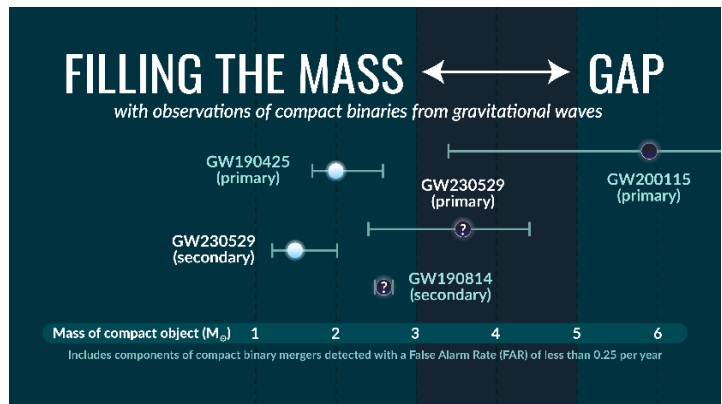


# GW230529: EGY NEUTRONCSILLAG ÉS EGY ISMERETLEN KOMPAKT OBJEKTUM ÖSSZEOLVADÁSÁNAK MEGFIGYELÉSE

A [gravitációs hullámok](#) (GW) első közvetlen észlelése 2015-ben, a [GW150914](#) jelzésű jellel új korszak kezdetét hozta el a csillagászatban. Azóta számos további, különböző típusú forrásból származó GW-észlelésre került sor. Mindegyikük **kompakt kettősök összeolvadásából** származott, amelyeket neutroncsillagok (NS) és/vagy fekete lyukak (BH) alkottak. Itt a [GW230529](#) jelű, 2023. május 29-én, a **LIGO–Virgo–KAGRA detektorok** negyedik megfigyelési időszakának (O4a) első felében észlelt kompakt kettős rendszer összeolvadásáról tudósítunk, amelyben az egyik komponens bizonytalan eredetű, tömege a neutroncsillagok tömegénél nagyobb, a feketelyukakénál kisebb tartományba esik.

## HOGYAN ÉSZLELTÜK EZT AZ ESEMÉNYT?

Minden egyes üzemben lévő detektor adatait az **illesztett szűrésen alapuló célzott kereséstechnikával** elemezzük. Ennek során a detektor adatait összehasonlítjuk az elmélet által jóslott hullámforma-mintákkal, hogy megtaláljuk a legjobban illeszkedő előrejelzést, arra az esetre, ha az adatokban egy valós jel lenne elrejtve. Ez a jelerősségnek az idő függvényében történő becslését, vagy a jel-zaj arány idősorát szolgálja. Ha valóban található asztrofizikai jel a detektor adataiban, akkor a jel-zaj arány magas, ellenkező esetben alacsony lesz. Ez a technika hatékonynak bizonyult a gyenge GW-jelek azonosítására a detektoradatakban, de nem teljesen megbízható. Különböző zajforrások zavarhatják a méréseinket, de akár GW-jeleket is képesek utánozni.



**1. ábra:** Néhány olyan gravitációshullám-esemény komponenseihez rendelt tömegek illusztrációja, amelyek a 3–5 naptömegű, „alsó tömegrésnek” is nevezett tartományban vagy annak környékén találhatóak. A világoskék körök olyan forrásokat jelölnek, amelyek neutroncsillagok, a fekete körök olyan forrásokat, amelyek fekete lyukak, a kérdőjelekkel ellátott fekete körök pedig azt jelzik, hogy a forrás valószínűleg fekete lyuk, de fennáll a lehetősége annak is, hogy neutroncsillag. A GW230529 elsődleges komponensének tömege ebben a résben található. (Készítette: S. Galaudage, Côte d’Azur-i Observatórium).

## HONNAN TUDJUK, HOGY A GW230529 EGY VALÓDI ESEMÉNY?

Legtöbbször olyan jeleket keresünk, amelyek mind időben, mind a forrás paramétereiben egybeesnek a különböző detektorainkban. Ugyanakkor nem korlátozódunk az egyidejű események keresésére. Az adatelemzési technikáinkat úgy finomítottuk, hogy már egyetlen detektor is elegendő ahhoz, hogy megbízhatóan megállapítsuk az észlelést, és ez szerencsére elég is, ugyanis ez tette lehetővé a különleges GW230529 jelű esemény észlelését, ahol az egyetlen felhasználható adatsor a [LIGO-Livingston detektorból](#) származott. Három egymástól független **keresőcsatorna** (vagy keresőalgorithmus) jelezte a GW230529 észlelését. Mindegyik az illesztett szűrés technikát alkalmazza, de ezt eltérő módon hajtják végre, a mellett hogy hatékony eszközöket fejlesztettek ki az asztrofizikai eseményeknek a zajtól való megkülönböztetésére. Ezeknek a keresőcsatornáknak az a fejlettsége lehetővé teszi, hogy megbízhatóan ellenőrizzük az eredményeiket.

Ebből következően igen valószínűtlen, hogy a detektor zaja olyan jelet eredményezett volna, mint a GW230529. Az eseményt a detektoradatok valós idejű elemzése során észlelték, és az észlelést a megfigyelési időszak végén megerősítették. Az eseményt ezer évenként kevesebb mint egy **hamis riasztási rátával** sikerült kimutatni. Ez azt jelenti, hogy ha a detektoradatokban nincs egyetlen kompakt kettős csillag-összeolvadás jele sem, akkor arra számíthatunk, hogy véletlenül kevesebb mint ezerévente egyszer fordul elő ilyen jel a zajban. A **2. ábrán** szemléltetjük, hogy ez az esemény hogyan emelkedik ki a többi jelölthöz képest.

## Látogasson el honlapjainkra:

[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/)



## MIÉRT ÉRDEKES EZ AZ ESEMÉNY?

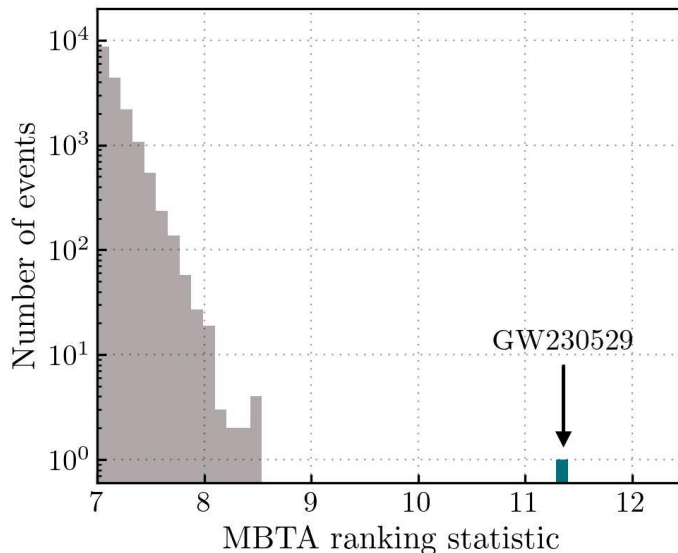
A tudósok már több éve felvetették, hogy a kompakt objektumok tömegeloszlásában létezik egy **alsó tömegrész**,  $3M_{\odot}$  és  $5M_{\odot}$  között (itt az  $M_{\odot}$  a **naptömeget** jelenti), ahol kevés kompakt objektumra számíthatunk. Az **elektromágneses-** vagy gravitációs hullámok által felfedezett kettőscillagok legújabb megfigyelései azonban olyan kettőscillagjelölteket is felvetettek, amelyeknek egy komponense a tömeghézagba esik. Például a [GW190814](#)-ben a másodlagos objektum tömegét nagyon nagy valószínűséggel  $2,50M_{\odot}$  és  $2,67M_{\odot}$  közé helyezték - ez nagyobb, mint az észlelés idején ismert legnehezebb neutroncsillag tömege, de kisebb, mint a feltehetően legkisebb feketelyukak tömege.

A mintegy  $3,6M_{\odot}$  becsült elsődleges tömegével a GW230529 jel forrása az első olyan kettőscillagjelölt, amelynek **elsődleges** komponense a tömeghézagban van, ahogy azt a **3. ábra** mutatja. Az neutroncsillag és feketelyuk-populációkról alkotott jelenlegi ismereteink alapján a elsődleges tömeg konstans (99%-os valószínűséggel) egy  $5M_{\odot}$ -nél kisebb tömegű feketelyukkal. Ugyanakkor annak valószínűségét is megbecsültük, hogy az elsődleges komponens egy NS, figyelembe véve a jelenlegi ismereteinket a nukleáris fizikából származó elméletből és kísérletekből, valamint az asztrofizikai források populációjából. Annak valószínűsége, hogy ez egy neutroncsillag, kicsi, de nem nulla, és bizonyos feltételezések mellett akár néhány százalékot is elérhet, így ezt a forgatókönyvet sem zárhatjuk ki teljes bizonyossággal. Ezzel szemben a GW230529 másodlagos komponense, amelynek tömege 90%-os eséllyel  $1,2M_{\odot}$  és  $2,0M_{\odot}$  között van, szinte biztosan neutroncsillag.

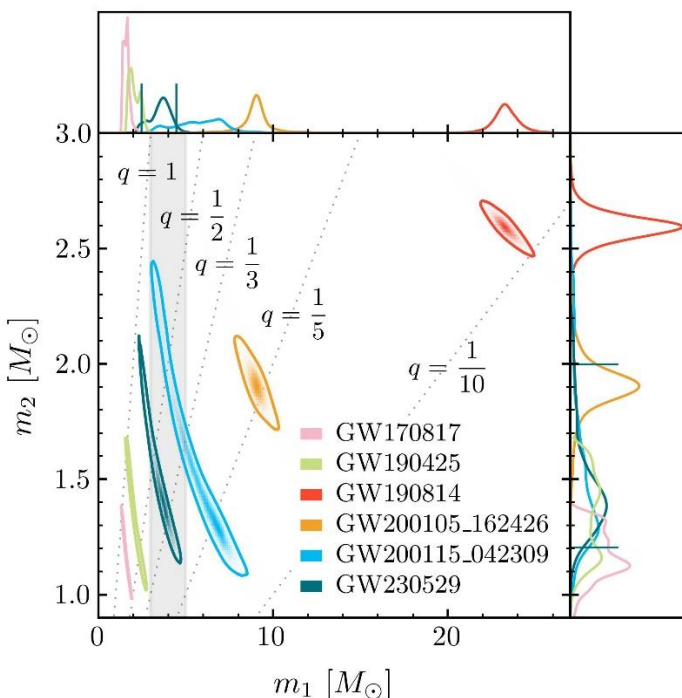
**3. ábra:** Számos kettős rendszer komponensének tömegét jellemző valószínűség-eloszlás. A legvalószínűbb tömegértékeket a Valószínűségi eloszlásfüggvények csúcsai mutatják. A felső ábra az elsődleges komponens tömegére, a jobb oldali ábra pedig a másodlagos komponens tömegére vetített eloszlás. A  $q = m_2/m_1$  egyenlő tömegarányú szaggatott vonalakat is rajzoltuk. A GW170817 (rózsaszín) és a GW190425 (zöld) a BNS-rendszereknek felelt meg. A GW200105\_162426 és GW200115\_042309 (narancssárga, illetve kék) NSBH rendszereknek feleltek meg. A GW190814 (piros) másodlagos komponensének tömege alapján akár egy BH, vagy egy NS is lehet. A 3 és  $5M_{\odot}$  közötti tömegrész szürke színnel jelzett területként van feltüntetve. Látható, hogy a GW230529 (kékesszöld) pontosan a két BNS és a két NSBH rendszer között helyezkedik el, elsődleges tömege a tömegrész tartományába esik.

## A PUBLIKÁCIÓBÓL SZÁRMAZÓ ÁBRÁK

További információkat talál az ábrákról és előállításuk módjáról a szabadon hozzáférhető [preprintben](#).

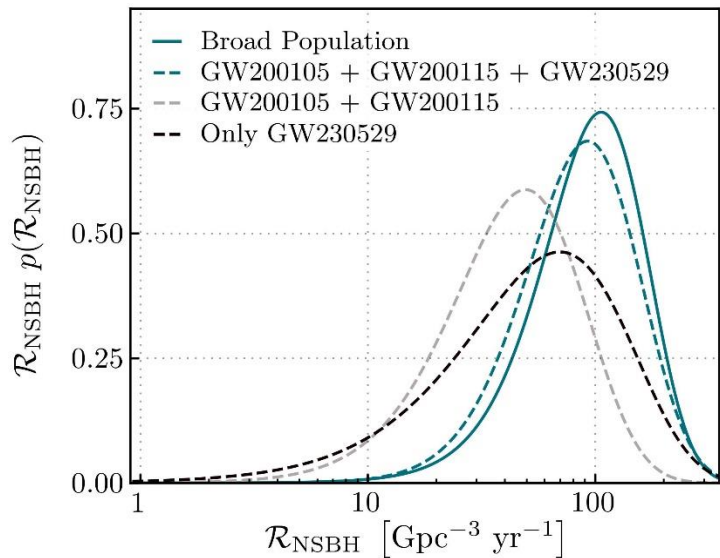


**2. ábra:** Az egyik, MBTA elnevezésű, keresőcsatorna (pipeline) rangsorlási statisztikájának eloszlása a LIGO Livingstonban a negyedik megfigyelési időszak (O4a) első két hete során az összes jelölt eseményre vonatkozóan. A vízszintes tengely a rangsorlási statisztika értékét adja meg, amelyet a keresőcsatorna elindításának rangsorolására használnak, és ami a zaj kiszűrésére érdekében magában foglal különböző tesztek is. A rangsorlási statisztika a jel-zaj arányból adódik; minél nagyobb a rangsorlási statisztika, annál „hangosabb” az esemény, és annál inkább illeszkedik egy asztrofizikai jelhez. A szürkével jelölt eloszlás azokat az eseményeket jelöli, amelyek nem voltak elég szignifikánsak ahhoz, hogy asztrofizikai eredetűnek lehessen őket minősíteni. A kék színnel jelölt tartomány a GW230529-re vonatkozik. Látható, hogy a GW230529-jel rangsorlási statisztikája sokkal nagyobb, mint a többi eseményé, és nincs olyan esemény, amelynek rangsorlási statisztikája  $8,5$ -nél nagyobb lenne, kivéve a GW230529-et, amelynek rangsorlási statisztikája  $11,4$ .



## MIT TANULHATUNK BELŐLE?

Az NS-BH összeolvadások ritka események. Ezért minden további észlelés rendkívül értékes az összeolvadási arányok alaposabb tanulmányozásához, valamint a BH-k és NS-ek populációk jellemzéséhez, ami a GW-csillagászat egyik fő célja. Ez alatt az értendő, hogy következtetni kell a tömegeloszlásuk alakjára, meg kell ismerni a BH-k és NS-ek minimális és maximális tömegét, és tanulmányozni kell a különböző tömegű, forgó kompakt objektumok gyakoriságát. Ha csak a GW230529-et használjuk, akkor a hasonló események esetében arra következtethetünk, hogy a vonatkozó összeolvadások rátája körülbelül 39 esemény/év egy körülbelül  $3,5 \times 10^{28}$  köbös fényévnnyi térfogatban. A harmadik megfigyelési sorozat (O3) során észlelt egyéb [NSBH-jelölt eseményeket](#) is tartalmazó elemzés megközelítőleg évi 61 eseményt eredményez  $3,5 \times 10^{28}$  köbös fényévnnyi térfogatban. Egy másik elemzés, amely további, kevésbé jelentős jelölteket is tartalmaz, körülbelül 95 eseményt ad évente, ugyan ekkora térfogatban. Ezekből az elemzésekből azt



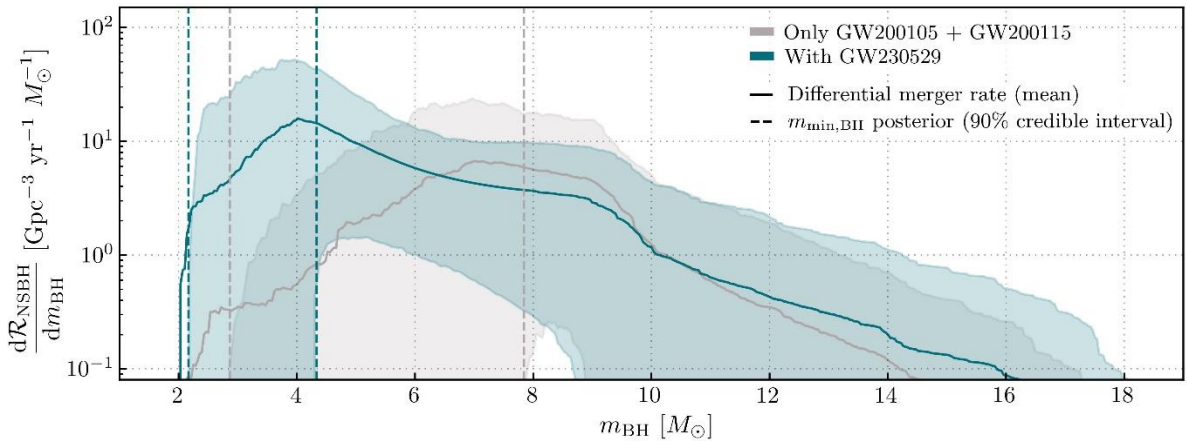
**Ábra 4:** Az NS-BH-rendszerek összeolvadások arányának valószínűségi eloszlása. A valószínűségi eloszlásfüggvények a vízszintes tengelyen látható összeolvadási arány legvalószínűbb értékénél érik el a csúcspontjukat. A szaggatott vonalakat a feliratban feltüntetett, csak NS-BH-kat tartalmazó populációs modellek felhasználásával származtattuk. A "széles (broad) populációval" jelzett folytonos vonal olyan populációs modellel készült, amely további, kevésbé jelentős eseményeket is tartalmaz, amint azt a szövegben kifejtjük. Láthatjuk, hogy a különböző eloszlások csúcserkéi viszonylag közel vannak egymáshoz abban az értelemben, hogy valamennyi populáció bizonyos mértékig átfedésben van. Különösen a csak GW230529 felhasználásával talált csúcserkéhez hasonló a többi NS-BH eseményt is tartalmazó csúcserkéhez.

találjuk, hogy a GW230529-hez hasonló kettősrendszerekre vonatkoztatott becsült összeolvadási ráta hasonló ahhoz, amelyet az O3 során más olyan eseményekre becsültek, amelyeknek elsődleges komponense kétségtelenül egy BH volt. Ez megerősítést ad arra a hipotézisre, hogy a GW230529 kettős rendszer fő komponense egy BH volt. Az NS-BH összeolvadások arányának valószínűségi eloszlása a **4. ábrán** látható.

Mivel a GW230529 főkomponense nagy valószínűséggel az úgynevezett tömeghézagban van, kiválóan alkalmas a **populációs modellek** finomítására. Három populációs modell esetén vizsgáljuk meg, hogy hogyan befolyásolja őket a GW230529 megfigyelése. Az első két modell a kompakt objektumos kettősrendszerek minden típusát (BNS+BBH+NSBH), míg a harmadik csak az NS-BH populációt veszi figyelembe. A GW230529 bevonása az első két modellbe nem változtatja meg jelentősen az eredményt, ami azt jelenti, hogy a GW230529 nem számít kiugrónak ezekben a modellekben. A harmadik modell azonban jelentősen megváltozik, amint azt az **5. ábra** is mutatja. Azt látjuk, hogy ebben az esetben az alacsony tömegű BH-k gyakorisága megnő, és a BH minimális tömege alacsonyabb értékek felé tolódik. Ha a GW230529-et is bele vesszük, akkor erre a modellre körülbelül  $3.36 M_{\odot}$  minimális tömeget találunk szemben a korábbi, körülbelül  $6.04 M_{\odot}$  értékkel.

A GW230529 kialakulásának folyamata ismeretlen. A masszív csillagok **mag-összeomlásos szupernóváira** vonatkozó jelenlegi ismeretek a rendszer elsődleges komponensének alacsony tömege miatt nem valószínűsítik, hogy az így keletkezhetett volna. Valószínűbb forgatókönyv a **visszahullással** történő keletkezés, ahol a szupernóva után a magból visszamaradt anyag akkréciója miatt alakul ki egy BH. A numerikus modellerekből származó legújabb eredmények bizonyítékot mutattak arra, hogy a  $3 - 6 M_{\odot}$  BH-k kialakulása lehetséges ezen mechanizmuson keresztül. A héliumcsillagok magösszeomlásának szimulációi olyan alacsony BH tömegeket jósoltak, mint a maximális NS tömeg, bár az  $5 M_{\odot}$  alatti tömegtartomány kevésbé népes. A mag-összeomlás modellek a mai napig nagy bizonytalanságokat hordoznak a folyamat kimenetelét illetően, így nehéz a kompakt objektumok tömegének pontos határértékeit meghatározni. A GW230529 ezért nyújt értékes eszközt ezen modellek korlátozására.

Az főkomponens kialakulásának másik lehetséges forgatókönyve egy kettős NS rendszer összeolvadása. Ebben az esetben elképzelhető, hogy a másodlagos komponens része volt egy korábbi hármas vagy négyes rendszernek. Illetve még az is előfordulhatott, hogy a BH befogta miközben az egy fiatal csillaghalmozban vagy aktív galaktikus magban fejlődött. Nem zárhatjuk ki azonban a nem-csillag eredetet sem, például lehetett egy **primordiális BH** is.



**Ábra 5:** NS-BH kettősrendszerek összeolvadási aránya (függőleges tengely) a rendszerben lévő BH tömegének (vízszintes tengely) függvényében. A folytonos görbék két különböző modellre vonatkozó összeolvadási rátákat mutatják, az kiszínezett területek pedig az ezeknek a modelleknek megfelelő bizonytalanságokat. A szaggatott függőleges vonalak a BH minimális tömegének 90%-os valószínűséggel várható tartományát mutatják. A sötét szaggatott vonal a GW230529-et kizáró, csak NS-BH-t tartalmazó populációs modellt veszi figyelembe. A világos szaggatott vonal a GW230529-et tartalmazza az NS-BH populációs modellben. Láthatjuk, hogy a GW230529 bevonása növeli az alacsony tömegű BH-kat tartalmazó kettőscillagok gyakoriságát, valamint a BH-k minimális tömegét alacsonyabb értékek felé tolja.

A GW230529-hez hasonló tömeg-hiányos rendszerek további vizsgálata lehetővé teszi számunkra, hogy pontosabb képet kapjunk a BH és NS populációkról. Ez pedig lehetővé teszi, hogy jobban megértsük a keletkezési mechanizmusait, és az NS-ek esetében a belső szerkezetüket.

## TOVÁBBI INFORMÁCIÓKÉRT:

Látogasd meg honlapunk: [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/)

Cikk ingyenes preprintjét elolvashatja [itt](#).

## SZÓSZEDET

**Kompakt kettős koaleszcenda:** általában CBC-ként rövidítik, két BH, két NS vagy egy BH és egy NS bespiralizálásának és összeolvadásának együttese. Ezen folyamat során GW-k keletkeznek, amelyek frekvenciája és amplitúdója növekszik, ahogy a két objektum egyre közelebb kerül egymáshoz és felgyorsul. A keletkező objektum a kinudási rendszertől függetlenül lehet NS vagy BH. A kettős rendszert alkotó objektumokat komponenseknek nevezzük, az elsődleges komponens a nagyobb tömegű objektum.

**Fekete lyuk (BH):** olyan tömör objektum, amely olyan sűrű, hogy a gravitációs teréből való kiszabaduláshoz szükséges sebesség nagyobb, mint a fénysebesség. Emiatt a tér fekete régiójának tűnik, mivel ebből a régióból nem juthat el hozzánk fény.

**Neutroncsillag:** rendkívül sűrű, kompakt objektum, amely szinte kizárólag neutronokból áll, kis mennyiségű proton és elektron keverékkel, mivel az atomok nem bírják a nyomást. Tömeges csillagok összeomlásából keletkeznek egy magösszeomlás szupernóvának nevezett folyamatot követően. Az NS-ek várható maximális tömege nagyjából 3  $M_{\odot}$ .

**Prímordiális fekete lyuk:** egy olyan elméleti BH, amely a korai világegyetemben, nem sokkal az ősrobbanás után keletkezhetett. A becsült tömegük nagyjából  $10^{-11} M_{\odot}$  to  $10^{20} M_{\odot}$  között mozoghat.

**LIGO, Virgo és KAGRA:** az USA-ban, Olaszországban és Japánban található olyan műszerek, melyek lehetővé teszik a GW-k észlelését. Az alapkonceptója a LIGO, a Virgo és a KAGRA detektoroknak két "L" alakot bezáró kilométeres hosszúságú kar, amelyekben tükrök között egy lézersugár kering. A keringő lézer segítségével tudjuk megmérni a karok hosszának relatív megváltozásait, amelyeket a Földet keresztező GW-k okoznak. Az egyes detektorok két karjának hossz változását folyamatosan figyeljük, amely képezi azokat az adatokat, melyekben a GW jeleket keressük.

**Matched-filtering:** azon technika, amelyet a detektoradatok elemzésére és a kompakt bináris összeolvadási események észlelésére használunk. Ennek során a detektoraink adatait összehasonlítjuk az elmélet által jósolt GW-vel, melyek függnek a kettős rendszer tulajdonságaitól, és azokra hasonló eseményeket keressünk az adatsorokban. Amikor egy valódi GW keresztezi a Földet, jó egyezést kell találnunk a detektoradatok és az előre jelzett jel között.

**Alsó tömegrész:** az a tömegtartomány, ahol várhatóan nem vagy csak kevés kompakt objektum létezik. Ez a tartomány nagyjából 3  $M_{\odot}$  - egy NS maximális tömegétől 5  $M_{\odot}$  - egy BH minimális tömegéig terjed.

**Naptömeg vagy  $M_{\odot}$ :** a Nap tömege, amelyet a csillagászatban szabványos tömegegységként használnak. Nagyjából  $2 \times 10^{30}$  kg-nak felel meg.

**Fényév:** a távolság mértékegysége. Egy fényév a fény által egy év alatt megtett távolság, a fény vákuumban mért sebessége alapján számítva, nagyjából  $9.5 \times 10^{12}$  km-nek felel meg.

**Populációs modell:** olyan elméleti modell, amely egy adott típusú kompakt kettős rendszer gyakoriságát adja meg az arra jellemző paraméterek tetszőleges kombinációjának függvényében.

**Magösszeomlás szupernóva:** Egy csillagban a gáz nyomása folyamatosan ellensúlyozza a mag gravitációs vonzását. Amikor élete végéhez közeledik, a nyomás csökken, és a csillag már nem tud ellenállni a gravitációs vonzásnak. Ekkor rendkívül gyors gravitációs összeomlás következik be a csillag magja felé, amelynek több lehetséges kimenetele is van. A hirtelen összeomlás rendkívül nagy nyomást hozhat létre a csillagban, ami szupernóva-robbanáshoz vezethet - innen a "magösszeomlás szupernóva" elnevezés. A szupernóva ezután egy NS-t vagy - visszaesés esetén - egy BH-t hagyhat maga után. Ha a csillag túl nagy tömegű volt kezdetben, akkor közvetlenül BH-vá omlik össze, kihagyva a szupernóva állapotot.

**Visszahullás:** egy magösszeomlás szupernóva forgatókönyvében, amely egy NS-t alkot, a maradék anyag "visszahullhat" az NS-re. Ez az által előálló anyagakkreáció az NS tömegét a maximális tömeggel fölé emelheti, és egy BH kialakulásához vezethet.

**Search pipeline:** több folyamatnak a láncból álló számítástechnikai programok. Ezek kondicionálják az adatokat az elemzéshez, szűrik azokat, majd különböző mennyiségeket számolnak ki. Mindent annak érdekében, hogy minél több zajos eseményt szűrjenek ki az adatsorból, és megbeszéljék a jelentőségét a talált asztrofizikai események. Egyes pipeline-ak valós időben futnak, mások offline, és vannak olyanok is, amelyek mindkettőt végzik. További információ az IGWN nyilvános riadatszokról szóló dokumentációjában található.

**Offline keresés:** olyan elemzések, amelyeket egy korábbi megfigyelési időszak adatain végeznek el, jellemzően olyan szünetekben, amikor a detektorok nem működnek, karbantartás és/vagy frissítés céljából. Ezek kiegészítik a valós idejű elemzéseket (más néven online keresések), amelyeket a megfigyelési időszakok alatt végeznek.

**Falsziasztási arány:** ez annak mérésére szolgál, hogy egy eseményt mekkora valószínűséggel okozhatott zaj. Ezt úgy számítják, hogy modellezik a zaj által keltett eseményeket, vizsgálják azok jelerősségét, melynek függvényében következtethetünk a hasonló események előfordulásának várható arányának eloszlására. Konkrétan, ha például egy ilyen esemény falsziasztási aránya 1 naponta, akkor a detektorunk zajja naponta körülbelül egyszer fog ilyen eseményt produkálni. Ezáltal nagybizonyossággal kizárhatjuk az ilyen eseményeket a detektor jeléből.