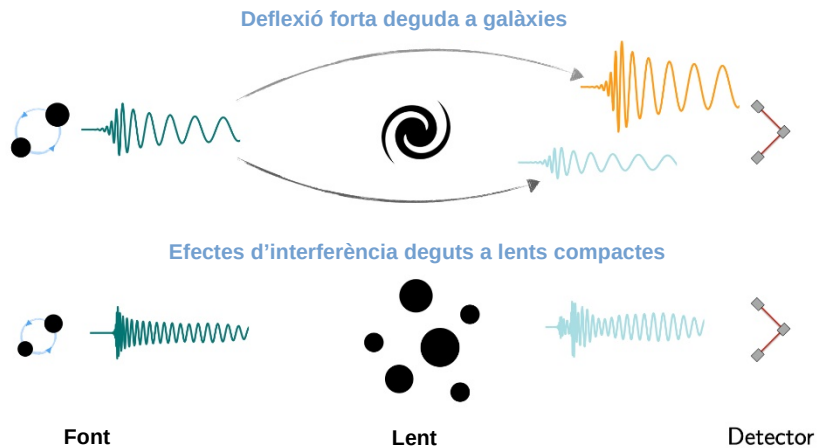


# L'UNIVERS D'ONES GRAVITACIONALS A TRAVÉS D'UNA LENT: BUSCANT LES EMPREMES DE LENTS GRAVITATÒRIES EN EL CATÀLEG DE LIGO/VIRGO/KAGRA MÉS RECENT

Els sistemes d'objectes binaris, com ara forats negres i estrelles de neutrons que es van fusionar fa milers de milions d'anys, emeten ones gravitacionals que poden ser detectades amb els detectors operats per la Col·laboració LIGO-Virgo-KAGRA. Einstein ens va mostrar que la gravetat corba l'espai i el temps, afectant tot allò que posseeix massa o energia, i les ones gravitacionals no en són una excepció. Per tant, podem esperar que durant el seu viatge al llarg de distàncies cosmològiques, les ones gravitacionals trobaran inevitablement objectes astrofísics massius que actuaran com a lents, deflectint la seva trajectòria, i fins i tot distorsionant la forma del seu senyal.



**Figura 1:** Representació esquemàtica de l'efecte de lent gravitacional en ones gravitacionals. A dalt, un senyal experimenta una deflexió gravitacional forta deguda a una galàxia, produint imatges múltiples amb diferents amplituds, temps d'arribada i fase. A baix, per altra banda, petites lents compactes produeixen efectes d'interferència que distorsionen la forma de l'ona detectada.

En aquest estudi, hem buscat les empremtes de l'efecte de lent gravitacional, encara no detectades, d'entre els senyals d'ones gravitacionals del nostre últim catàleg LIGO-Virgo-KAGRA, que inclou esdeveniments del tercer període d'observacions (O3) sencer. Aquest treball amplia la nostra anàlisi prèvia de la primera meitat d'O3.

## QUINES EMPREMES DE LA LENT SOBRE LES ONES GRAVITACIONALS BUSQUEM?

Les lents gravitacionals són molt diferents de les lents ordinàries, i la fenomenologia de l'efecte de lent gravitacional en ones gravitacionals és àmplia i diversa. Quan un senyal d'ones gravitacionals s'acosta prou a una galàxia o a un cúmulo de galàxies, podria veure's fortament deflectida, generant imatges múltiples del senyal original, vegeu Fig. 1. En aquest règim de deflexió forta, cadascuna de les imatges viatja al llarg d'una trajectòria diferent, percebent un potencial gravitatori diferent, i per tant arribant al detector en moments diferents i amb diferents amplificacions.

Com que la forma del senyal pràcticament no canvia amb la deflexió forta, hem buscat aquests esdeveniments repetits en el nostre catàleg, cercant senyals coincidents en la massa detectada i altres paràmetres intrínsecs. Realitzem aquesta cerca en diferents etapes, primer utilitzant algorismes ràpids, que busquen similituds en els paràmetres inferits per a diferents esdeveniments, per tal d'escurçar la llista de candidats. A continuació realitzem anàlisis estadístiques sofisticades per tal de determinar la rellevància de la hipòtesi de deflexió forta versus la hipòtesi d'absència de deflexió. Com que l'amplitud d'algunes de les imatges podria haver estat atenuada, quedant per sota dels nostres llindars de detectabilitat, també realitzem cerques d'imatges per sota d'aquest llindar. Cal remarcar que quan un senyal viatja no tan proper a una lent galàctica, l'efecte és tan sols una ampliació dèbil o reducció del senyal emès. Per tant, actualment no estem buscant aquest efecte de deflexió feble, malgrat que serà important en el futur quan es puguin detectar sistemes binaris més llunyans.

## DESCOBREIX-NE MÉS:

Visita les nostres webs: [www.ligo.org](http://www.ligo.org) [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)



Les galàxies i els cúmuls de galàxies, però, no són els únics objectes que poden deflectir les ones gravitacionals. Objectes astrofísics molt més menuts com ara **forats negres** aïllats també podrien produir efectes de lent gravitatòria detectables. Com que el retard entre les múltiples imatges és proporcional a la massa de la lent, les lents més lleugeres causen diferències de temps més curtes. En algun punt, quan el retard és més curt que la durada del senyal, les imatges podrien superposar-se, produint patrons d'interferència visibles com a batecs en les formes dels senyals, vegeu la Fig. 1. Per a masses encara més petites, els efectes de difracció podrien cobrar importància i l'efecte de lent gravitatòria s'ha de resoldre en el **règim d'òptica ondulatoria** complet. No obstant, si la lent és molt més petita que la longitud d'ona de les ones gravitacionals, l'efecte no és prou considerable per poder mesurar-lo. En qualsevol cas, això significa que les fonts d'ones gravitacionals de LIGO-Virgo-KAGRA permeten investigar lents amb masses des de centenars fins a desenes de milers de masses solars, ja que aquestes poden distorsionar suficientment els senyals com per poder-ne detectar l'efecte. Continuant el nostre estudi previ, cerquem aquests patrons, «batecs», en les dades.

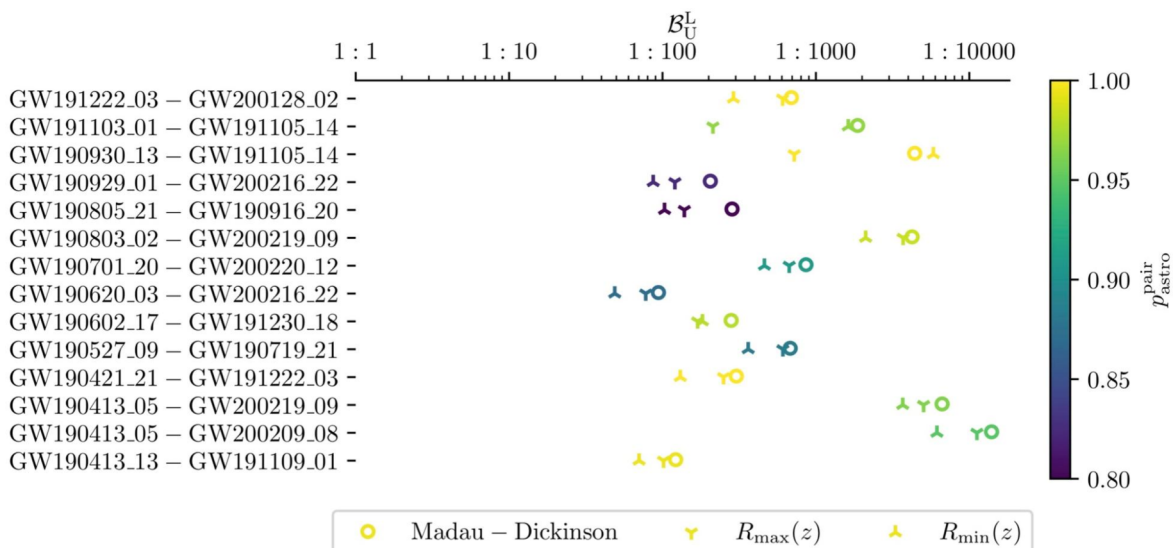
## QUINES NOVES ANÀLISIS HEM IMPLEMENTAT?

En aquest estudi hem actualitzat i millorat el nostres treballs previs, però també hi hem introduït noves anàlisis. En particular, hem introduït una nova arquitectura («pipeline») veloç per a identificar candidates a parells d'imatges fortament deflectides. Enlloc de fixar-se en el solapament entre paràmetres, aquesta nova arquitectura utilitza aprenentatge automàtic («machine learning») per a comparar directament les similituds en morfologia dels espectrogrames temps-freqüències. Com que la deflexió gravitatòria forta deixa fixa la forma de les imatges en major part, els espectrogrames haurien de romandre semblants per a totes les imatges. En aquest estudi hem utilitzat aquesta tècnica d'aprenentatge automàtic conjuntament amb el mètode de solapaments de probabilitats posteriors («posterior») per a seleccionar els candidats més interessants. Per als darrers, portem a terme una estimació conjunta de paràmetres, computacionalment més costosa, que no duu a cap evidència de deflexió forta (vegeu Fig. 2).

Com s'ha comentat anteriorment, la deflexió forta en general no modifica la forma de les imatges. Per a algunes d'elles, però, conegudes com imatges de tipus II, podrien mostrar petites distorsions quan la freqüència de certs modes és rellevant. En aquest estudi busquem aquestes empremtes de la deflexió forta en esdeveniments individuals. Tot i que alguns esdeveniments candidats mostren una lleugera evidència d'aquest subtil efecte, una anàlisi de seguiment detallada no proporciona evidències concloents de deflexió forta.

## GRÀFICS DE LA PUBLICACIÓ

Per a més informació sobre aquests gràfics i com s'han creat, llegiu el [preprint](#) a la vostra lliure disposició



**Figura 2:** Gràfic-resum sobre la nostra cerca d'ones gravitacionals fortament deflectides. Per a cada parell d'esdeveniments candidats a haver patit aquesta deflexió, els quals podem trobar a la columna esquerra, calculem l'evidència estadística de la hipòtesi «amb lent» versus «sense lent» ( $B_U^L$ ).

Una  $B_U^L$  major que 1 indica una preferència per a la hipòtesi «amb lent». En l'eix horitzontal s'indica aquesta evidència començant a 1, on la probabilitat disminueix anant cap a la dreta. Calculem aquesta evidència per a diferents suposicions sobre la història del ritme de fusions de forats negres, resumit en tres símbols diferents: un pel ritme de les fusions seguint el ritme de formació estel·lar («Madau-Dickinson»), així com altres dos pel mínim i màxim d'un recopilatori de simulacions astrofísiques. Com a referència també afegim una llegenda de color que indica la probabilitat que aquest parell sigui d'origen astrofísic independentment del tipus d'efecte de lent. Cap dels parells mostra preferència a favor de la hipòtesi «amb lent».

# IMPLICACIONS DE NO TROBAR L'EFECTE DE LENT GRAVITATÒRIA EN ONES GRAVITACIONALS

El fet de no trobar evidència de lent gravitatòria ens permet extreure implicacions astrofísiques en la població de lents i fonts. Les cerques d'imatges múltiples estableixen límits en la distribució de lents grans com galàxies, mentre que els efectes d'interferència estableixen límits en la quantitat d'objectes compactes que actuen com a **matèria fosca**. Per a la darrera, si assumíssim que tots els objectes de matèria fosca compactes tenen la mateixa massa, podem delimitar la seva abundància per a diferents masses, vegeu la Fig. 3. Per altra banda, això té implicacions per a aquells models de l'univers primitiu que prediuen l'existència de **forats negres primordials**. Com es pot veure en la figura, trobem que els objectes compactes amb masses compreses entre 100 i 10.000 masses solars no podrien representar la totalitat de matèria fosca. Per a les primeres, la no-observació de deflexió gravitatòria forta implica que el ritme de fusions de forats negres en el passat (fa més de 10 mil milions d'anys) no podria haver estat major que dos ordres de magnitud respecte el ritme de fusió present, d'altra manera ja hauríem d'haver observat esdeveniments amb empremtes de deflexió gravitacional forta. Aquest resultat és consistent amb els líndars superiors derivats de la no-observació del **fons còsmic d'ones gravitacionals**.

## MIRANT CAP AL FUTUR

Tot i no haver trobat una evidència ferma de l'efecte de lent en ones gravitacionals, la millora en la sensibilitat en propers períodes d'observació deixa la cerca d'efectes de lent en una posició molt emocionant, al líndar de la seva primera detecció.

## PER A MÉS INFORMACIÓ:

Teniu a la vostra lliure disposició un preprint de l'article científic complet:

<https://dcc.ligo.org/P2200031/public>

<https://arxiv.org/abs/2304.08393>

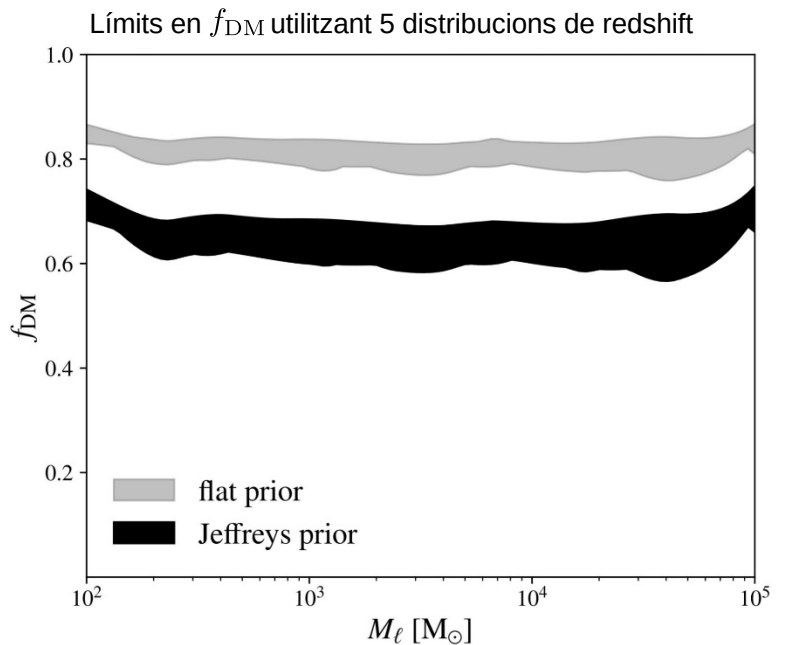


Figura 3: Límits en l'abundància d'objectes compactes, derivats a partir de la no-observació de distorsions per efecte de lent en el catàleg d'ones gravitacionals més recent. L'abundància d'objectes compactes a l'eix vertical es calcula com una fracció de l'abundància total de matèria fosca. La massa dels objectes compactes en l'eix horitzontal es mostra en termes de la massa de la lent. Considerem diferents suposicions, parcialment resumides per les probabilitats a priori («priors») anomenats 'prior pla' i 'prior de Jeffreys', per a la població de lents i fonts. Trobem que els objectes entre 100 i 10.000 masses solars no poden compondre la totalitat de matèria fosca.

Traduït per Helena Ubach Raya i Joan Llobera Querol de l'[original](#) en anglès.

## GLOSSARI

**Einstein:** L'any 1915, Albert Einstein descrigué per primer cop la teoria de la relativitat general de la gravitació. En aquesta teoria, la gravetat és el resultat de la curvatura en l'espai-temps, causada per concentracions de massa o energia. Prediu tant les ones gravitacionals com la deflexió gravitatòria.

**Distàncies cosmològiques:** són distàncies molt més grans que la mida de la nostra galàxia i el grup local. Les distàncies cosmològiques s'expressen típicament en termes de Gigaparsecs. Un Gigaparsec (normalment abreviat com a Gpc) correspon aproximadament a tres mil milions d'anys llum o  $3 \times 10^{22}$  km. Això seria milions de cops la mida de la nostra galàxia.

**Galàxies:** són sistemes compostos majoritàriament per estrelles, gas i matèria fosca, tot unit per la gravetat.

**Cúmuls de galàxies:** Les galàxies també poden formar sistemes gravitatoris més grans, anomenats cúmuls.

**Forat negre:** Un forat negre és un objecte massiu i dens, amb una força de la gravetat tan forta que ni tan sols la llum pot escapar-ne.

**Règim d'òptica ondulatoria:** Òptica ondulatoria es refereix a aquell règim on les propietats de les ones gravitacionals o la radiació electromagnètica esdevenen importants i on cal tenir en compte els efectes d'interferència i difracció.

**Matèria fosca:** Una forma de matèria que comprèn aproximadament el 85% de la matèria de l'univers. La matèria fosca s'anomena "fosca" perquè no sembla que absorbeixi, reflecteixi o emeti llum, i per tant és difícil de detectar. La composició de la matèria fosca és desconeguda, podria estar feta de partícules fonamentals, o forats negres, entre d'altres.

**Forats negres primordials:** Un tipus de forat negre teòric, format als inicis de l'Univers. Les fluctuacions en la densitat d'energia de l'Univers podrien haver creat regions de l'espai tan denses que podrien haver col·lapsat i format forats negres. Com que no haurien estat formats a través del col·lapse d'estrelles massives, seria possible que existissin forats negres primordials més lleugers que una massa solar, o que es fusionessin a redshifts majors que els de la formació de les primeres estrelles.