

QUAN UN PÚLSAR TÉ UN SINGLOT, HO PODEM DETECTAR AMB ONES GRAVITACIONALS?

El 2024, un dels millors vells amics dels [radioastrònoms](#) al cel va presentar una oportunitat molt emocionant per a la recerca d'ones gravitacionals (GW): una [estrella de neutrons](#) coneguda com el [púlsar Vela](#) va experimentar un [glitch](#), una mena de calfred en els seus senyals de ràdio habitualment estables. Els processos físics subjacents als *glitches* dels púlsars encara no s'entenen del tot, i detectar-ne les seqüeles en ones gravitacionals podria ser un pas crucial per resoldre aquest enigma.

GLITCHES DE PÚLSAR

El púlsar Vela, situat a uns mil [anys llum](#) de la Terra i amb una edat no gaire superior a deu mil anys, pertany a un tipus d'estrella especialment fascinant: és un residu extremadament dens de l'[explosió d'una supernova](#) al final de la vida d'una estrella massiva, que va ser tan comprimit que es va convertir en una [estrella de neutrons](#). També gira molt ràpidament (més d'11 vegades per segon) i té un camp magnètic tan intens (més d'un bilió de vegades més potent que el de la Terra) que emet forts raigs de [radiació electromagnètica](#). A mesura que aquests raigs travessen la Terra en cada rotació, els radiotelescopis (i els que observen en altres longituds d'ona) detecten senyals pulsàtils, d'aquí el terme púlsar. El púlsar perd energia lentament amb el temps i es va alentint, i una petita part d'aquesta pèrdua d'energia podria explicar-se per l'[emissió d'ones gravitacionals contínues](#).

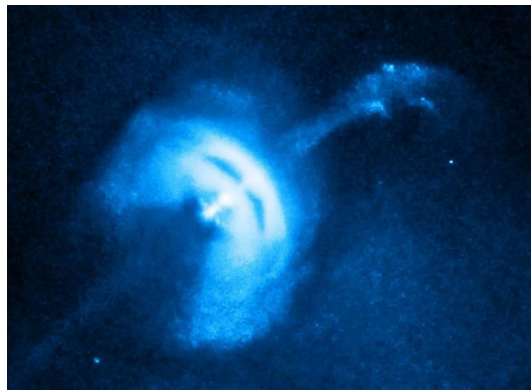


Figura 1: La nebulosa que envolta el púlsar Vela i el raig llançat per ell. Imatge composta de raigs X (crèdit: NASA/CXC/Universitat de Toronto/M. Durant et al.) i òptica (crèdit: DSS/Davide De Martin).

Però en el cas del púlsar Vela, aquesta sèrie de polsos tan regular mostra una característica inusual aproximadament cada dos anys: durant el que s'anomena un *glitch*, la rotació del púlsar s'accelera de sobte de nou. Aquests *glitches* es coneixen en altres púlsars, però Vela, que va ser el primer púlsar en què s'observà un *glitch*, ha mostrat alguns dels *glitches* més forts que es coneixen i és un dels púlsars que produeix més sovint aquests estranys singlots. Tot i això, a partir de les observacions amb telescopi, els *glitches* continuen sent esdeveniments molt enigmàtics. Probablement estan relacionats amb potents «terratremols estel·lars», amb efectes de [superfluid](#) a l'interior dens de l'estrella o amb una combinació d'ambdós, però els detalls continuen sent desconeguts.

En particular, des de la col·laboració [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK), ens va entusiasmar l'últim gran *glitch* del púlsar Vela, que va ser detectat per radiotelescopis a finals d'abril de 2024, mentre els detectors LIGO i Virgo estaven en plena fase d'observació. Com que Vela és una constel·lació del cel austral, els dos radiotelescopis que van proporcionar informació precisa sobre el moment en que es va produir aquesta anomalia van ser els de l'[Institut Argentí de Radioastronomia](#) i l'[Observatori de Mount Pleasant](#) de la Universitat de Tasmània.

PER QUÈ ELS GLITCHES DELS PÚLSARS HAURIEN DE CAUSAR ONES GRAVITACIONALS?

A causa de la seva densitat extrema i de la seva ràpida rotació, les estrelles de neutrons també són interessants com a possibles fonts d'ones gravitacionals. A més dels febles senyals a llarg termini del seu lent decaïment de rotació, es podrien produir senyals més forts en períodes més curts sempre que l'estrella pateixi algun esdeveniment violent, com ara un *glitch*. I, de fet, hi ha diversos models sobre com un *glitch* del púlsar podria produir ones gravitacionals.

En primer lloc, una estrella de neutrons pot sonar com una campana amb diversos [tipus d'oscil·lacions](#). Les més fortes s'anomenen «modes f», abreviatura de «modes fonamentals». Els *glitches* poden desencadenar aquests modes f, igual que una campana sona quan es colpeja amb un martell. A mesura que l'estrella de neutrons vibra, esperem que emeti ones gravitacionals (GW) en el rang de [quilohertz](#), que duren només una fracció de segon o, com a màxim, uns quants segons.

En segon lloc, el *glitch* també podria deformar la forma de l'estrella de neutrons. Això es pot imaginar com la formació d'una mena de «muntanya transitòria» que, durant un temps, emergeix de la forma majoritàriament suau del púlsar en repòs. Un cop això passi, la rotació, ara desigual, també emetria ones gravitacionals. Però a causa de la immensa gravetat de l'estrella de neutrons, la muntanya finalment es dissoldria de nou. Aquestes ones gravitacionals tindrien freqüències molt més baixes (el doble de la velocitat de rotació del mateix púlsar, per tant, uns 22 hertz per a Vela) i serien més febles que les dels modes f, però potencialment podrien durar dies o fins i tot mesos, de manera que encara tenim bones possibilitats de detectar-ne l'efecte global.

RECERCA D'ONES GRAVITACIONALS

Durant la seva **quarta campanya d'observació**, els detectors **LIGO** han assolit una sensibilitat tan impressionant que ara, per primera vegada, tenim una oportunitat realista de detectar GWs causades per un esdeveniment com un *glitch* del púlsar Vela. Per aprofitar aquesta oportunitat, vam utilitzar una combinació de mètodes diferents per assegurar-nos que puguem trobar alguna cosa malgrat el gran desconeixement sobre què passa realment durant el *glitch*. És important utilitzar diversos algorismes de cerca per a cada classe de senyal per garantir la robustesa davant la física desconeguda i els patrons complicats de [renou dels detectors](#).

TROBA MÉS INFORMACIÓ:

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



Figura 2: Els quatre observatoris que participen en aquest treball: dos radiotelescopis a l'Argentina i a Tasmània, i els dos detectors d'ones gravitacionals LIGO als EUA. Crèdits: Institut Argentí de Radioastronomia, Universitat de Tasmània, Laboratori LIGO (Caltech/MIT).

Hem utilitzat tres algorismes diferents per cercar senyals d'una durada màxima de segons o minuts. Aquests cobreixen un ampli rang de freqüències i no assumeixen models de senyals específics, de manera que són sensibles als modes f esperats, així com a altres senyals de curta durada que una estrella de neutrons pertorbada podria emetre.

A més, quatre algorismes addicionals estan dissenyats per senyals de llarga duració, que oscil·len entre mitja hora i quatre mesos. Aquests se centren en freqüències d'entre 11 hertzs i 22 hertzs, tal com s'espera, per exemple, en l'escenari de "muntanya transitòria".

PRIMERES LIMITACIONS FÍSQUES I PERSPECTIVES FUTURES

Per desgràcia, malgrat la [sensibilitat](#) dels detectors LIGO en el seu cicle d'observació actual, encara no hem trobat cap senyal convincent de GWs procedents del púlsar Vela. Encara així, aquest conjunt de resultats representen una fita important: per primera vegada, hem estat prou sensibles com per imposar restriccions físicament significatives a la radiació gravitacional després del *glitch* d'un púlsar. Això significa que si tota l'energia alliberada durant *glitch* s'hagués destinat a produir GWs, hauríem d'haver detectat alguna cosa. Això es compleix per tot el rang de senyals de llarga durada, mentre que, en el cas dels modes f, només hem assolit aquestes restriccions a freqüències menors a un quilohertz, quan els models més realistes d'estrelles de neutrons indiquen que l'emissió hauria de produir-se a freqüències més altes.

Com a resultat, la conclusió més rellevant que hem obtingut del púlsar Vela, tot i no haver detectat cap senyal en aquesta cerca, fa referència a l'escenari de "muntanya transitòria". En aquest cas, podem afirmar que:

- la idea que els canvis específics observats en l'emissió de ràdio del púlsar després del *glitch* siguin a causa d'una "muntanya transitòria" no és correcta, o bé
- si aquesta idea és correcta i les GWs es van emetre tal i com prediu aquest escenari, aleshores el púlsar s'ha de trobar al límit inferior dels valors possibles de mida i massa per a aquest tipus de remanent estel·lar compacte. Això es deu a que una estrella de neutrons més gran o massiva hauria emès un senyal procedent de la seva "muntanya transitòria" que hauríem d'haver detectat – veure figura 3.

Aquests resultats són consistents amb els obtinguts a altres observacions d'estrelles de neutrons (com la famosa [fusió binària GW170817](#)), que ja ens indiquen que el púlsar Vela ha de contenir una [massa superior a la del Sol](#) confinada a una esfera de radi inferior a 15 km – no major a la majoria de ciutats a la Terra!

Arran d'aquest resultat, podem esperar que futurs *glitches* de púlsar, observats quan els detectors de GWs siguin encara més sensibles, proporcionin restriccions encara millors. Amb el temps, una detecció directa de GWs procedents d'un púlsar amb *glitches* ens ajudarà a desxifrar el misteri de per què Vela i els seus familiars experimenten aquests estranys singlots.

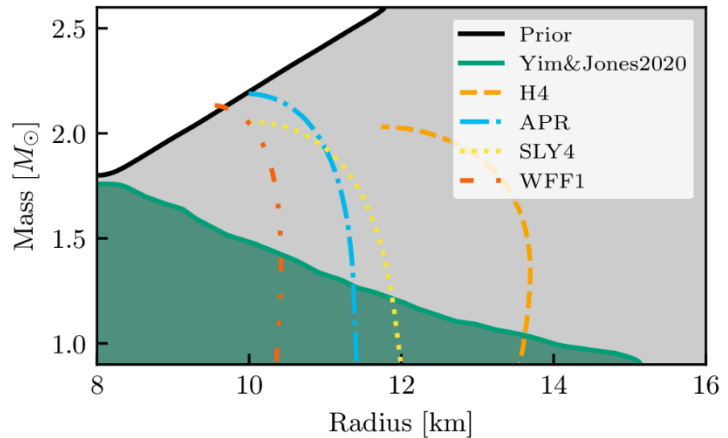


Figure 3: (figura 7 de [l'article científic](#)): el fet que els detectors de GWs de LIGO no hagin detectat cap senyal procedent del púlsar Vela després del *glitch* de 2024 indica que, o bé alguns models d'emissió no són del tot correctes, o que aquesta estrella de neutrons presenta certes propietats que fan les GWs prou febles com perquè passin desapercbedes. En particular, els nostres resultats en senyals de llarga durada suggereixen que els canvis observats en l'emissió de ràdio del púlsar després del *glitch* no són causats per una "muntanya transitòria", o bé que, si ho són, el púlsar no pot tenir una massa o mida que excedeixen certs límits. En el gràfic es mostren aquests límits en el radi (eix horitzontal) i la massa (eix vertical). La gran regió situada sota la línia negra contínua representa el conjunt de valors possibles considerats inicialment, mentre la regió ombrejada verda a l'inferior esquerra correspon al que resta després de tenir en compte la no detecció de senyals de llarga durada, però on encara assumim que una muntanya ha emès GWs d'acord amb el model específic que hem analitzat. Les línies discontinües i puntejades corresponen a diverses prediccions teòriques sobre la possible relació entre la massa i el radi d'una estrella de neutrons.

GLOSSARI

Radioastronomia: L'estudi de radiació electromagnètica de longitud d'ona molt llarga, similar a l'empurada per als senyals de ràdio o televisió, provenent de l'espai exterior.

Ones gravitacionals (GWs): Ondulacions de l'espai-temps creades per objectes massius en acceleració. Com la radiació electromagnètica, viatgen a la velocitat de la llum. Foren predites a la teoria de la relativitat general d'Einstein i es coneixen habitualment com a ones gravitacionals. Si en vols saber més, ets al lloc adequat! Et convidem a consultar les nostres altres pàgines sobre la ciència d'ones gravitacionals.

Púlsar: De l'anglès "pulsating radio source" (font de ràdio pulsant); estrella compacta en rotació ràpida i altament magnetitzada, que emet feixos de radiació electromagnètica des dels seus pols magnètics. ([Wikipedia](#))

Púlsar Vela: Una estrella de neutrons a la constel·lació de Vela, a uns 1000 anys llum de la Terra. És un dels púlsars més propers, brillants i actius que es coneixen. Sovint també ens hi referim simplement com a "Vela". Per a més informació i un vídeo del púlsar, veure també: <https://www.nasa.gov/missions/chandra/vela-pulsar/>

Estrella de neutrons: El remanent d'una estrella massiva. Quan una estrella de gran massa esgota el seu combustible nuclear, mor de manera catastròfica – una supernova – fet que pot resultar en la formació d'una estrella de neutrons: un objecte tan massiu i dens (encara que no tant com un forat negre) que els àtoms no poden mantenir la seva estructura tal i com la coneixem a la Terra. Aquestes estrelles solen tenir una massa comparable a la del Sol, però amb radis d'uns 10 km. ([Wikipedia](#))

Glitches de púlsars: Canvis sobtats en la velocitat de rotació d'un púlsar. Els mecanismes responsables a l'interior de l'estrella de neutrons encara no es comprenen del tot. No s'han de confondre amb els *glitches* dels detectors, efectes de renou molestos que dificulten encara més les nostres cerques d'ones gravitacionals.

Radiació electromagnètica: La llum visible (òptica) s'estén del vermell al violeta, però l'espectre continua més enllà d'aquest interval. Més enllà del vermell hi ha la radiació infraroja, les microones i les ones de ràdio; més enllà del violeta es troben la radiació ultravioleta, els raigs X i els raigs gamma. Els astrònoms utilitzen diferents regions de l'espectre per observar diversos aspectes de l'Univers. Encara així, alguns objectes són foscos i, per tant, difícils de detectar en qualsevol part d'aquest espectre. ([Wikipedia](#))

Ones gravitacionals contínues (CWs): Ones gravitacionals extremadament febles però persistents, que normalment s'espera que procedeixin d'estrelles de neutrons en rotació amb petites deformacions. També hem cercat aquest tipus de senyals en molts púlsars, inclos Vela; i en dades recents de LIGO hem trobat que menys del 1% de la pèrdua d'energia que frena l'estrella pot atribuir-se a ones gravitacionals. (Vegeu [aquí](#)).

Superfluid: Un estat peculiar de la matèria on el fluid flueix sense viscositat. ([Wikipedia](#))

Quilohertz: Una freqüència d'oscil·lació de mil hertzs. A les ones sonores, correspon a la part alta del rang audible de l'oïda humana; en el cas de les ones gravitacionals, també se situa a l'extrem superior del rang de sensibilitat dels detectors LIGO, cosa que dificulta més la detecció de senyals en comparació amb la seva freqüència òptima, d'uns pocs centenars d'hertzs.

Quart període d'observació: Un interval d'observació durant el qual els detectors d'ones gravitacionals de la xarxa global LIGO-Virgo-KAGRA recopilaren dades entre el maig de 2023 i el novembre de 2025.

LIGO: L'Observatori d'Ones Gravitacionals per Interferometria Làser (Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory, LIGO) és un parell de detectors d'ones gravitacionals situats als Estats Units. Un és a prop de Livingston, a Louisiana, i l'altre prop de Hanford, a Washington. Tots dos són interferòmetres làser amb dos braços perpendiculars de 4 km de longitud. ([Wikipedia](#))

MÉS INFORMACIÓ:

Visita les nostres webs:

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)
- www.iar.unlp.edu.ar (Argentine Institute of Radioastronomy – in Spanish)
- ra-wiki.phys.utas.edu.au UTAS Radio Astronomy Group (Mt. Pleasant Radio Observatory)

Llegeix una prepublicació gratuïta de l'article complet [aquí](#) o a arxiv.
Traduït al català per Irene Prohens Peteracova i Marta Carrió (a partir de la versió original en anglès), i revisat per Maria Antònia Ferrer Martínez.