

ESTAVA SN2023IXF SUFICIENTMENT A PROP PER DETECTAR LA SEVA EMISSIÓ D'ONES GRAVITACIONALS?

INTRODUCCIÓ

Els col·lapses estel·lars són uns dels fenòmens astrofísics més energètics. Ocorren quan un estel massiu la massa del qual és més gran que ~ 8 vegades la massa del Sol està arribant al final del seu cicle de vida. L'hidrogen s'ha fusionat en heli, després l'heli en carboni, etc. Les reaccions de fusió nuclear produeixen un gas d'electrons la pressió del qual, a causa del **principi d'exclusió de Pauli**, s'oposa a la gravetat. La temperatura i la densitat de l'estel augmenten a mesura que el nucli es contrau fins que es compon principalment de ferro. Quan la massa del nucli supera el **límit de Chandrasekhar** d' 1.4 vegades la massa del sol (que es denota com $M_{\odot}$), la pressió de **degeneració dels electrons** ja no és prou forta com per contrarestar la gravetat i el nucli s'ensorra en una fracció de segon. Es produeixen neutrons i neutrins. Quan la densitat arriba a la densitat d'un nucli d'àtom, el col·lapse s'atura i la matèria que cau rebota, generant una ona de xoc que finalment s'atura. Quan revifa, gràcies a l'escalfament dels neutrins, la **convecció de la matèria** i/o la **inestabilitat de xoc d'acreció permanent** (SASI), l'ona de xoc expulsa les capes exteriors de l'estel generant la supernova observada als telescopis òptics. Aquest tipus particular de supernova s'anomena supernova de col·lapse del nucli (CCSN).

Durant molts anys s'ha considerat que els col·lapses estel·lars són una font de radiació gravitatòria. Com que els processos físics a l'origen del col·lapse són força complexos, l'emissió d'ones gravitatòries (GW) és difícil de predir i una detecció proporcionaria una gran quantitat d'informació sobre la dinàmica del col·lapse. Tanmateix, s'espera que el senyal gravitatori sigui feble, ordres de magnitud més feble que el senyal emès per la fusió de dos estels de neutrons o dos forats negres. Només el CCSN proper, que passi a la nostra galàxia o en una galàxia del **Grup Local**, s'espera que emeti prou radiació gravitatòria per ser detectada per l'actual xarxa de detectors terrestres composta pels detectors LIGO als EUA, el detector Virgo a Itàlia i KAGRA al Japó. Malauradament, la taxa de CCSN és molt baixa. De mitjana, s'esperen només uns quants CCSN per galàxia i per segle. SN1987A, observat al Gran Núvol de Magallanes (50 kpc o 163.000 a.l.) segueix sent la CCSN més recent del nostre univers local. Per augmentar el nombre de fonts potencials, la col·laboració LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) està buscant GWs emeses per CCSN més llunyanes, a uns 30 milions d'anys llum, o unes 10 vegades més lluny que la propera galàxia d'Andròmeda.

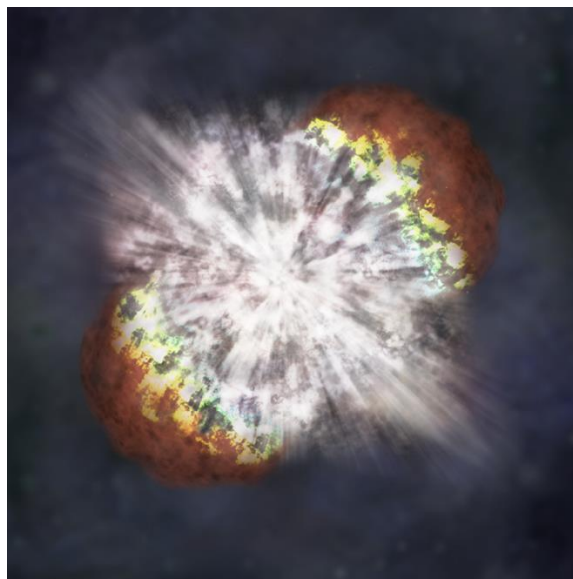


Figura 1: Il·lustració artística d'una supernova, un dels fenòmens més energètics de l'Univers que és el destí dels estels massius. Crèdit de la imatge: NASA/CXC/M.Weiss

DESCOBREIX-NE MÉS:

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



FIGURES DE LA PUBLICACIÓ

Per a més informació sobre aquestes figures i com es van produir, llegiu la [preimpresió](#) gratuïta.

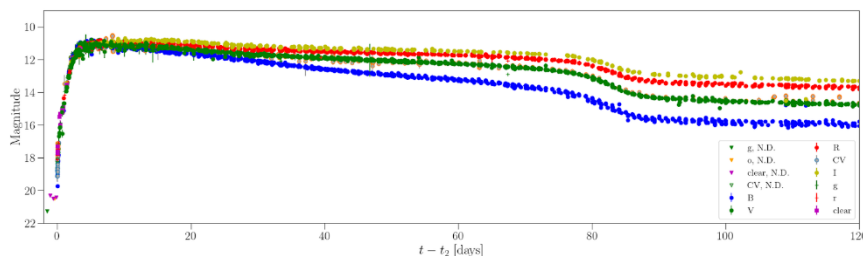


Figura 2: Evolució de la llum de SN2023ixf cobrint diferents bandes fotomètriques durant 120 dies.

PER QUÈ ÉS INTERESSANT SN2023ixf PER A L'ASTRONOMIA D'ONES GRAVITACIONALS?

SN2023ixf és una supernova de tipus II que va ser descoberta per l'astrònom aficionat Koichi Itagaki el 19 de maig de 2023 a la galàxia amfitriona Messier 101, també coneguda com la Galàxia del Molinet. El que fa que SN2023ixf sigui interessant és la relativa proximitat d'aquest esdeveniment. Situat a 6.7 Mpc (21.8 milions d'anys llum) de distància, aquesta és una de les CCSN més properes descobertes mentre els detectors LVK prenen dades. Això va oferir una gran oportunitat per buscar un possible homòleg de GW. SN2023ixf es pot comparar amb SN2017eaw que es va descobrir en una galàxia gairebé a la mateixa distància. Però, en aquell moment, els dos detectors LIGO eren 2-3 vegades menys sensibles que al 2023.

Quan va passar SN2023ixf, els dos detectors LIGO estaven operatius, però encara estaven en una fase d'afinació abans que el quart període d'observació de la col·laboració LIGO-Virgo-KAGRA comencés oficialment el 24 de maig. Com a conseqüència, els dos detectors LIGO no estaven observant constantment durant el període de temps en què es va produir el col·lapse SN2023ixf.

Però, com sabem quan va passar el col·lapse? SN2023ixf ha estat seguit per molts telescopis òptics, de raigs X i radiotelescopis. Com a CCSN típica, la corba de llum mostra un augment fins a un màxim uns cinc dies després del descobriment de la supernova seguit d'un altiplà que dura aproximadament un mes (vegeu la **Figura 2**). A causa de la riquesa d'observacions, el moment de l'esclat del xoc, quan apareix la llum per primera vegada, està força ben estimat. Tanmateix, això no diu quan va passar el col·lapse, ja que hi ha un retard entre el col·lapse i l'esclat del xoc que depèn de la naturalesa de l'estel que es va esfondrar. Un gran conjunt d'observacions d'imatge prèvies al descobriment M101 de telescopis terrestres, el telescopi espacial Hubble i el telescopi espacial Spitzer suggereixen que la naturalesa del progenitor de l'estel SN2023ixf és una supergegant vermella polsegosa i variable, amb una massa estimada que oscil·la entre 8 i 20 masses solars. Aquesta gran incertesa sobre la massa del progenitor implica que el col·lapse podria haver passat fins a 5 dies abans de l'esclat del xoc. En aquesta finestra de temps, els dos detectors LIGO Hanford (H1) i Livingston (L1) només prenen dades simultàniament el 15% del temps total.

QUÈ HEM TROBAT?

Els senyals CCSN GW són complexos i només es poden predir mitjançant codis de simulació hidrodinàmica que també consideren la relativitat general com el marc de la gravetat. Les prediccions depenen dels paràmetres progenitors dels estels que es desconeixen. Per tant, les tècniques de **filtratge coincidents** no són aplicables. En comptes d'això, confiem en el **coherent WaveBurst (cWB-XP)**, un algorisme que cerca correlació en les dades d'almenys dos detectors suposant que el senyal és curt - de l'ordre d'un segon màxim - amb freqüències repartides entre ~20 Hz i 2 kHz.

No s'ha trobat cap candidat d'esdeveniment interessant en el període de cinc dies en què podria haver-se produït el col·lapse. Més precisament, l'esdeveniment més significatiu té una probabilitat de falsa alarma del 76%, cosa que fa que l'esdeveniment sigui probable a causa del soroll. L'absència de senyal GW podria ser deguda al fet que el col·lapse es va produir quan els dos detectors LIGO no estaven en mode d'observació (15% de cobertura). L'altra explicació és la debilitat del senyal GW emès. Hem estimat que fins i tot els models més optimistes de la relativitat numèrica prediuen un senyal GW detectable només fins al Gran Núvol de Magallanes situat a uns 150 mil anys llum, dos ordres de magnitud més a prop que SN2023ixf.

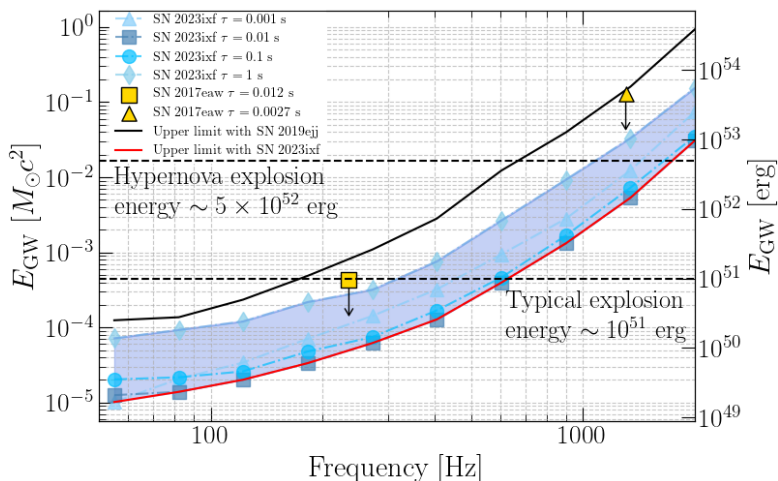


Figura 3: Energia GW en unitats de massa solar multiplicada per la velocitat de la llum al quadrat, o **erg**, en funció de la freqüència d'un senyal en mode barra amb una eficiència de detecció del 50% i una taxa de falsa alarma de 2.1 per dia. La regió blava ombrejada conté resultats de senyals en mode de barra de diferent durada des d'uns pocs ms fins a 1s. La durada del senyal ve donada pel paràmetre τ que apareix a la llegenda. Els marcadors quadrats i triangulars grans representen l'energia GW que s'ha restringit mitjançant les dades de SN2017eaw. La línia negra mostra la millor restricció obtinguda amb SN2019ejj. Les línies horitzontals discontinües mostren l'energia electromagnètica típica emesa per una supernova estàndard i per una hipernova.

QUÈ HEM APRÈS?

No hem observat cap senyal de GW associat a SN2023ixf, però si suposem que el col·lapse es va produir quan els dos LIGO estaven en mode d'observació, podem estimar quant energètic hauria d'haver estat el col·lapse per ser detectable amb detectors de GW. Per descomptat, això depèn del mecanisme d'explosió de la supernova en joc. L'estel progenitor estava girant? La convecció de la matèria era prou forta com per excitar els modes fonamentals de l'estel de **protoneutrons (PNS)**? La SASI estava millorant l'escalfament dels neutrins? Els camps magnètics van jugar algun paper a l'hora de millorar el senyal? Com que no coneixem les respostes, considerem l'emissió de GW d'un simple el·lipsoide triaxial rotatiu amb una asimetria (similar a una pilota de rugbi) per modelar el desenvolupament **d'una inestabilitat en mode barra** que de vegades està present en simulacions de col·lapse del nucli. SN2023ixf permet millorar en gairebé un ordre de magnitud la restricció de l'energia que podria haver estat emesa per aquest esdeveniment. Per a una hipotètica emissió a baixa freqüència, som sensibles a una emissió de l'ordre $10^{-5} M_{\odot}c^2$ tal com es mostra a la **Figura 3**. Aquesta quantitat correspon a l'energia d'una font que es detectaria amb una eficiència del 50% i per a una probabilitat de falsa alarma del 76%. Això s'ha de comparar amb les prediccions de les simulacions numèriques de la CCSN: el rang d'energia emesa és bastant ampli, des de $10^{-10} M_{\odot}c^2$ per al progenitor no rotatiu menys energètic fins a $10^{-6} M_{\odot}c^2$ per a fonts altament rotatives, on l'energia s'expressa en termes d'una fracció de la massa del sol tenint en compte la famosa equació d'Einstein $E=mc^2$. Pel que fa a l'energia emesa, això significa que amb esdeveniments CCSN com SN2023ixf encara estem a diversos ordres de magnitud del que prediu el mecanisme d'explosió menys energètic.

L'amplitud del senyal GW en mode de barra es pot parametritzar mitjançant un factor d'asimetria, també anomenat el·lipticitat. La **Figura 4** informa de l'el·lipticitat per a un rang de freqüències i durades del senyal GW. Les restriccions més estrictes d'el·lipticitat s'obtenen per als senyals més llargs, que van des de 10^3 a la freqüència de cerca més baixa fins a 1.04 a 2 kHz. Això millora les restriccions anteriors establertes amb SN2019ejj descobertes al tercer període d'observació.

PERSPECTIVES

Tot i que SN2023ixf és un dels esdeveniments CCSN més interessants registrats en els últims anys per buscar l'emissió de GW, malauradament, va passar quan la xarxa de detectors de GW terrestres no estava totalment operativa i tenim dades de GW només per al 15% de tots els temps possibles del col·lapse, fet que limita les possibilitats de detecció.

Suposant que el col·lapse es va produir quan els dos detectors LIGO estaven en mode d'observació, SN2023ixf ens permet restringir l'espai de paràmetres per als models d'emissió GW. Tanmateix, les millors perspectives per a una detecció de GW amb l'actual generació de detectors de GW afavoreixen una CCSN dins del Grup Local.

DESCOBREIX MÉS:

Visita les nostres pàgines web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrru.tokyo.ac.jp/en/

Llegiu una preimpressió gratuïta de l'article científic complet [aquí](#) o a [arXiv.org](https://arxiv.org).

Traducció al català per Maria Rosselló i Joan Llobera (a partir de la versió original en anglès a <https://ligo.org/science-summaries/sn2023ixf/>).

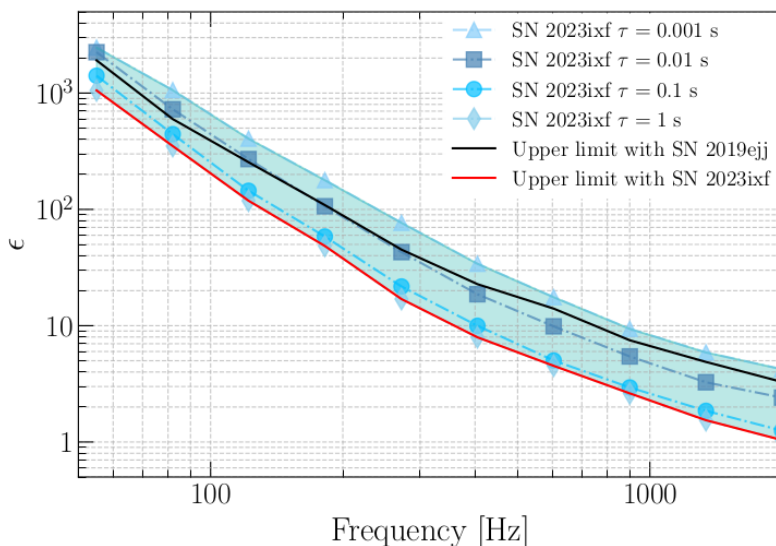


Figura 4: Restriccions a l'el·lipticitat del PNS en funció de la freqüència dels senyals en mode de barra establertes per la cerca d'una eficiència de detecció del 50% i una taxa de falses alarmes de 2.1 per dia. La regió ombrejada conté resultats d'un ampli rang de durada del senyal GW donada pel paràmetre τ de la llegenda. El paràmetre d'el·lipticitat indica quant es desvia la forma de la font d'una esfera regular. Les millors limitacions s'obtenen per a senyals GW a altes freqüències.

GLOSSARI

Límit de Chandrasekhar: la massa màxima teòrica que pot tenir una nana blanca i seguir sent una nana blanca. Per sobre d'aquesta massa ($1.4 M_{\odot}$), la pressió de degeneració electrònica no és suficient per evitar que la gravetat col·lapsi l'estel formant un estel de neutrins o un forat negre.

Gas d'electrons degenerats: gas d'electrons confinat a un volum finit i amb una alta densitat.

Principi d'exclusió de Pauli: en mecànica quàntica, el principi d'exclusió de Pauli estableix que dues partícules idèntiques amb espín quàntic mig enter (també anomenada partícula de fermió) no poden ocupar simultàniament el mateix estat quàntic. Aquest principi va ser formulat per primera vegada pel físic austríac Wolfgang Pauli l'any 1925 per als electrons.

Supernova de col·lapse del nucli: esdeveniment explosiu que es produeix quan el nucli d'un estel massiu col·lapsa per gravetat, donant lloc a una supernova que emet grans quantitats d'energia i sovint deixa enrere un estel de neutrins o un forat negre.

Grup Local: una col·lecció de més de 50 galàxies, inclosos la Via Làctia, Andròmeda i Triangulum, que estan lligades gravitacionalment i abasten aproximadament 10 milions d'anys llum de diàmetre.

Supernova tipus II: un tipus d'explosió d'estel·lar que es produeix al final del cicle vital d'un estel massiu. Aquestes supernoves es caracteritzen per la presència de línies d'hidrogen en els seus espectres, que solen estar associades a l'emissió de radiació gravitacional.

Inestabilitat de xoc d'acreció permanent: un moviment de batuda a gran escala del front de xoc aturat, que normalment dura una fracció de segon després del col·lapse, pot influir de manera crítica en la convecció.

Corba de llum: gràfic que mostra a l'evolució temporal de la intensitat de la llum emesa per un objecte astronòmic. La intensitat de la llum es mesura normalment en una banda de freqüència determinada.

Esclet de xoc: els fotons que sorgeixen quan l'ona de xoc avançada surt de la fotosfera a estel·lar, marcant els primers senyals electromagnètics detectables de supernoves de col·lapse del nucli.

Superegament vermella: els estels més grans de l'univers en termes de volum amb la classe de lluminositat supergegants.

Filtratge coincident: mètodes de processament de senyal que utilitzen la correlació creuada per detectar patrons o senyals en dades sorolloses. S'utilitza per detectar ones gravitacionals emeses per objectes compactes binaris coalescents per als quals la forma d'ona és coneguda analíticament.

Inestabilitat en mode de barra: un fenomen que pot ocórrer en estels en rotació ràpida o en les restes d'estels col·lapsats. És un tipus d'inestabilitat rotacional on la forma de l'estel o del nucli es desvia de la simetria esfèrica i pren una estructura semblant a una barra.

Estel de protoneutrons: la resta del nucli després del col·lapse d'un estel amb una massa inferior a unes 20 masses solars. La densitat és de l'ordre de $10^{14} \text{ g cm}^{-3}$. Té una temperatura molt alta de fins a 50 MeV per barió.