

GW230529: OBSERVACIÓ DE LA FUSIÓ D'UN ESTEL DE NEUTRONS I UN OBJECTE COMPACTE DESCONEGUT

La primera detecció directa d'[ones gravitacionals](#) el 2015, amb [GW150914](#), va marcar l'inici d'una nova era per l'astronomia. Des d'aleshores, s'han detectat moltes ones gravitacionals, amb diversos orígens. Nogensmenys, totes han vingut de **fusions de sistemes binaris compactes**, consistents en estels de neutrons i/o forats negres. En aquest article presentem [la detecció de GW230529](#), una fusió d'un sistema binari compacte observat el 29 de maig de 2023, durant la primera part del quart període d'observació (O4a) de la xarxa de detectors **LIGO-Virgo-KAGRA**, on un dels components del sistema té una massa major que l'esperada en un estel de neutrons i menor que l'esperada en un forat negre.

COM L'HEM DETECTAT?

Analizem les dades de cada detector operatiu utilitzant la tècnica de filtratge adaptat (matched-filtering). Això implica la comparació de les dades del detector amb models de senyals per tal de trobar la predicció més acurada, en cas que un senyal real estigui amagat entre les dades. Aquest procés té com a resultat una estimació de la potència del senyal en funció del temps, la relació senyal-soroll (signal-to-noise ratio). Si les dades contenen un senyal astrofísic, la relació senyal-soroll serà alta, altrament serà baixa. Aquesta tècnica ha estat efectiva en la identificació de senyals dèbils d'ones gravitacionals en les dades del detector, però no és infal·lible. Diverses fonts de soroll poden interferir amb les mesures o fins i tot imitar senyals reals.

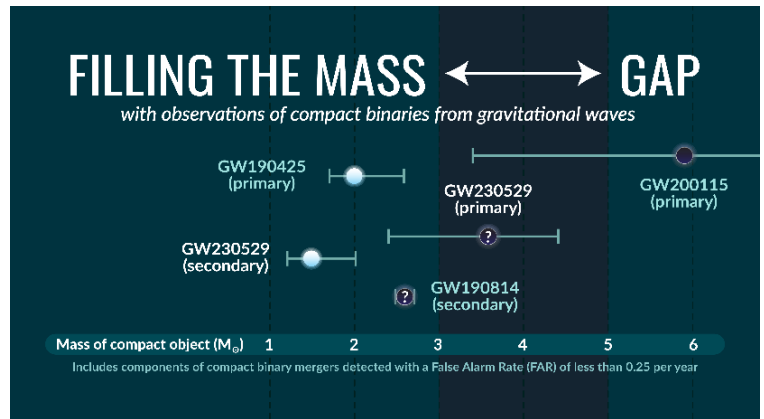


Figura 1: Il·lustració que mostra algunes de les masses de components de deteccions d'ones gravitacionals, que es troben al voltant de la regió entre 3 i 5 masses solars, també anomenada "esclatxa de masses baixes". Els cercles de color blau cel representen estels de neutrons, els de color negre representen forats negres i els que contenen un signe d'interrogació indiquen que són probablement forats negres però podria ser que fossin també estels de neutrons. L'objecte més gran de la detecció GW230529 es troba en l'esclatxa de masses baixes. (Crèdit: S. Galadage, Observatoire de la Côte d'Azur.)

COM SABEM QUE GW230529 HA ESTAT UN ESDEVENIMENT REAL?

La major part del temps cerquem senyals en què els diferents detectors coincideixin en el temps i en els paràmetres de la font. Tot i això, no ens limitem als esdeveniments coincidents. Les tècniques d'anàlisi són prou refinades per garantir que un únic detector és suficient per anunciar una detecció. I encara sort, perquè això ha permès l'anàlisi d'aquest esdeveniment excepcional, GW230529, en què les úniques dades que podíem usar eren les del detector [LIGO-Livingston](#). Tres algorismes de cerca (pipelines) independents han trobat la detecció de GW230529. Totes tres utilitzen la tècnica de filtratge adaptat però l'implementen de formes diferents i han desenvolupat eines molt potents per discriminar les senyals reals del soroll. La maduresa d'aquests algorismes ens permet validar i verificar els seus resultats.

Per tant, és extremadament improbable que el soroll del detector pogués produir un senyal com GW230529. L'esdeveniment va ser detectat durant un anàlisi en temps real de les dades del detector i la detecció va ser verificada en acabar el període d'observació. La detecció va ser anunciada amb una taxa de fals positiu menor a una cada mil anys. Això significa que, en absència de senyals astrofísiques, esperem que una senyal així tingui lloc en el soroll de forma atzarosa menys d'un cop cada mil anys.

A la **Figura 2** ensenyem com aquest esdeveniment destaca respecte la resta de candidats.

Visita les pàgines web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



PER QUÈ ÉS INTERESSANT AQUESTA DETECCIÓ?

La comunitat científica ha proposat en les darreres dècades l'existència de l'**esclletxa de masses baixes** en la distribució de masses dels objectes compactes entre $3 M_{\odot}$ i $5 M_{\odot}$ (M_{\odot} significa **masses solars**), on esperem l'existència de pocs objectes compactes. No obstant, observacions recents de sistemes binaris a través d'**ones electromagnètiques** o ones gravitacionals han proposat candidats per a sistemes binaris amb un component en l'esclletxa de masses. Per exemple, la massa de l'objecte més petit en [GW190814](#) tenia una massa estimada, amb molt alta probabilitat, entre $2.50 M_{\odot}$ i $2.67 M_{\odot}$, més alta que l'estel de neutrons més massiva coneguda en temps de la detecció, però menor que les previsions de les masses de forats negres.

Amb una massa estimada de l'objecte major al voltant de les $3.6 M_{\odot}$, GW230529 és el primer sistema on l'objecte *més gran* cau en l'esclletxa de masses, com es pot veure en la **Figura 3**. Donat el nostre coneixement actual de les poblacions d'estels de neutrons i forats negres, la massa de l'objecte major és compatible (amb un 99% de probabilitat) amb un forat negre de massa menor a $5 M_{\odot}$. De totes maneres, la probabilitat que l'objecte major sigui un estel de neutrons també s'ha pogut estimar, tenint en compte el coneixement actual teòric i experimental en física nuclear, així com les poblacions de fonts astrofísiques. Aquesta probabilitat de ser un estel de neutrons és petita, però no nul·la, i sota certes condicions pot arribar a alguns punts percentuals. Per això, no podem excloure aquest escenari amb certesa. D'altra banda, la massa de l'objecte menor de GW230529 que és amb un 90% de probabilitat entre $1.2 M_{\odot}$ i $2.0 M_{\odot}$, fa que sigui amb gran seguretat un estel de neutrons.

Figura 3: Distribució de probabilitat per les masses de les components de diversos sistemes binaris. Els valors més probables de les masses de cada component estan indicats pels pics de les distribucions de probabilitat. La gràfica superior és per a les masses dels objectes majors i la de la dreta per als objectes menors. Les línies de punts indiquen igual quocient de massa $q = m_2 / m_1$.

Els sistemes GW170817 (rosa) i GW190425 (verd) són compatibles amb sistemes amb dos estels de neutrons. GW200105_162426 i GW200115_042309 (taronja i blau respectivament) són compatibles amb sistemes mixtos d'estel de neutrons i forat negre. La massa menor del sistema GW190814 (vermell) podria ser tant un forat negre com un estel de neutrons.

L'esclletxa de masses entre 3 i $5 M_{\odot}$ es representa amb un fons gris. Podem observar com GW230529 (en verd blavós) està enmig dels sistemes binaris d'estels de neutrons i els sistemes mixtos amb forat negre, amb la massa major en l'esclletxa.

FIGURES DE LA PUBLICACIÓ

Per a més informació sobre les figures i com han estat realitzades, llegiu l'[article preprint](#) disponible públicament.

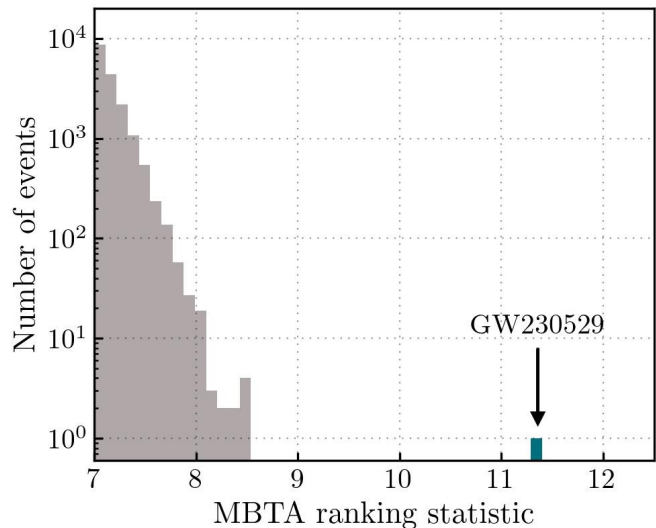
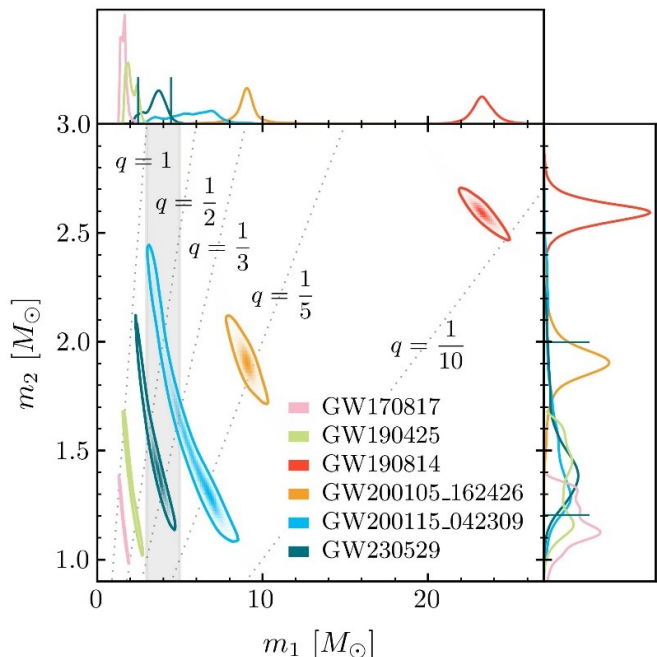


Figura 2: Estadístic de classificació d'un dels algorismes de cerca (anomenat MBTA) per a tots els esdeveniments candidats al detector LIGO Livingston durant les dues primeres setmanes del quart període d'observació (O4a).

L'eix horitzontal expressa el valor de l'estadístic, quantitat que s'utilitza per ordenar les alertes de senyal i que incorpora a més, diversos tests per discriminar senyals de soroll. Com més alt el valor de l'estadístic, més clar és l'esdeveniment i més compatible és amb un senyal astrofísic.

La distribució grisa correspon als esdeveniments que no foren prou significatius per a ser classificats com d'origen astrofísic. La columna blava és l'esdeveniment GW230529. Podem observar que l'estadístic de GW230529 és molt més gran que el de la resta d'esdeveniments, ja que cap té un estadístic major que 8.5 excepte GW230529, amb un valor de 11.4.



QUÈ ENS ENSENYA?

Les fusions d'estels de neutrons i forats negres (NSBH en les sigles en anglès) són esdeveniments excepcionals. És per això que qualsevol nova detecció és molt valuosa per estudiar la freqüència d'aquests sistemes i caracteritzar les poblacions d'estels de neutrons i forats negres, un dels objectius principals de l'astronomia d'ones gravitacionals. Això implica inferir les distribucions de masses d'aquests objectes, derivar les masses mínimes o màximes d'aquests objectes, i estudiar l'abundància d'objectes compactes rotant de diverses masses.

Utilitzant només GW230529, la freqüència de fusió d'esdeveniments similars és d'uns 39 esdeveniments per any en un volum d'uns 3.5×10^{28} anys llum cúbics. Un anàlisi incloent altres [candidats NSBH](#) detectats durant la tercer període d'observació (O3) dona uns 61 esdeveniments l'any en el mateix volum. Un tercer anàlisi incloent candidats menys significatius dona uns 95 esdeveniments l'any en aquest volum.

D'aquests estudis trobem que la freqüència de fusió de sistemes similars a GW230529 és comparable a la freqüència inferida durant O3 per altres events la massa major

dels quals era sens dubte un forat negre. Aquesta conclusió reforça la hipòtesi que la component major del sistema GW230529 és un forat negre. La distribució de probabilitat de les freqüències de fusió de NSBH es mostra en la **Figura 4**.

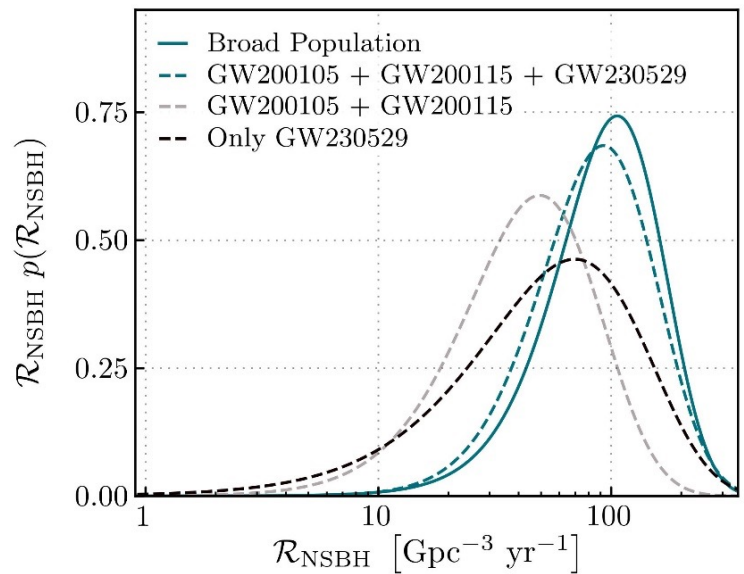


Figura 4: Distribucions de probabilitat per a la freqüència de fusió de sistemes NSBH. Les distribucions de probabilitat assoleixen el seu valor més alt al valor més probable de la freqüència de fusió, indicada en l'eix horitzontal. Les línies de ratlles es deriven utilitzant models de població únicament de NSBH. La línia sòlida es deriva utilitzant un model de població que inclou també esdeveniments menys significatius, com es discuteix en el text.

Veiem que els valors pic de les diverses distribucions són relativament propers entre si, i que aquestes distribucions se superposen notablement. En particular, el valor més probable trobat utilitzant únicament GW230529 és comparable a l'obtingut incloent altres esdeveniments NSBH.

Com que l'objecte més gran se situa en l'esclatxa de masses, GW230529 és un candidat ideal per a afinar **models de població**. Es consideren tres models diferents, i s'estudia com es veuen afectats per l'observació de GW230529. Els dos primers models comprenen tots els tipus de sistemes binaris d'objectes compactes (dos forats negres, dos estels de neutrons o un de cada, el NSBH), mentre que el tercer model considera únicament la població de NSBH. Incloure GW230529 en els dos primers models no canvia significativament el resultat, cosa que significa que no és un sistema atípic per a aquest models. En canvi, en el tercer es produeix una alteració significativa, com s'observa en la **Figura 5**. Veiem que en aquest cas, l'abundància de forats negres de masses baixes s'incrementa i la massa mínima dels forats negres es veu rebaixada. Quan incloem GW230529, trobem una massa mínima d'uns $3.36M_{\odot}$, comparada amb el valor previ d'uns $6.04M_{\odot}$ en aquest model.

El procés de formació que va dur al sistema GW230529 és incert. El coneixement actual de **les supernoves de tipus II** (core-collapse) en estels massives fa pensar que aquest no és l'origen del seu component de massa major, ja que és poc massiu. Un escenari més plausible seria la formació per **fallback**, on el forat negre es forma després de la supernova, incorporant matèria residual al nucli. Resultats més recents de models numèrics mostren que la formació de forats negres d'entre 3 i $6M_{\odot}$ és possible via aquest mecanisme. Simulacions de col·lapse del nucli per a estels d'heli prediuen masses de forats negres tan baixes com la massa màxima d'estels de neutrons, tot i que el rang per sota de $5M_{\odot}$ seria menys probable. A dia d'avui, aquests models encara tenen incerteses massa grans pel que fa al resultat del procés, cosa que fa difícil determinar amb precisió límits per a les masses dels objectes compactes. GW230529 és, per tant, un resultat molt valuós per a restringir aquests models.

Un altre escenari possible per a la formació de la component major seria una fusió d'estels de neutrons. En aquest cas, hauríem d'imaginar que la component de massa menor formaria part originalment d'un sistema triple o quàdruple, o que hauria estat capturada per la component major durant la seva evolució en un clúster estel·lar jove o en un nucli de galàxia actiu (AGN). Tampoc hem d'excloure un possible origen no estel·lar, com seria un **forat negre primordial**.

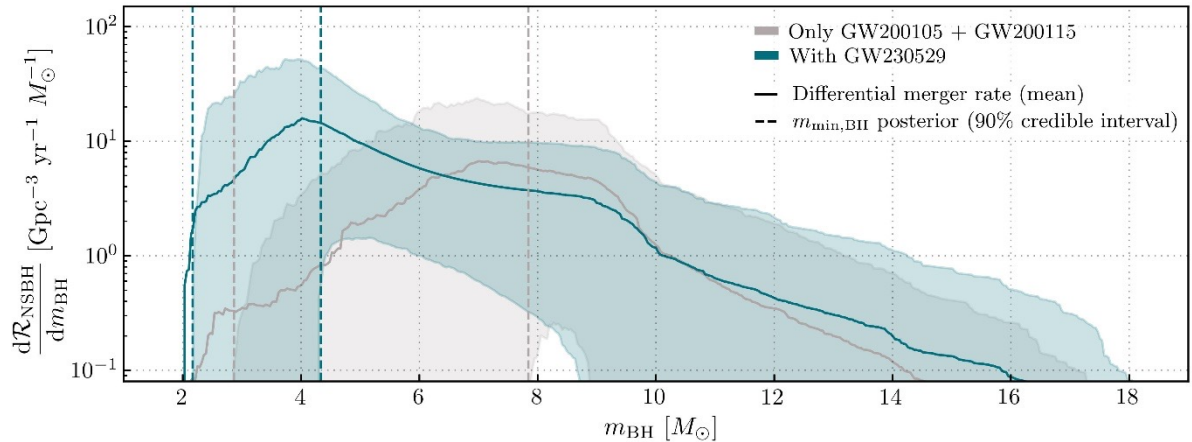


Figura 5: Frequència de fusió de sistemes binaris NSBH (eix vertical), en funció de la massa del forat negre (eix horitzontal) del sistema. Les línies sòlides mostren les freqüències de fusió per a dos models diferents, i les àrees ombrajades la incertesa corresponent als models. Les línies verticals mostren el rang esperat per a la massa mínima d'un forat negre, amb un 90% de confiança. El model de població NSBH representat de color gris exclou GW230529, mentre que el de color blau verdós l'inclou en el model. Observem que la inclusió de GW230529 incrementa l'abundància de sistemes amb forats negres de massa baixa, alhora que empeny la massa mínima dels forats negres cap a valors més baixos.

Investigacions posteriors de sistemes en l'esclatxa de masses com GW230529 ens permetran refinar la nostra comprensió de les poblacions de forats negres i estels de neutrons. Al seu torn, això permetrà comprendre millor els seus mecanismes de formació i, en el cas dels estels de neutrons, la seva estructura interna.

PER SABER-NE MÉS:

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

Llegeix el preprint de l'article complet [aquí](#).

Article traduït per Joan Llobera-Querol i revisat per Rodrigo Tenorio.

GLOSSARI

Fusió de sistema binari compacte: abreviat com a CBC, consisteix de dos forats negres (BBH, binary black hole), dos estels de neutrons (BNS, binary neutron star) o un forat negre i un estel de neutrons (NSBH) que orbiten i acaben fusionant-se. El procés produeix ones gravitacionals amb freqüència i amplitud creixent a mesura que els objectes s'apropen i acceleren. L'objecte resultant pot ser un estel de neutrons o un forat negre, depenent del sistema inicial. Els objectes que formen el sistema són les components, essent la primària la de major massa i la secundària la de menor.

Forat negre: objecte compacte amb una densitat tal que la seva velocitat d'escapament és major que la velocitat de la llum. Això provoca que aparegui com una regió de l'espai negra ja que la llum d'aquesta regió no en pot escapar.

Estel de neutrons: objecte compacte extremadament dens format gairebé completament de neutrons amb una petita mescla de protons i electrons. Són el resultat del col·lapse d'estels massives després d'un procés anomenat supernova de tipus II. La massa màxima esperada d'un estel de neutrons és d'aproximadament 3 M_{\odot} .

Forat negre primordial: tipus de forat negre hipotètic que podria ser format a l'univers primitiu, just després del Big Bang. Les seves masses poden anar de $10^{-18} M_{\odot}$ a $10^{36} M_{\odot}$.

LIGO, Virgo i KAGRA: localitzats respectivament als Estats Units, Itàlia i Japó, són els instruments que ens permeten detectar ones gravitacionals. Bàsicament, els detectors consisteixen de dos braços, de llargada quilomètrica, en forma de "L", amb miralls a la punta, entre els quals circulen els raigs làser. Utilitzem el làser per a mesurar variacions relatives en la llargada dels braços provocades per ones gravitacionals creuant la Terra. La distància entre els braços de cada detector es monitoritza constantment i constitueix les dades en què cerquem senyals d'ones.

Filtratge adaptat (matched filtering): mètode utilitzat per analitzar les dades del detector i descobrir esdeveniments de fusió de sistemes binaris compactes. Això implica comparar les dades dels detectors amb les ones gravitacionals predites teòricament, que depenen de les propietats del sistema binari, cercant-hi correlacions. Quan una ona gravitacional creua la Terra, hauríem d'observar una bona correspondència entre les dades del detector i el senyal predit.

Esclatxa de masses baixes: rang de masses on s'espera que existeixin pocs objectes compactes. S'estén des d'un 3 M_{\odot} , la massa màxima d'una estel de neutrons, fins a les 5 M_{\odot} , la massa mínima d'un forat negre.

Massa solar o M_{\odot} : massa del Sol, utilitzada com a unitat estàndard de massa en astronomia. Equival aproximadament a 2×10^{30} kg.

Any llum: unitat de distància. 1 any llum és la distància que viatja la llum en un any, basada en la velocitat de la llum al buit. Equival aproximadament a 9.5×10^{12} km.

Model de població: model teòric de l'abundància d'objectes compactes (estels de neutrons o forats negres) com a funció dels paràmetres dels objectes.

Supernova de tipus II (core-collapse): En un estel, la pressió del gas compensa l'atracció gravitacional del seu nucli. Quan, al final de la vida de l'estel, la pressió decreix, l'estel ja no pot compensar l'atracció gravitatòria, patint un col·lapse gravitacional extremadament ràpid cap al seu nucli, amb diversos resultats. El col·lapse sobtat pot crear una pressió altíssima a l'estel, provocant una explosió com a supernova (d'aquí el nom de core-collapse, col·lapse del nucli). La supernova pot deixar com a romanent una estel de neutrons o un forat negre. Si l'estel inicial era massa massiva, col·lapsarà directament en un forat negre, esquivant l'etapa de supernova.

Fallback: en l'escenari d'una supernova de tipus II que forma una estel de neutrons, la matèria residual pot caure de nou. Aquesta accreïó de matèria pot incrementar la massa de l'estel de neutrons més enllà del màxim teòric i provocar la transformació en un forat negre.

Algorisme de cerca (pipeline): programa computacional que consisteix en una cadena de processos. Aquests acondicionen les dades per al seu anàlisi, les filtren i calculen diverses quantitats (estadístics), amb l'objectiu de rebutjar els esdeveniments provocats pel soroll i estimar la significació dels esdeveniments candidats astrofísics. Alguns algorismes corren en temps real, altres fora de línia i altres en ambdós. Més informació es pot trobar en la Public alerts user guide d'IGWN.

Cerca fora de línia: anàlisis produïdes en dades de períodes d'observació anteriors, típicament durant els períodes en què els detectors no estan operatius per manteniment i millores. Complementen les anàlisis en temps real que es duen a terme durant els períodes d'observació.

Taxa de fals positiu: s'utilitza per quantificar la probabilitat que un esdeveniment sigui causat per soroll aleatori. Es calcula simulant esdeveniments que provenen de soroll i mirant la potència del seu senyal, per derivar una distribució de la freqüència esperada de tals esdeveniments com a funció de la potència del senyal. Més concretament, si un esdeveniment té una taxa de fals positiu d'1 per dia, significa que esperem el soroll del detector produeixi aquest tipus d'esdeveniment aproximadament un cop al dia. En aquest cas, tindriem poca confiança que aquesta senyal tingués origen astrofísic.