

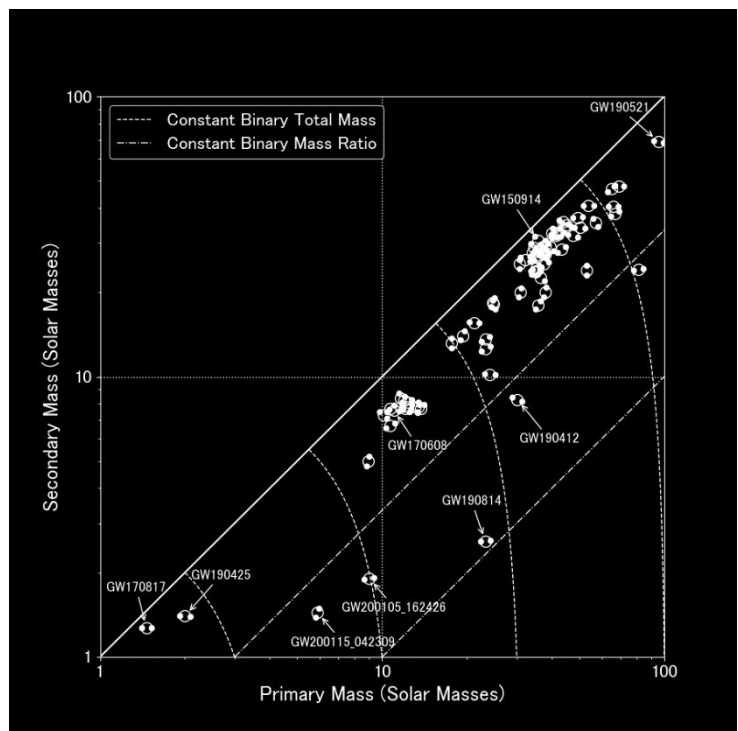
ODKRYWANIE WŁASNOŚCI POPULACJI CZARNYCH DZIUR I GWIAZD NEUTRONOWYCH DZIĘKI TRZECIEJ KAMPANII OBSERWACYJNEJ LIGO i VIRGO

Wstęp

Poszczególne detekcje Źródeł fal grawitacyjnych z połączeń obiektów zwartych takich jak czarne dziury czy gwiazdy neutronowe dają informacje o konkretnych układach. Jednakże, populacja takich detekcji może pokazać jak takie układy powstają i ewoluują we Wszechświecie. Najciekawsze są pomiary rozkładów mas i spinów obiektów zwartych, gdyż to właśnie one pozwalają dowiedzieć się więcej o powstawaniu układów podwójnych obiektów zwartych.

Naukowcy rozważają dwie możliwe ścieżki („kanały”) formowania się układów podwójnych obiektów zwartych mogą w naturze. W kanale **ewolucji izolowanych układów podwójnych**, pary masywnych gwiazd ewoluują razem. Każda z gwiazd na końcowym etapie ewolucji eksploduje, pozostawiając po sobie gwiazdę neutronową lub czarną dziurę. Z kolei w kanale **formacji dynamicznej**, gwiazdy neutronowe i czarne dziury łączą się w pary w gęstych środowiskach, takich jak [gromady kuliste](#) lub [centralne skupiska gwiazd](#), występujące w mniej masywnych galaktykach. Oba te kanały powstawania pozostawiają unikalny ślad na obserwowalnych właściwościach zwartych obiektów, które wykrywamy za pomocą fal grawitacyjnych. Spodziewamy się, że Źródła wykrywalne przez LIGO i Virgo będą obejmowały zakres mas od jednej do stu mas Słońca (oznaczanej symbolem M_{\odot}). Jednakże różne procesy astrofizyczne mogą prowadzić do powstania luk w tym zakresie mas, w których nie wykryjemy żadnych czarnych dziur ani gwiazd neutronowych. Na przykład, wcześniejsze obserwacje obiektów zwartych zarówno w [promieniowaniu rentgenowskim](#) jak i w [falach grawitacyjnych](#) wskazywały na obecność **dolnej luki masowej** w zakresie mas od 3 do 5 M_{\odot} , czyli pomiędzy najbardziej masywnymi gwiazdami neutronowymi a najmniej masywnymi czarnymi dziurami. Można to prawdopodobnie wytłumaczyć mechanizmem fizycznym rządzącym [Śmiercią masywnych gwiazd](#). [Górna luka masowa](#) dla czarnych dziur w zakresie od około 50 do 120 M_{\odot} jest również przewidywana w związku z supernowymi wywołanymi [pulsacyjną niestabilnością par](#). W tym przypadku zewnętrzne warstwy umierającej gwiazdy są odrzucane, pozostawiając albo czarną dziurę o niższej masie, albo nie pozostawiając żadnej pozostałości. Tak więc obecność którejś z tych luk pozwoliłaby nam dowiedzieć się, w jaki sposób masywne gwiazdy kończą swoje życie.

Inną ważną charakterystyką historii formowania się zwanego układu podwójnego jest orientacja spinu (osi obrotu) jego składników względem osi orbity. Na przykład, nachylenie osi obrotu Ziemi względem jej orbity wokół Słońca jest przyczyną występowania pór roku. Zwarte układy podwójne powstałe w izolacji zwykle mają kierunki spinów skierowane prostopadle do płaszczyzny orbity, podczas gdy te powstałe dynamicznie mogą mieć spiny skierowane w przypadkowych kierunkach. Trzecią kluczową obserwacją, którą można zbadać za pomocą fal grawitacyjnych jest odległość, w jakiej nadchodzą sygnały, co można wyrazić jako **przesunięcie ku czerwieni** (ang. redshift) za pomocą [prawa Hubble'a](#). Rozkład przesunięć ku czerwieni może nam powiedzieć o **tempie powstawania gwiazd** w różnych momentach ewolucji Wszechświata, oraz o [składzie chemicznym Wszechświata](#) (tzn. z jakich pierwiastków jest zbudowany i jakie są ich względne ilości). Dzieje się tak dlatego, że skład gwiazd wpływa na to, jak szybko ewoluują one w zwarte objekty, które następnie łączą się ze sobą. Dlatego też pomiar rozkładu mas, spinów i przesunięć ku czerwieni zwartych obiektów łączących się w pary, wraz z możliwymi korelacjami pomiędzy tymi parametrami, jest kluczowym celem astronomii fal grawitacyjnych.



Rysunek 1: Układy podwójne uwzględnione w analizach syntezy populacji przeprowadzonych w naszej pracy, z masą pierwotną na osi poziomej i wtórną na osi pionowej. Poszczególne interesujące zdarzenia są zaznaczone wraz z liniami stałego stosunku mas składników i masy całkowitej (Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration / IGFAE / Thomas Dent.)

Modele i metody

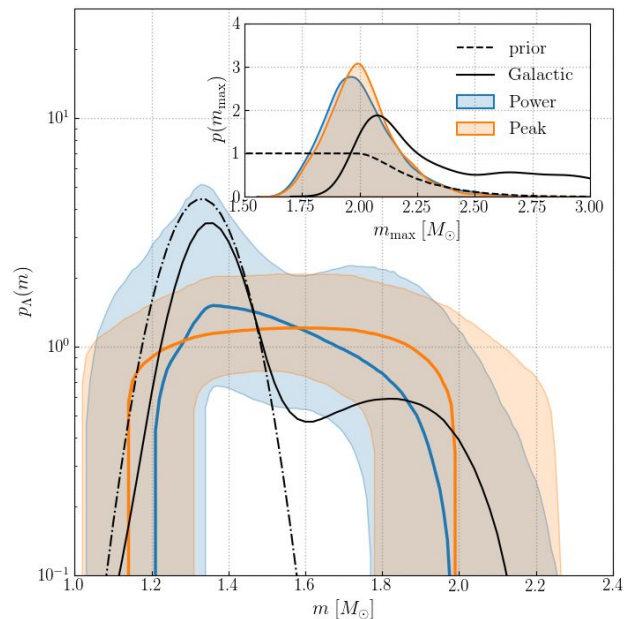
W niniejszej pracy wykorzystujemy zbiór 74 sygnałów powstałych podczas łączenia się układów podwójnych, zidentyfikowanych w danych LIGO i Virgo do końca trzeciej kampanii obserwacyjnej, w tym 70 detekcji układów podwójnych czarnych dziur (ang. binary black holes, BBH), dwóch układów gwiazd neutronowych (ang. binary neutron stars, BNS) i dwóch układów mieszanych gwiazda neutronowa-czarna dziura (ang. neutron star-black hole, NSBH). Zdarzenia te zostały wybrane na podstawie pewności, z jaką zostały wykryte, aby upewnić się, że nie zanieczyszczamy naszej populacji danymi, które nie mają charakteru astrofizycznego. W celu wyznaczenia ogólnych własności populacji obiektów zwartych, najpierw otrzymujemy oszacowania parametrów (masy, spinu i przesunięcia ku czerwieni) każdego pojedynczego przypadku, a następnie łączymy je, biorąc pod uwagę niepewność pomiarów poszczególnych przypadków. Następnie stosujemy kilka różnych modeli rozkładu masy, spinu i przesunięcia ku czerwieni do całej populacji, aby określić, który model najlepiej pasuje do danych. Niektóre z modeli są rządzone przez parametry, które mogą być przypisane bezpośrednio do procesów astrofizycznych. Przykładem jest minimalna masa czarnej dziury, której wartość jest związana z obecnością lub brakiem dolnej luki masowej. Inne modele są bardziej elastyczne, aby dostosować się do nieoczekiwanych cech danych, ale nie wszystkie ich parametry są koniecznie związane z konkretnym zjawiskiem astrofizycznym. Zwarte obiekty, które wykrywamy w falach grawitacyjnych nie są dobrą próbką całej populacji wytwarzanej w przyrodzie. Siła sygnału fal grawitacyjnych rośnie wraz z masą układu i maleje wraz z odległością (lub przesunięciem ku czerwieni), więc możemy preferencyjnie obserwować bardziej masywne źródła w większych odległościach. Uwzględniamy to „[uprzedzenie Malmquista](#)” symulując sygnały z populacji źródeł o losowo rozłożonych parametrach, a następnie mierząc, które z nich są łatwiejsze do wykrycia niż inne. Pozwala nam to na skorygowanie efektów wynikających z uprzedzeń obserwacyjnych.

Całościowa populacja obiektów zwartych

Gdy modelujemy wszystkie przypadki połączeń obiektów zwartych razem, a nie osobno, szacujemy, że tempo ich występowania na jednostkę objętości Wszechświata i na jednostkę czasu wynosi od 71 do 2200 na gigaparsek sześcienny rocznie (1 gigaparsek = 1 miliard parseków, gdzie parsek jest jednostką odległości równą około 3,26 roku świetlnego). Jeśli granicę pomiędzy masami gwiazd neutronowych a czarnych dziur ustalimy na wysokości $2,5 M_{\odot}$, otrzymamy następujące przedziały dla tempa każdej z podpopulacji: (13,0 - 1900,0), (7,4 - 320,0) i (16,0 - 130,0) na gigaparsek sześcienny na rok, odpowiednio dla BNS, NSBH i BBH. Chociaż wykrywamy znacznie więcej źródeł BBH niż pozostałych dwóch klas sygnałów, są one w rzeczywistości znacznie mniej powszechne we Wszechświecie. Dzieje się tak dlatego, że tempo łączenia się układów podwójnych jest malejącą funkcją ich masy, a więc coraz masywniejsze układy są rzadsze. Jednak pojedyncza funkcja potęgowa nie może opisać zależności pomiędzy częstością występowania sygnałów a masą pierwotną w całej populacji układów podwójnych, od najlżejszych gwiazd neutronowych do najcięższych czarnych dziur. Nasze dane sugerują spadek częstości występowania sygnałów powyżej mas gwiazd neutronowych, ale nie jest jasne czy istnieje wyraźna luka masowa przed zakresem mas czarnych dziur. Będziemy potrzebowali więcej danych, aby ostatecznie określić, czy tak jest w istocie.

Rozkład mas gwiazd neutronowych

Następnie, szacujemy rozkład mas gwiazd neutronowych wykrytych w falach grawitacyjnych. Poprzednie pomiary tego rozkładu wykorzystywały obserwacje gwiazd neutronowych w naszej Galaktyce wykrywanych jako [pulsary](#), które emitują promieniowanie radiowe lub rentgenowskie w regularnych odstępach czasu z powodu ich szybkiej rotacji i silnych pól magnetycznych. Podczas gdy pomiary pulsarów preferują rozkład masy z dwoma lokalnymi maksimum, stwierdzamy, że gwiazdy neutronowe obserwowane w falach grawitacyjnych preferują rozkład z jednym maksimum przy wysokich masach w porównaniu do rozkładu Galaktycznego.



Rysunek 2: Rozkład mas gwiazd neutronowych w układach podwójnych obserwowanych w falach grawitacyjnych. Na osi pionowej podano prawdopodobieństwo zaobserwowania gwiazdy neutronowej o danej masie podanej na osi poziomej masę w masach Słońca. Niebieska i pomarańczowa krzywa przedstawiają rozkłady dla dwóch różnych założeń modelowych, podczas gdy zacienione obszary pokazują 90% niepewność pomiaru. Czarna przerywana linia pokazuje rozkład wynioskowany z Galaktycznych układów podwójnych gwiazd neutronowych, podczas gdy czarna ciągła linia pokazuje rozkład uwzględniający wszystkie Galaktyczne gwiazdy neutronowe. Mniejszy rysunek pokazuje rozkład prawdopodobieństwa dla maksymalnej masy gwiazdy neutronowej przy użyciu podobnego schematu kolorów. W tym przypadku, oś pionowa podaje względne prawdopodobieństwo, że maksymalna masa gwiazdy neutronowej jest równa wartości na osi poziomej. Przerywana czarna linia pokazuje początkowe założenia (and. priors) co do maksymalnej masy przyjęte przed analizą danych (rys. 7 naszej pracy).

Może to wskazywać, że pozagalaktyczna populacja obserwowana za pomocą fal grawitacyjnych różni się od Galaktycznej dystrybucji obserwowalnej jako pulsary. Stwierdziliśmy, że maksymalna masa gwiazdy neutronowej mieści się w zakresie od $1,8$ do $2,3 M_{\odot}$, co jest zgodne z obserwacjami pulsarów.

Własności czarnych dziur

W porównaniu z naszymi poprzednimi ograniczeniami na rozkład mas czarnych dziur, obecnie preferujemy więcej układów podwójnych o nierównej masie i większy ułamek zjawisk o niskiej masie w populacji. Nasze nowe, bardziej elastyczne modele identyfikują dwa nowe maksima w rozkładzie masywniejszej czarnej dziury (zwanej też pierwotną) w każdym układzie podwójnym na poziomie około 10 i 18 M_{\odot} , oprócz poprzednio zidentyfikowanego szczytu na poziomie około 35 M_{\odot} . Podczas gdy modele ewolucji izolowanych układów podwójnych mogą wyjaśnić nadwyżkę źródeł w przedziale 8-10 M_{\odot} , pochodzenie dodatkowych maksimów nie jest jeszcze zrozumiałe. Podobnie jak w przypadku dolnej luki masowej omówionej w części dotyczącej pełnej populacji, nie jesteśmy w stanie z całą pewnością stwierdzić obecności górnej luki masowej dla układów podwójnych czarnych dziur. Brak ostrego odcięcia przy około 50 M_{\odot} , jak przewidują modele supernowych wywołanych niestabilnością par, sugeruje, że może istnieć składnik populacji, który nie powstaje w wyniku izolowanej ewolucji układów podwójnych. Dynamiczne scenariusze formowania się mogą prowadzić do procesów hierarchicznych, gdzie pozostałość po poprzednim zderzeniu napotyka inny zwarty obiekt towarzyszący, aby ponownie się połączyć. Może to skutkować rozkładem masy rozciągającym się zarówno na dolną jak i górną lukę masową. Alternatywnie, górna luka masowa może być wypełniona przez układy podwójne w środowisku gazowym, ponieważ ich składowe czarne dziury mogą zwiększać swoją masę poprzez akrecję (tj. gdy otaczający gaz wpada do czarnej dziury).

Podsumowanie

Nasz nowy, rozszerzony katalog detekcji fal z układów podwójnych pozwolił nam na dokładniejsze niż kiedykolwiek wcześniej badanie własności czarnych dziur i gwiazd neutronowych wykrywanych przez fale grawitacyjne. Zaczynamy zagłębiać się w formowanie i ścieżki ewolucji zwartych obiektów wykrywanych przez LIGO i Virgo. Dzięki większej ilości danych z przyszłych obserwacji, spodziewamy się ostatecznie potwierdzić istnienie lub brak luk masowych oraz lepiej zrozumieć nieoczekiwane cechy, które teraz odkryliśmy. Pomoże nam to nałożyć nowe, bezpośrednie ograniczenia na zjawiska astrofizyczne, takie jak końcowe etapy życia gwiazd, dynamiczne łączenie się zwartych obiektów oraz to, z czego zbudowany jest Wszechświat.

Słowniczek

Czarna dziura. Obszar czasoprzestrzeni ekstremalnie ugięty przez niezwykle zwartą masę, w którym grawitacja jest tak silna, że nic, nawet światło, nie może go opuścić.

Gwiazda neutronowa: ekstremalnie gęsty obiekt złożony w większości z neutronów, który powstaje podczas eksplozji supernowej masywnej gwiazdy.

Obiekt zwarty. Czarna dziura lub niezwykle gęsty obiekt astrofizyczny, taki jak gwiazda neutronowa lub [biały karzeł](#).

Spin. Szybkość i kierunek obrotu (tj. moment pędu) gwiazdy neutronowej lub czarnej dziury rotującej wokół własnej osi.

Izolowana ewolucja układu podwójnego: ewolucja układu podwójnego gwiazd od narodzin do śmierci każdej z dwóch gwiazd, kończąca się powstaniem układu podwójnego obiektów zwartych.

Formowanie dynamiczne: tworzenie się zwartego obiektu podwójnego w wyniku przypadkowych oddziaływań dynamicznych zwartych obiektów w gęstym otoczeniu gwiazdowym.

Dolna luka masowa: brak zwartych obiektów o masach pomiędzy najbardziej masywnymi gwiazdami neutronowymi a najmniej masywnymi czarnymi dziurami, czyli od około 3 do 5 mas Słońca.

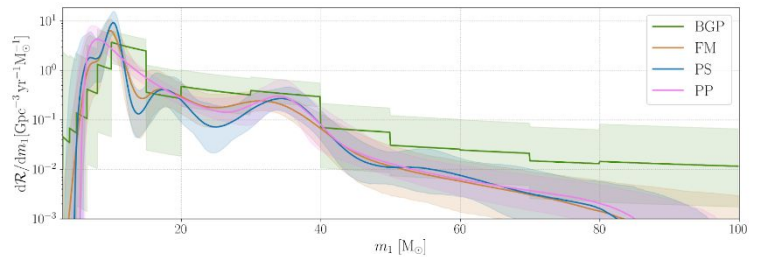
Górna luka masowa: brak czarnych dziur o masach w zakresie od około 50 do 120 mas Słońca, przypuszczalnie w wyniku procesu niestabilności par.

Przesunięcie ku czerwieni: wielkość używana do pomiaru odległości kosmologicznych, oparta na rozciąganiu promieniowania w kierunku dłuższych (czerwonych) fal przez Hubble'owskie rozszerzanie się Wszechświata.

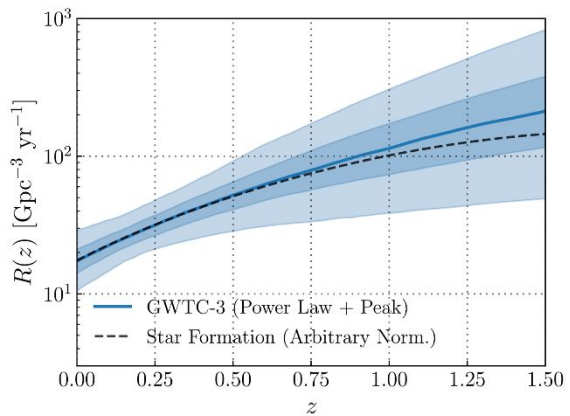
Tempo powstawania gwiazd: tempo, w jakim gaz jest zamieniany w gwiazdy w trakcie Życia Wszechświata.

Akrecja: proces, w którym gaz lub inna materia opada w kierunku ciała przyciągającego grawitacyjnie.

M_{\odot} (masa Słońca): wynosi około 2×10^{30} kilogramów. Masa Słońca jest przydatną jednostką do porównywania mas różnych obiektów astronomicznych.



Rysunek 3: Rozkład masy składnika masywniejszego interpretowany przy użyciu czterech różnych założeń modelowych pokazany trzema różnymi kolorami. Każdy z trzech bardziej elastycznych modeli (z wyjątkiem różowego) odzyskuje dowody na istnienie podstruktury, ze znaczącymi maksimami przy masach około 10 i 35 mas Słońca oraz niewielkim maksimum przy około 18 M_{\odot} . Oś pionowa podaje częstość, z jakim układy o masie pierwotnej na osi poziomej łączą się we Wszechświecie, a zacieniowane regiony pokazują niepewność dla każdego pomiaru. Wyższa wartość na osi pionowej oznacza, że te masy są bardziej powszechne (rys. 11 w naszej pracy).



Rysunek 4: Mediana otrzymanego rozkładu częstości łączenia się składników w układach podwójnych na osi pionowej jako funkcja przesunięcia ku czerwieni na osi poziomej jest pokazana niebieską linią ciągłą. Cieniowanie pokazuje 50% (ciemniejsze) i 90% (jaśniejsze) obszary niepewności pomiaru. Ewolucja tempa powstawania gwiazd z przesunięciem ku czerwieni jest pokazana czarną przerywaną linią (rys. 13 naszej pracy).

Dowiedz się więcej

Przeczytaj artykuł naukowy:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100239/public/main>

News o katalogu GWTC-3:

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/gwtc3>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

Dane katalogu GWTC-3:

<https://www.gw-openscience.org/>

Odwiedź nas w internecie

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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

