

# UNA CERCA SENSIBLE D'ONES GRAVITACIONALS CONTÍNUES DE SCORPIUS X-1 EN O3

## RESUM

Aquesta és la cerca més recent i sensible d'ones gravitacionals contínues (CWs, de l'anglès *Continuous Waves*) procedents de la [binària de raigs X de baixa massa](#) Scorpius X-1, una [estrella de neutrons](#) en una òrbita binària amb una estrella poc massiva. Hem utilitzat dades d'*Advanced LIGO* del tercer període d'observació de LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) per cercar senyals en un ampli interval de freqüències possibles. No hem detectat ones gravitacionals provinents de Scorpius X-1, però hem establert límits que comencen a restringir els models possibles. En particular, hem assolit una referència estricta en algunes freqüències de senyal.



Figura 1: Impressió d'un artista d'una binària de baixa massa com Scorpius X-1. (Il·lustracions astronòmiques and Art Espacial, per Fahad Sulehria, NovaCelestia)

## QUÈ ESTAM CERCANT

Des del seu primer període d'observació el 2015, els detectors LIGO i Virgo han [detectat nombrosos senyals d'ones gravitacionals](#) procedents de l'òrbita en espiral i de la posterior fusió de sistemes binaris [d'objectes compactes](#) com ara forats negres o estrelles de neutrons. Aquestes coalescències de binàries compactes (CBCs) emeten senyals transitoris relativament intensos que són observables en els detectors només durant uns pocs segons. Tanmateix, la relativitat general també prediu que altres sistemes astrofísics emeten ones gravitacionals de manera contínua, més febles que els senyals de les CBCs, però al llarg de períodes prolongats de temps. Per tant, les cerques de CWs poden combinar dades durant períodes llargs (com un període d'observació complet) per acumular senyal i augmentar la probabilitat de detecció.

Les estrelles de neutrons (NSs, de l'anglès *Neutron Stars*) denses, que giren sobre elles mateixes a velocitats immenses de fins a centenars de rotacions per segon, són les fonts més probables de CWs. Qualsevol lleugera asimetria en la distribució de la massa de la NS generarà ones gravitacionals (GWs, de l'anglès *Gravitational Waves*) a una freqüència que és el doble de la freqüència de rotació de la NS. Quan aquestes ones arriben als nostres detectors a la Terra, la freqüència es desplaçarà per efecte Doppler a causa del moviment dels detectors mentre la Terra rota i es desplaça en la seva òrbita, així com de qualsevol moviment variable de la NS. Així, les propietats del sistema, com ara la posició en el cel i la velocitat orbital, determinen la forma exacta del senyal.

La font coneguda més prometedora de CWs és la binària de raigs X de baixa massa (LMXB, de l'anglès *Low-Mass X-ray Binary*) Scorpius X-1 (Sco X-1). Una LMXB (Figura 1) és un sistema format per un objecte compacte en una òrbita binària amb una estrella companya de massa inferior. Sco X-1 és una LMXB de la nostra galàxia que és la font de raigs X persistent més brillant (a part del Sol) i que es troba relativament a prop, a només 9.000 anys llum de distància. En una LMXB, la NS atreu matèria en estat gasós de l'estrella companya en un procés conegut com a acreció. El material acretat crea un "bony" a la superfície de la NS, la qual cosa causa una asimetria en la distribució de massa que genera CWs mentre la NS gira.

L'acreció de matèria sobre la NS també influeix en la seva rotació. L'acreció pot fer augmentar la velocitat de rotació de la NS, mentre que les GWs, juntament amb altres forces com la interacció del camp magnètic de la NS amb el seu

entorn, poden ralentir-la. Quan els torcs d'acceleració i desacceleració s'anul·len mútuament, el gir de la NS es manté constant. L'escenari en què aquest equilibri de rotació es manté només per l'acreció i les GW es coneix com a "equilibri de torc", i ofereix una estimació optimista (perquè descarta altres contribucions a la desacceleració) de la intensitat esperada del senyal de GW. L'acreció també produeix raigs X que es poden observar amb telescopis de raigs X per estimar la taxa d'acreció. Les observacions de Sco X-1 en un ampli rang de freqüències electromagnètiques, des de ràdio fins a raigs X, han proporcionat informació sobre la posició en el cel i els [paràmetres](#) de l'òrbita de l'estrella de neutrons. Aquesta informació és essencial per determinar els possibles senyals de GW, la qual cosa fa que la nostra cerca sigui un exemple d'[astronomia multimissatgera](#).

Fins ara, s'han dut a terme moltes cerques utilitzant mètodes com la [radiometria](#), [Viterbi](#) i el mètode de [correlació creuada](#) (*cross-correlation*) utilitzat en aquest article.

## COM HEM FET LA CERCA?

El mètode de correlació creuada cerca correlacions entre segments de dades preses en diferents temps i/o en diferents detectors, i utilitza el model de la forma d'ona gravitacional d'una estrella de neutrons en rotació per determinar les correlacions esperades. Per construir aquesta forma d'ona gravitacional hem d'utilitzar propietats del sistema com la freqüència del senyal, la posició en el cel i els paràmetres orbitals. En el cas de Sco X-1, la freqüència és desconeguda, mentre que la posició en el cel està ben determinada per observacions electromagnètiques. Els paràmetres orbitals són coneguts amb una precisió limitada, de manera que cal fer la cerca utilitzant molts conjunts possibles de paràmetres (la freqüència del senyal, el període, la fase i la mida de l'òrbita). Aquesta cerca només considera correlacions entre dades separades per no més d'un desplaçament de temps ajustable anomenat temps de coherència. L'ús d'un temps de coherència més llarg fa que la cerca sigui més sensible, però augmenta molt el cost computacional, principalment perquè els punts de l'espai de paràmetres en què fem la cerca han d'estar més a prop entre si. Així, triem el temps de coherència per equilibrar aquestes consideracions, i utilitzem temps de coherència més llargs en regions de l'espai de paràmetres on és més probable trobar el senyal o on l'increment del cost de computació és menor.

S'han analitzat dades del tercer període d'observació (O3), que es va dur a terme des de l'abril de 2019 fins al març de 2020; tenint en compte la rejecció de dades dels moments en què un detector no estava recollint dades útils, això va suposar aproximadament 240 dies de dades útils del detector LIGO Hanford i 250 dies del detector LIGO Livingston. El temps de coherència va variar entre 240 i 18.720 segons.

## QUÈ HEM APRÈS?

El resultat de la nostra cerca és una [relació senyal-soroll](#) (SNR, de l'anglès *signal-to-noise ratio*) per a cada combinació de valors de paràmetres cercats. Si la SNR en un punt de l'espai de paràmetres és més alta del que s'esperaria de dades que continguessin només soroll, fem un "seguiment" d'aquest candidat com a possible detecció. Ho fem tornant a analitzar les dades amb un temps de coherència més llarg i una graella ajustada de punts en l'espai de paràmetres al voltant del candidat. Si la SNR augmenta, repetim el procés. També realitzem aquest anàlisi en candidats generats per senyals simulats. La Figura 2 mostra que cap dels candidats de la cerca va incrementar les seves SNR com ho faria un senyal real.

## FIGURES DE LA PUBLICACIÓ

Per a més informació sobre aquestes figures i com s'han produït, llegiu l'[article](#) d'accés gratuït.

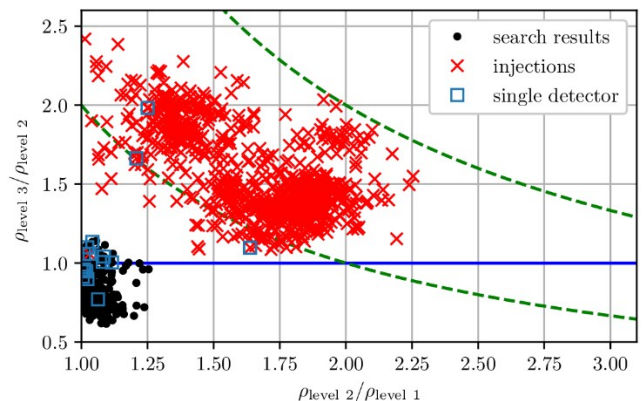


Figura 2: Aquesta figura mostra els resultats de les anàlisis de seguiment de possibles senyals de la cerca. L'eix x mostra la proporció entre les relacions senyal-soroll (SNRs) abans i després de quadruplicar el temps de coherència en la correlació creuada, fet que teòricament hauria de duplicar la SNR. L'eix y mostra la proporció entre les SNRs abans i després d'una segona quadruplicació. (Les línies discontinües verdes mostren valors constants de x per y, és a dir, la relació de les SNRs abans i després de les dues quadruplicacions juntes). Les creus vermelles mostren senyals simulats injectats, les SNRs dels quals augmenten amb cada increment del temps de coherència. En comparació, les SNR dels candidats de la cerca (punts negres) no segueixen el comportament esperat d'un senyal real.

Atès que no tenim una detecció aparent, establim [límits superiors](#) a la intensitat de les GWs de Sco X-1 en funció de la freqüència (Figura 3). Els límits superiors es trien de manera que, si un senyal estigués present amb aquesta amplitud o més gran, la nostra cerca tendria una probabilitat del 95 % de produir una SNR més alta de la que vàrem observar en aquesta freqüència. Aquests resultats són les restriccions més sensibles sobre la intensitat de l'emissió de GWs de Sco X-1 fins a la data, i investiguen les amplituds previstes pels models de l'escenari d'equilibri de torc.

Amb una sensibilitat millorada en els futurs períodes d'observació d'*Advanced LIGO-Advanced Virgo-KAGRA*, esperem poder cercar senyals encara més febles de Sco X-1. En una situació realista amb altres mecanismes de desacceleració a més de les GWs, s'espera que la intensitat de les GWs sigui més baixa que l'amplitud nominal de l'equilibri de torc. Per tant, superar aquests nivells significa que tenim el potencial d'investigar escenaris més realistes i, fins i tot, detectar GWs de Sco X-1 en futurs períodes d'observació.

## PER A SABER-NE MÉS:

Visita les nostres pàgines web

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

[www.geo600.org](http://www.geo600.org)

Llegeix un *preprint* gratuït de l'article científic complet [aquí](#) o a [arXiv.org](#)

Publicació d'accés obert: [The Astrophysical Journal Letters, 941, L30 \(2022\)](#)

*Preprints* de lectura gratuïta dels articles que descriuen la metodologia en més detall:

[Model-Based Cross-Correlation Search for Gravitational Waves from Scorpius X-1](#)

[The cross-correlation search for periodic gravitational waves](#)

Anàlisi actualitzada: [Search for Gravitational Waves from Scorpius X-1 in LIGO O3 Data With Corrected Orbital Ephemeris](#)

Article traduït per Maria Antònia Ferrer i revisat per Arnau Montava des de l'original a

<https://ligo.org/science-summaries/O3ScoX1CrossCorr/>

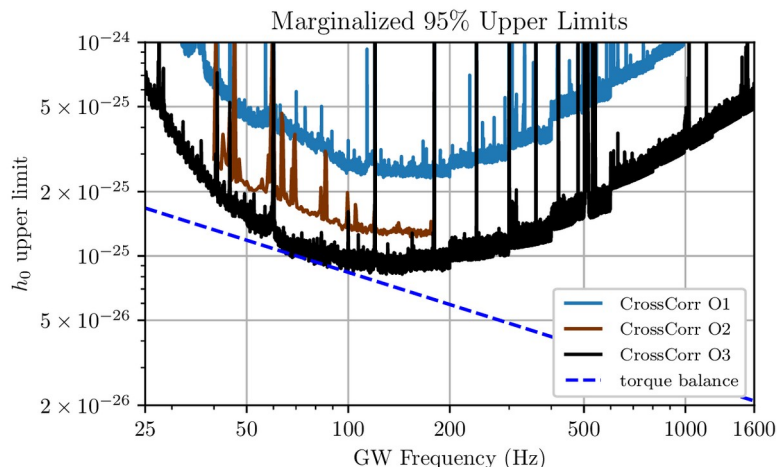


Figura 3: Aquesta figura mostra els límits superiors del 95% establerts sobre l'amplitud de l'ona gravitacional  $h_0$  per la cerca de correlació creuada O3, juntament amb els resultats de cerques de correlació creuada anteriors per comparació. Per primera vegada, la sensibilitat de la cerca ha arribat (a les freqüències de senyal entre 60 i 100 hertz) a les prediccions del model d'equilibri de torc, [marginalitzades](#) sobre [l'angle d'inclinació](#) desconegut del gir de l'estrella de neutrons.

Visita les  
nostres  
webs:



## GLOSSARI

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

**Hertz:** Una unitat de freqüència igual a un cicle per segon.

**Angle d'inclinació:** Angle entre l'eix del spin de l'estrella de neutrons i una direcció de referència com la línia de visió.

**Binària de raigs X de baixa massa (LMXB):** Un sistema binari que consisteix en un objecte compacte com una nana blanca, una estrella de neutrons o un forat negre, i una estrella companya de menor massa, en què l'objecte compacte acreta matèria de la companya, la qual cosa genera raigs X.

**Marginalització:** Tècnica estadística en què es calcula una mitjana sobre tots els possibles valors d'una quantitat que afecta les nostres observacions, però que no estem intentant mesurar.

**Astronomia multi-missatgera:** Quan el mateix objecte o sistema és estudiat en diferents longituds d'ona de fotons, això s'anomena astronomia multi-longituds d'ona. Per exemple, l'estrella de neutrons Scorpius X-1 és observada en ones ràdio i en raigs X, mentre que la seva estrella companya es va detectar analitzant la llum visible del sistema. Expandir aquest concepte per incloure missatgers astrofísics que no formen part de l'espectre electromagnètic, com les ones gravitacionals, s'anomena

astronomia multi-missatgera.

**Estrella de neutrons:** Nucli d'una estrella que ha col·lapsat al final de la seva evolució, típicament amb una massa al voltant de les 1.4 masses solars, però de només uns quilòmetres de diàmetre, fet que en fa un objecte extremadament dens.

**Paràmetre:** una quantitat que influeix a la forma d'un senyal d'ona gravitacional, com pot ser la freqüència del senyal o el període orbital del sistema binari.

**Relació senyal-soroll (SNR):** La relació entre la intensitat de senyal i la intensitat del soroll. Mesura la intensitat del senyal en comparació amb les fonts de soroll que la contenen.

**Deformació:** El canvi fraccional en la distància entre dos punts de referència a causa de la deformació de l'espai-temps pel pas d'una ona gravitacional.

**Límit superior:** El valor màxim possible per a una quantitat consistent amb la seva no detecció. En aquest article, la quantitat d'interès és l'amplitud de deformació intrínseca màxima d'una determinada ona gravitacional contínua que arriba a la Terra. Sent que no s'ha detectat cap senyal, determinem un nivell límit de confiança del 95%, la qual cosa significa que un senyal real amb una deformació igual (o superior) produiria un SNR superior que el que es va mesurar en el 95% (o més) dels casos.