

GW230529: OBSERVAREA UNEI COLIZIUNI DINTRE O STEA NEUTRONICĂ ȘI UN OBIECT COMPACT NECUNOSCUT

Prima detecție directă a [undelor gravitaționale](#) (UG) în 2015 prin evenimentul [GW150914](#) a marcat zorii unei noi ere pentru astronomie. De atunci, s-au făcut mult mai multe detecții de UG, provenite din diferite tipuri de surse. Toate au fost **coalescențe de sisteme binare compacte**, formate din stele neutronice (SN) și/sau găuri negre (GN). Aici raportăm [detecția evenimentului GW230529](#), o coalescență a unei binare compacte observată la 29 mai 2023, în prima parte a celei de-a patra campanie de observare (O4a) a detectoarelor **LIGO-Virgo-KAGRA**, având unul dintre componentele de natură incertă, cu o masă mai mare decât intervalul așteptat pentru SN și mai mică decât intervalul așteptat pentru GN.

CUM AM DETECTAT ACEST EVENIMENT?

Analizăm datele de la fiecare detector aflat în funcțiune folosind tehnica de **matched-filtering** (filtrare prin potrivire – n. tr.). Tehnica implică compararea datelor de la detector cu semnalele prezise pentru a găsi predicția care se potrivește cel mai bine, în cazul în care un semnal real este ascuns în date. Astfel se produce o estimare a puterii semnalului în funcție de timp, sau o serie temporală a raportului semnal-zgomot. Dacă există într-adevăr un semnal astrofizic în date, raportul semnal-zgomot va fi ridicat, altfel va fi scăzut. Această tehnică s-a dovedit a fi eficientă în identificarea semnalelor de UG slabe în date, dar nu este complet sigură. Diverse surse de zgomot pot interfera cu măsurătorile noastre sau chiar pot imita semnale de UG.

CUM ȘTIM CĂ GW230529 ESTE UN EVENIMENT REAL?

De cele mai multe ori căutăm semnale care coincid atât în timp, cât și în parametrii sursei în detectoare diferite. Dar nu suntem limitați la căutarea unor evenimente coincidente. Ne-am perfecționat tehnicile de analiză astfel încât doar un singur detector este suficient pentru a afirma cu încredere prezența unei detecții și noroc că am ajuns în acest punct, pentru că a permis detectarea evenimentului excepțional GW230529, când singurele date utilizabile erau de la [LIGO-Livingston](#). Trei **pipeline-uri de căutare** independente (sau algoritmi de căutare) au raportat detecția lui GW230529. Toate folosesc tehnica de matched-filtering, dar o implementează diferit și au dezvoltat modalități robuste pentru a discrimina evenimentele astrofizice de zgomot. Maturitatea acestor algoritmi de căutare ne permite să le verificăm cu încredere rezultatele între ele.

Prin urmare, este extrem de puțin probabil ca zgomotul detectorului să fi produs un semnal precum GW230529. Evenimentul a fost detectat în timpul unei analize în timp real a datelor detectorului și detecția a fost verificată la sfârșitul perioadei de observare. Evenimentul a fost raportat cu o **rată de alarmă falsă** mai mică de unu la o mie de ani. Aceasta înseamnă că în absența oricărui semnal de coalescență a unui sistem binar compact în datele detectorului, ne așteptăm ca un astfel de semnal să apară în zgomot pur întâmplător mai rar de o dată la o mie de ani. Prezentăm în [Figura 2](#) cum se evidențiază acest eveniment față de restul candidaților.

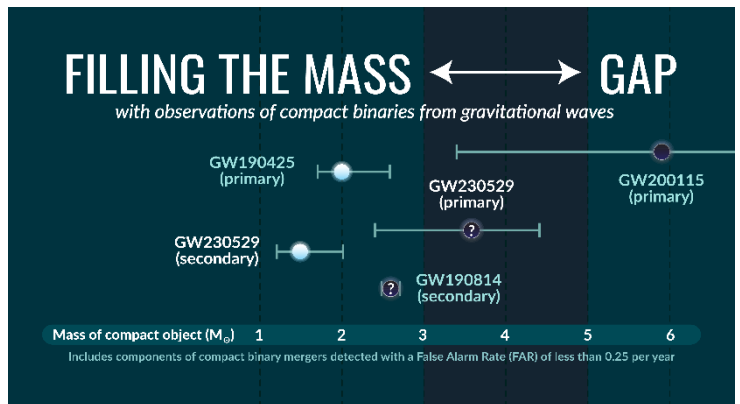


Figura 1: O ilustrație care arată unele dintre masele componente ale evenimentelor detectate în unde gravitaționale, care se află în interiorul sau în jurul regiunii de 3-5 mase solare, denumită și „lower mass gap – gol la mase mici”. Cercurile albastru deschis reprezintă surse care sunt stele neutronice, cercurile negre reprezintă surse care sunt găuri negre, iar cercurile negre cu semne de întrebare indică faptul că sursa este probabil o gaură neagră, dar există de asemenea posibilitatea să fie o stea neutronică. Masa componentei primare a lui GW230529 este situată în acest gol de masă. (Credit: S. Galaudage, Observatoire de la Côte d’Azur.)

Vizitați paginile noastre:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



DE CE ESTE ACEST EVENIMENT INTERESANT?

Oamenii de știință au propus de câțiva ani existența unui **gol la mase mici** în distribuția de masă a obiectelor compacte, între $3M_{\odot}$ și $5M_{\odot}$ (aici M_{\odot} reprezintă **masa solară**), unde ne așteptăm la puține obiecte compacte. Cu toate acestea, observațiile recente ale sistemelor binare prin [unde electromagnetice](#) sau UG au propus candidați pentru binare cu o componentă în golul de masă. De exemplu, masa obiectului secundar din [GW190814](#) a fost estimată a se situa, cu o probabilitate foarte mare, între $2,50 M_{\odot}$ și $2,67 M_{\odot}$ – mai mare decât cea mai grea SN cunoscută la momentul detectării, dar mai mică decât masele de GN prezise.

Cu o masă primară estimată de aproximativ $3,6 M_{\odot}$, GW230529 este primul candidat de sistem binar cu componenta *primară* în golul de masă, așa cum se arată în **Figura 3**. Având în vedere înțelegerea noastră actuală a populațiilor de SN și GN, masa primară este consistentă (cu o probabilitate de 99%) cu o GN de masă mai mică de $5 M_{\odot}$. Cu toate acestea, a fost estimată și probabilitatea ca componenta primară să fie o SN, luând în considerare cunoștințele noastre actuale teoretice și experimentale de fizică nucleară, precum și de populațiile surselor astrofizice. Această probabilitate de a fi o SN este mică, dar diferită de zero și, în anumite ipoteze, poate ajunge chiar la câteva procente; astfel, nu putem exclude acest scenariu cu certitudine. Pe de altă parte, componenta secundară a lui GW230529, a cărei masă are o șansă de 90% de a se afla între $1,2 M_{\odot}$ și $2,0 M_{\odot}$, este aproape sigur o SN.

Figura 3: Distribuția de probabilitate pentru masele componente ale mai multor sisteme binare. Cele mai probabile valori pentru masă sunt indicate de vârfulurile în funcțiile de distribuție a probabilității. Graficul de sus este distribuția proiectată pentru masa componentei primare, iar graficul din dreapta este distribuția proiectată pentru masa componentei secundare. Linii întrerupte reprezentând un raport de masă egal $q = m_2 / m_1$ sunt de asemenea desenate. GW170817 (roz) și GW190425 (verde) sunt consistente cu sisteme de SNB. GW200105_162426 și GW200115_042309 (portocaliu și respectiv albastru) sunt consistente cu sisteme SNGN. Masa secundară a GW190814 (roșu) poate fi o GN sau o SN. Golul în mase între 3 și $5M_{\odot}$ este prezentat ca o zonă gri umbră. Observăm că GW230529 (turcoaz) se află chiar între cele două sisteme SNB și cele două sisteme SNGN, cu masa sa primară în regiunea golului de masă.

FIGURI DIN PUBLICAȚIE

Pentru mai multe informații despre aceste imagini și despre modul în care au fost produse, citiți articolul disponibil [gratuit](#).

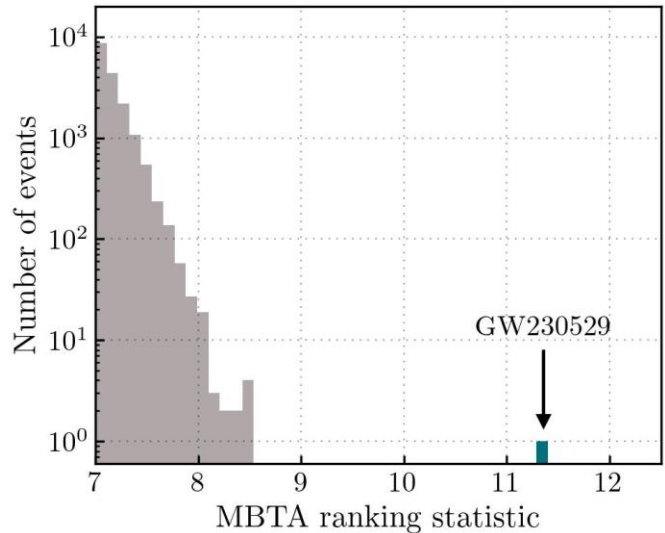
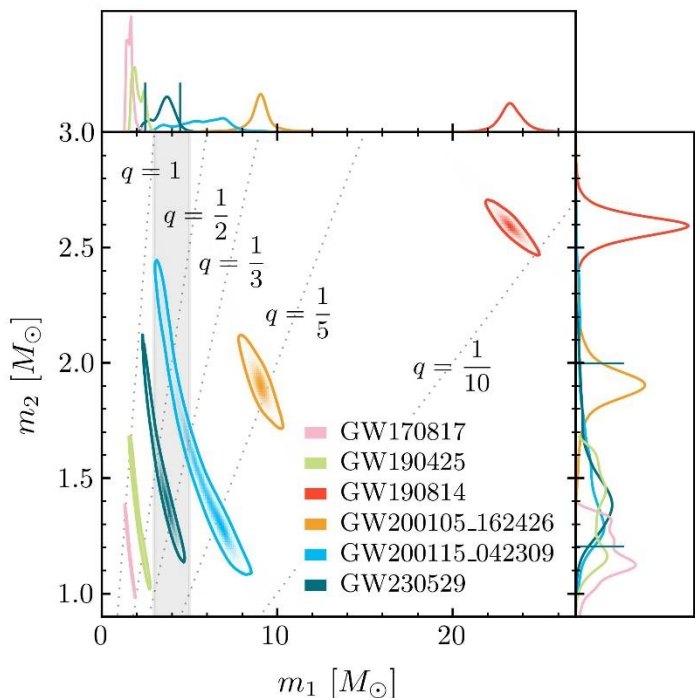


Figura 2: Clasificarea distribuției statistice a unuia dintre algoritmi de căutare (numit MBTA) pentru toate evenimentele candidate din LIGO Livingston în primele două săptămâni ale celei de-a patra perioade de observare (O4a). Axa orizontală oferă valoarea statisticii de clasare, care este folosită pentru a clasifica declanșatorii algoritmului de căutare și care, de asemenea, încorporează diverse teste pentru a discrimina zgomotul. Statistica de clasare este derivată din raportul semnal-zgomot. Cu cât este mai mare valoarea statisticii de clasare, cu atât evenimentul este mai puternic și cu atât este mai consistent cu un semnal astrofizic. Distribuția gri reprezintă evenimentele care nu au fost suficient de semnificative pentru a fi clasificate ca fiind de origine astrofizică. Segmentul albastru este pentru GW230529. Vedem că statistica de clasare pentru GW230529 este mult mai mare decât cea a celorlalte evenimente, fără a avea un alt eveniment detectat la o statistică de clasare mai mare de aproximativ 8,5, în afară de GW230529 cu o statistică de clasare de 11,4.



CE ÎNVĂȚĂM DE AICI?

Coliziunile SN-GN sunt evenimente rare. Prin urmare, fiecare detecție suplimentară este extrem de valoroasă pentru studiul ratelor de ciocnire - precum și pentru a caracteriza populațiile de GN și SN, care este unul dintre obiectivele astronomiei în UG. Aceasta înseamnă deducerea formei distribuțiilor lor de masă, derivarea masei minime și maxime pentru GN și SN și studierea abundenței obiectelor compacte rotative de diferite mase. Folosind doar GW230529, rata de ciocnire dedusă pentru evenimente similare este de aproximativ 39 de evenimente pe an într-un volum de aproximativ $3,5 \times 10^{28}$ ani lumină cubi. O analiză care include alte [evenimente candidate SNGN](#) detectate în timpul celei de-a treia campanii de observare (O3) produce aproximativ 61 de evenimente pe an într-un volum de aproximativ $3,5 \times 10^{28}$ ani lumină cubi. O altă analiză care include candidați suplimentari, mai puțin semnificativi, oferă o rată de coliziune de aproximativ 95 de evenimente pe an într-un volum de aproximativ $3,5 \times 10^{28}$ ani lumina cubi. Din aceste analize constatăm că rata de coliziune dedusă pentru binare similare cu GW230529 este comparabilă cu rata de ciocnire care a fost dedusă în timpul O3 pentru alte evenimente a căror componentă principală a fost fără îndoială o GN.

Acest lucru întărește ipoteza că componenta principală a sistemului binar GW230529 a fost o GN. Distribuția probabilității pentru ratele de coliziune a sistemelor SNGN este prezentată în **Figura 4**.

Datorită faptului că masa sa primară se află cel mai probabil în golul de mase, GW230529 este un candidat principal pentru a rafina **modelele de populații**. Sunt luate în considerare trei modele de populații pentru a studia modul în care acestea sunt afectate de observarea lui GW230529. Primele două modele cuprind toate tipurile de binare de obiecte compacte (SNB+GNB+SNGN), în timp ce al treilea ia în considerare numai populația SNGN. Includerea lui GW230529 în primele două modele nu schimbă în mod semnificativ rezultatul, ceea ce înseamnă că GW230529 nu este o valoare anormală pentru aceste modele. Cel de-al treilea model, totuși, este modificat semnificativ, așa cum se arată în **Figura 5**. Vedem că în acest caz abundența de GN de masă mică este crescută și masa minimă a unei GN este împinsă către valori mai mici. Când includem GW230529, găsim o masă minimă de aproximativ $3,36 M_{\odot}$ față de valoarea anterioară de aproximativ $6,04 M_{\odot}$ pentru acest model.

Procesul de formare care a dus la GW230529 este incert. Cunoștințele actuale despre **supernovele produse de colapsul nucleului** din stele masive defavorizează un astfel de scenariu pentru formarea componentei primare în binară datorită masei sale scăzute. Un scenariu mai plauzibil este formarea prin **fallback** (cădere înapoi), în care o GN se formează după supernovă din cauza acumulării de materie reziduală pe nucleu. Rezultate recente din modelări numerice au dovedit că formarea unei GN de $3 - 6 M_{\odot}$ a fost posibilă prin acest mecanism. Simulările colapsului nucleului pentru stelele de heliu au prezis mase ale GN cât cele mai mari mase ale SN, deși intervalul de masă sub $5 M_{\odot}$ este mai puțin populat. Până în prezent, modelele de colaps al nucleului încă prezintă incertitudini mari cu privire la rezultatul procesului, ceea ce face dificilă determinarea cu precizie a limitelor pentru masele obiectelor compacte. GW230529 este, prin urmare, un atu valoros pentru limitarea acestor modele.

Un alt scenariu posibil pentru formarea componentei primare este printr-o coliziune a unei binare de SN. În acest caz ne putem imagina că componenta secundară este un membru al unui fost sistem triplu sau cvadruplu, sau că a fost capturată de componenta primară în timp ce evolua într-un grup de stele tânăr sau într-un nucleu galactic activ. De asemenea, nu putem exclude o origine non-stelară, cum ar fi o **GN primordială**.

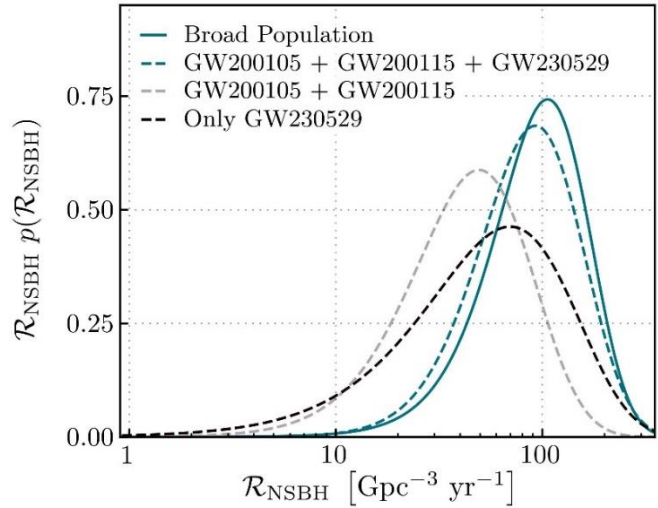


Figura 4: Distribuții de probabilitate pentru rata de coliziune a sistemelor SNGN. Funcțiile de distribuție a probabilității au vârful corespunzător valorii cele mai probabile a ratei de ciocnire, afișată pe axa orizontală. Linile întrerupte sunt derivate folosind doar modele de populații pentru SNGN indicate în legendă. Linia continuă, notată cu „broad population (populația extinsă)” este derivată folosind un model de populație care include evenimente suplimentare mai puțin semnificative, așa cum este explicat în text. Vedem că valorile vârfurilor pentru diferitele distribuții sunt relativ apropiate unele de altele și că toate populațiile se suprapun într-o oarecare măsură. În special, valoarea vârfului găsită folosind doar GW230529 este comparabilă cu valoarea vârfului găsită atunci când sunt incluse alte evenimente SNGN.

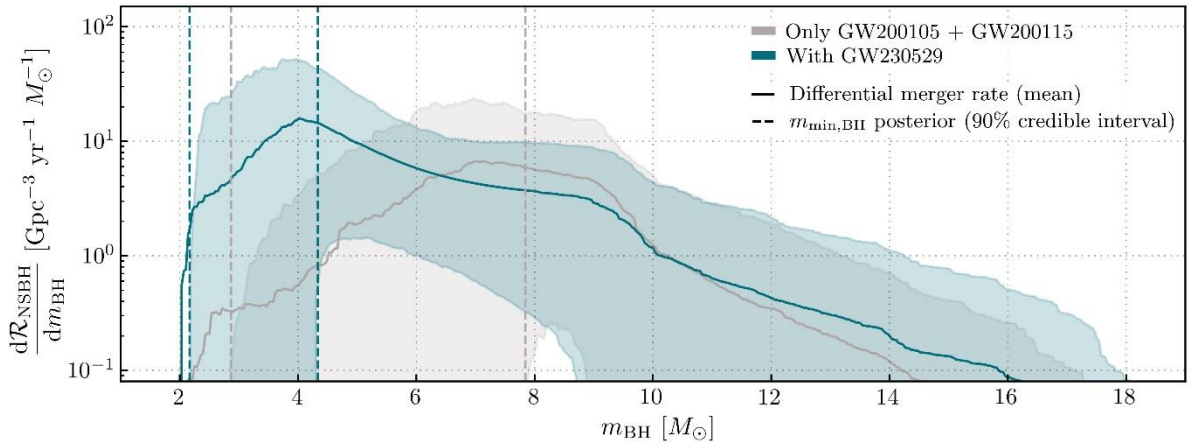


Figura 5: Rata de coliziune a binarelor SNGN (axa verticală) în funcție de masa GN (axa orizontală) din sistem. Curbele solide arată ratele de fuziune pentru două modele diferite, iar zonele umbrite arată incertitudinile corespunzătoare acestor modele. Linile verticale întrerupte arată intervalul așteptat pentru masa minimă a unei GN, cu o probabilitate de 90%. Culoarea gri ia în considerare un model de populație pentru SNGN, excluzând GW230529. Culoarea albastră include și GW230529 în modelul pentru populații SNGN. Vedem că includerea lui GW230529 crește abundența binarelor cu GN de masă scăzută, în același timp reducând valoarea masei minime a unei GN.

Investigarea ulterioară a sistemelor cu componente în golul de masă precum GW230529 ne va permite să ne îmbunătățim înțelegerea populațiilor de GN și SN. Acest lucru ne va permite, la rândul său, să înțelegem mai bine mecanismele lor de formare și, pentru SN, structura lor internă.

Aflați mai multe:

Vizitați paginile: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu,
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Citiți o versiune gratuită a articolului științific complet [aici](https://arxiv.org/abs/2305.12345).

Traducere din limba engleză realizată de Cătălina Mirițescu și Ruxandra Bondarescu.

GLOSAR

Coalescența unui sistem binar compact (CBC): prescurtat în mod obișnuit ca CBC, este un sistem format din două GN, două SN sau o GN și o SN care se apropie pe o traiectorie spirală una de alta și eventual se ciocnesc, unindu-se. Întregul proces produce UG care cresc în frecvență și amplitudine pe măsură ce cele două obiecte se apropie unul de celălalt și accelerează. Obiectul rezultat din ciocnire poate fi fie o SN, fie o GN, în funcție de sistemul inițial. Obiectele care formează sistemul binar se numesc componente ale acestuia, componenta primară fiind definită ca cea cu masa mai mare.

Gaură neagră (GN): obiect compact care este atât de dens încât viteza necesară pentru a scăpa din influența lui gravitațională este mai mare decât viteza luminii. Acest lucru îl face să apară ca o regiune neagră a spațiului, deoarece lumina din această regiune nu poate ajunge la noi.

Stea neutronică (SN): obiect compact extrem de dens constituit aproape în întregime din neutroni cu un mic amestec de protoni și electroni, deoarece atomii nu pot face față presiunii. Ele rezultă din colapsul stelelor masive în urma unui proces numit supernovă produsă de colapsul nucleului. Masa maximă teoretizată pentru SN este de aproximativ 3 M_{\odot} .

Gaură neagră primordială: o GN ipotetică care s-ar fi format în universul timpuriu, la scurt timp după Big Bang. Masele prezise variază de la aproximativ $10^{-18} M_{\odot}$ la $10^{36} M_{\odot}$.

LIGO, Virgo și KAGRA: situate respectiv în SUA, Italia și Japonia, acestea sunt instrumentele care ne permit detectarea UG. Conceptul de bază al detectoarelor LIGO, Virgo și KAGRA constă din două brațe, de câțiva kilometri lungime, formând o formă de „L”, cu oglinzi la capete și în care circulă un fascicul laser. Folosim laserul pentru a măsura variațiile relative ale lungimii brațelor cauzate când UG traversează Pământul. Distanța din brațele fiecărui detector este monitorizată constant și constituie datele în care căutăm semnalele UG.

Matched-filtering - filtrare prin potrivire: o metodă pe care o folosim pentru a analiza datele detectoarelor și a detecta evenimente de coalescență a sistemelor binare compacte. Aceasta implică compararea în fiecare moment a datelor de la detectoarele noastre cu semnalele de UG prezise teoretic care depind de proprietățile sistemului binar, căutând corelații. Când o undă gravitațională reală traversează Pământul, ar trebui să găsim o potrivire bună între datele detectorului și semnalul prezis.

Lower mass gap - gol la mase mici: un interval de mase în care ne așteptăm să nu existe sau să existe puține obiecte compacte. Acest interval se extinde de la aproximativ 3 M_{\odot} pentru masa maximă a unei SN, la 5 M_{\odot} pentru masa minimă a unei GN.

Masa solară sau M_{\odot} : masa Soarelui, folosită ca unitate de masă standard în astronomie. Este egală cu aproximativ 2×10^{30} kg.

An-lumină: unitate de distanță. 1 an-lumină este distanța parcursă de lumină într-un an, calculată pe baza vitezei luminii în vid, și este egal cu aproximativ $9,5 \times 10^{12}$ km.

Modelul populației: un model teoretic care oferă abundența obiectelor compacte de un anumit tip în funcție de orice combinație de parametri binari.

Core-collapse supernova - supernovă produsă de colapsul nucleului: Într-o stea, presiunea gazului său compensează în mod constant atracția gravitațională a nucleului său. Când se apropie de sfârșitul vieții sale, presiunea scade și steaua nu mai poate rezista atracției gravitaționale. Suferă un colaps gravitațional extrem de rapid către nucleu, care are mai multe rezultate posibile. Colapsul brusc poate crea o presiune extrem de mare în stea, determinând-o să explodeze într-o supernovă - de unde și numele de „core-collapse supernova”. Supernova poate lăsa apoi în urmă o SN sau o GN în caz de fallback (prăbușire). Dacă steaua a fost foarte masivă de la început, ea se va prăbuși direct într-o GN, sărind peste etapa de supernovă.

Fallback - cădere înapoi: în scenariul unei supernove produse de colapsul nucleului care formează o SN, materia reziduală poate „cădea înapoi” către SN. Această acumulare de materie poate crește masa SN peste masa sa maximă și poate duce la formarea unei GN.

Search pipeline – algoritmi de căutare: programe formate dintr-un lanț de mai multe procese. Ele pregătesc datele pentru analiză, le filtrează și apoi calculează diferite cantități pentru a respinge cât mai multe evenimente produse de zgomot și pentru a estima semnificația evenimentelor astrofizice. Unii algoritmi rulează în timp real, alții funcționează offline, iar alții le pot realiza pe ambele. Mai multe informații pot fi găsite în ghidul utilizatorului de alerte publice IGWN.

Căutare offline: analize care sunt efectuate pe date dintr-o perioadă anterioară de observație, de obicei în pauzele de întreținere și upgrade când detectoarele nu funcționează. Acestea completează analizele în timp real (numite și analize online) care sunt efectuate în perioadele de observație.

Rata alarmelor false: aceasta este folosită pentru a cuantifica cât de probabil este ca un eveniment să fi fost cauzat de zgomot. Este calculată prin simularea evenimentelor care provin din surse de zgomot și analizând puterea semnalului lor, pentru a obține o distribuție a ratei așteptate a unor astfel de evenimente în funcție de puterea semnalului. În termeni mai concreți, dacă un eveniment are o rată de alarmă falsă de 1 pe zi, aceasta înseamnă că ne așteptăm ca zgomotul detectorului nostru să producă un astfel de eveniment aproximativ o dată pe zi. Prin urmare, am avea puțină încredere că acest eveniment este de origine astrofizică.