquesta. Encara que aquestes afirmacions no estan confirmades, si les prenem com a bones, ens podrien ajudar a estimar la probabilitat que un esdeveniment com GW231123 pogués ser detectat. D'aquesta manera, hem trobat que esperaríem observar un esdeveniment d'ones gravitacionals deflectit per una massa puntual aïllada com la proposada per a GW231123 aproximadament entre un de cada cent i un de cada deu mil senyals d'ones gravitacionals detectats. En altres paraules, si GW231123 està deflectit, amb les nostres observacions actuals representa una troballa fortuïta.

D'altra banda, també sabem que el model de massa puntual utilitzat en la cerca del nostre estudi no comprèn altres escenaris, potser més probables, per a la lent—per exemple quan la lent està immersa dins d'un objecte més gros com una galàxia. Si un escenari com aquest fos cert, canviaria la nostra estimació de la probabilitat de veure un esdeveniment com GW231123, i es necessitaria fer estudis en més profunditat per a refinar aquesta estimació.

En resum, els resultats de les nostres anàlisis, conjuntament no ens permeten arribar a una conclusió segura de si GW231123 és un senyal genuïnament deflectit o no.

FUTURS HORIZONS

La cerca de l'efecte de lent gravitacional continua! Potser no hem trobat cap empremta de deflexió gravitacional identificada amb seguretat. No obstant, hem trobat que GW231123 és el candidat més interessant i prometedor, pel qual la hipòtesi de lent no pot ser ignorada. En els propers anys, a mesura que més i més fonts d'ones gravitacionals es vagin detectant, la perspectiva d'identificar les empremtes de les lents gravitacionals en ones gravitacionals és prometedora, i unes quantes de les validacions que s'han fet en aquest estudi seran clau per a identificar-les.

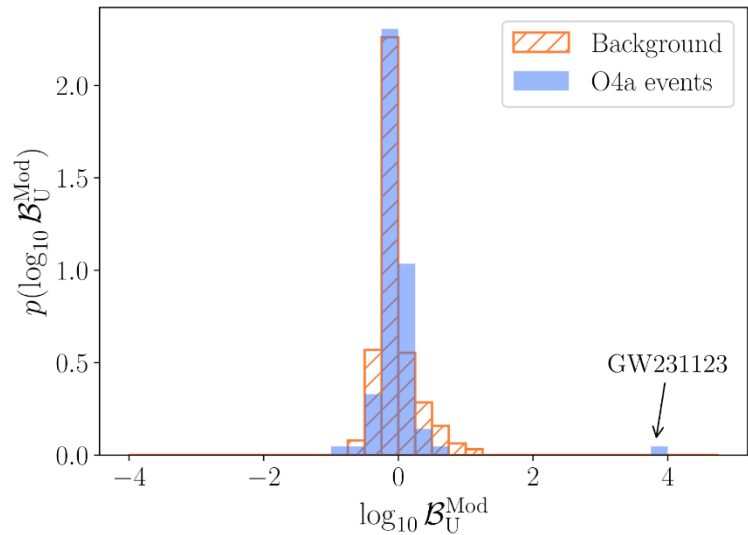


Figura 3: (Figura 6 del nostre [article](#).) La distribució dels factors de Bayes—que ens informen de com un model és preferible respecte a un altre—comparant models amb deflexió i sense pels esdeveniments d'O4a considerats en el nostre estudi. En blau es mostra l'histograma del logaritme (en base deu) del factor de Bayes, comparant el model amb deflexió (on la lent és una massa puntual aïllada) amb un model sense deflexió, per a cadascun dels nostres esdeveniments. En taronja també es mostra l'histograma dels valors del logaritme del factor de Bayes per a una distribució simulada d'esdeveniments sense deflexió. La majoria dels esdeveniments d'O4a se situen dins la distribució simulada. No obstant, GW231123 se situa significativament fora d'aquesta distribució d'esdeveniments no deflectits.

DESCOBRIU-NE MÉS:

Visiteu les nostres pàgines web:

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

Llegiu una publicació preliminar de l'article científic sencer [aquí](#) o a [arXiv](#).

La publicació de dades del Gravitational-Wave Open Science Centre pel catàleg GWTC-4.0 està disponible [aquí](#).

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