

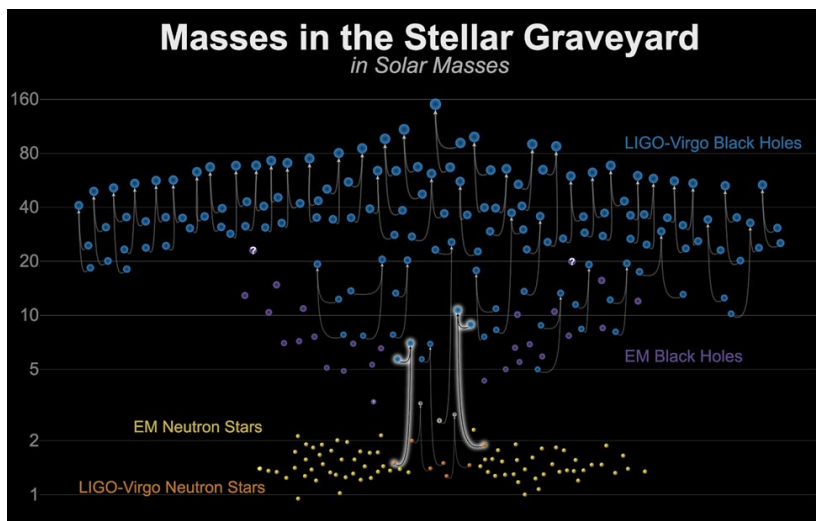
NOWE ŹRÓDŁO FAL GRAWITACYJNYCH: UKŁAD PODWÓJNY GWIAZDA NEUTRONOWA – CZARNA DZIURA

CO ODKRYLIŚMY?

5 stycznia 2020 r. jeden z detektorów [Advanced LIGO](#), położony w [Livingston](#) w Luizjanie w USA, oraz detektor [Advanced Virgo](#) we Włoszech, zaobserwowały fale grawitacyjne pochodzące z całkowicie nowego obiektu astronomicznego. Sygnał został wyemitowany podczas koalescencji układu podwójnego złożonego z dwóch najbardziej ekstremalnych obiektów we Wszechświecie: [gwiazdy neutronowej](#) i [czarnej dziury](#). LIGO i Virgo zarejestrowały promieniowanie grawitacyjne wysłane podczas kilku ostatnich okrążeń ([faza spiralowania](#)), po których nastąpiło połączenie gwiazdy neutronowej z czarną dziurą. Co ciekawe, zaledwie dziesięć dni później został zaobserwowany, tym razem przez obydwa detektory Advanced LIGO oraz detektor Virgo, drugi sygnał fal grawitacyjnych z fazy spiralowania i połączenia się gwiazdy neutronowej z czarną dziurą. Fale grawitacyjne z tego typu układów zarejestrowano po raz pierwszy (zobacz Rys. 1). Obserwowane do tej pory fale grawitacyjne pochodziły wyłącznie z koalescencji dwóch czarnych dziur albo dwóch gwiazd neutronowych. Nowo odkryte obiekty nazwano **GW200105** i **GW200115**.

Te dwa odkrycia są pierwszymi zaobserwowanymi układami mieszanymi typu gwiazda neutronowa - czarna dziura (Neutron Star - Black Hole, NSBH). Od dziesięcioleci przewidywano istnienie tego rodzaju obiektów, ale aż do tej pory nie znaleziono przekonującego dowodu obserwacyjnego.

Dzięki odkryciu NSBH, zaobserwowano już wszystkie trzy typy układów podwójnych zbudowanych z czarnych dziur i gwiazd neutronowych. Tego rodzaju układy nazywamy [układami podwójnymi obiektów zwartych](#). Nowe odkrycia wraz z przyszłymi obserwacjami tego typu układów rzucają światło na narodziny, życie i śmierć gwiazd, jak również na otoczenie, w którym powstały.



*Rysunek 1: Masy gwiazd neutronowych i czarnych dziur wyznaczone dzięki obserwacjom promieniowania grawitacyjnego i elektromagnetycznego. Żółte i fioletowe symbole reprezentują odpowiednio masy gwiazd neutronowych i czarnych dziur zmierzone przy pomocy fal elektromagnetycznych, natomiast pomarańczowe i niebieskie symbole odpowiadają pomiarom dokonany za pomocą fal grawitacyjnych. Na rysunku zostały wyróżnione dwie nowo odkryte koalescencje gwiazdy neutronowej z czarną dziurą **GW200105** i **GW200115**. (Źródło: LIGO-Virgo & Frank Elavsky, Aaron Geller, Northwestern University)*

DETEKCJA FAL GRAWITACYJNYCH

W poszukiwaniu sygnałów fali grawitacyjnej w danych zarejestrowanych przez detektory wykorzystuje się [metodę filtru dopasowanego](#), w której porównuje się zarejestrowane dane z przewidywaniami [ogólnej teorii względności](#). Metoda ta umożliwia znalezienie sygnału fal grawitacyjnych w zasumowanych danych obserwacyjnych na podobnej zasadzie jak rozróżniamy poszczególne instrumenty w utworze muzycznym. Oba zaobserwowane za pomocą fal grawitacyjnych zdarzenia z dużym prawdopodobieństwem są pochodzenia astrofizycznego. Szansa, że GW200105 mógłby być wytworzony przez przypadkowy szum w detektorze, jest mniejsza niż **1 na 2,8 lat**, podczas gdy dla GW200115 jest ona mniejsza niż **1 na 100 000 lat**.

Odwiedź nas w internecie:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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

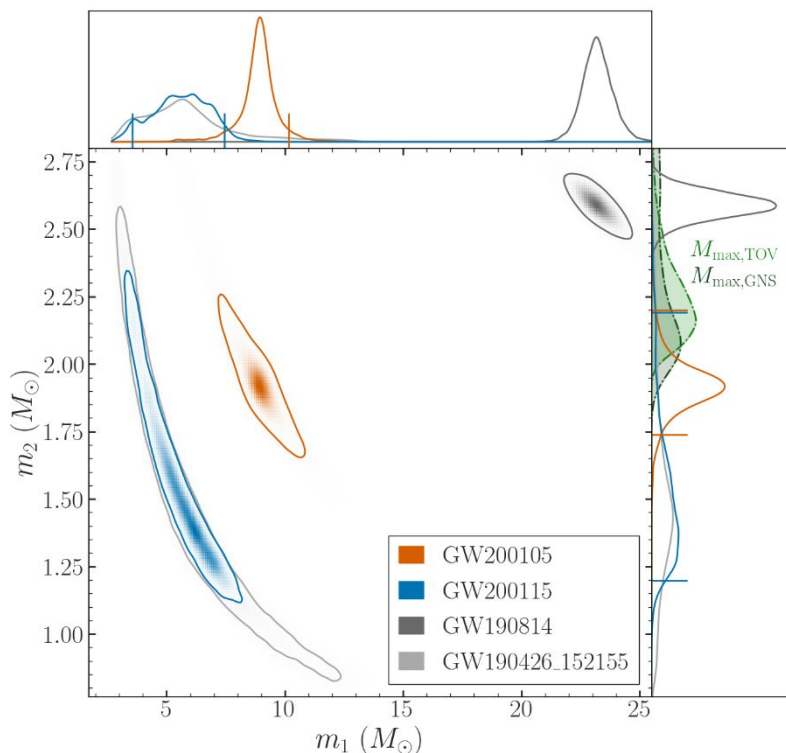


Koalescencja gwiazdy neutronowej z czarną dziurą może być również źródłem promieniowania elektromagnetycznego i to w całym zakresie jego widma. Niestety, położenie źródeł koalescencji na niebie zostało zmierzone z bardzo małą dokładnością - wyznaczony obszar nieba był od 2400 do 29 000 razy większy od Księżyca w pełni. To, wraz z dużą odległością do źródeł (omówioną bardziej szczegółowo poniżej), spowodowało, że nie zaobserwowano promieniowania elektromagnetycznego związanego z tymi zdarzeniami. Przyszłym obserwacjom łączenia się NSBH może towarzyszyć wykrycie wytworzonego w tym procesie promieniowania elektromagnetycznego, co powinno dać nam wgląd w rozrywanie pływy gwiazdy neutronowej przez czarną dziurę. Może to dostarczyć informacji o ekstremalnej formie materii, z której składają się gwiazdy neutronowe.

WŁASNOŚCI ŹRÓDEŁ

Fale grawitacyjne niosą bogate informacje o swoim źródle, na przykład o masach czarnej dziury i gwiazdy neutronowej. Czarna dziura i gwiazda neutronowa, z których pochodził sygnał GW200105, są odpowiednio około 8,9 i 1,9 razy masywniejsze niż nasze Słońce (o masie M_{\odot}). Zdarzenie GW200105 miało miejsce około 800 milionów lat temu, setki milionów lat przed pojawieniem się pierwszych dinozaurów na Ziemi. W przypadku zdarzenia GW200115 szacujemy, że czarna dziura i gwiazda neutronowa miały masy odpowiednio około 5,7 M_{\odot} i 1,5 M_{\odot} , a ich połączenie miało miejsce prawie miliard lat temu. Informacje o masach podsumowano na Rys. 2.

Oszacowaliśmy, że spin czarnej dziury dla GW200105 może wynosić od 0 do nawet 30% maksymalnego tempa rotacji czarnych dziur, podczas gdy dla GW200115 spin wynosi od 0 do 80% maksymalnego tempa. Niewiele możemy powiedzieć o spinach gwiazd neutronowych, ponieważ wyniki naszych pomiarów słabo od nich zależą (zobacz Rys. 3). Dlaczego uważamy, że zaobserwowaliśmy NSBH? Aby wytworzyć obserwowane fale grawitacyjne, obiekty muszą być bardzo zwarte i gęste w porównaniu z typowymi gwiazdami, w przeciwnym razie rozpadłyby się przed połączeniem.



Rysunek 2: Podsumowanie naszej wiedzy o masach składników układów, które wytworzyły GW200105 i GW200115. Oś pozioma reprezentuje masę cięższego obiektu (czarnej dziury), natomiast oś pionowa reprezentuje masę lżejszego obiektu (gwiazdy neutronowej). Cieniowanie kolorami wskazuje kombinacje mas zgodne z danymi, pomarańczowy dla pierwszego zdarzenia, niebieski dla drugiego zdarzenia. Ciemniejsze cieniowanie oznacza lepszą zgodność, czyli większe prawdopodobieństwo takich kombinacji mas. Górny panel podsumowuje informacje o masie czarnej dziury, na przykład niebieska krzywa pokazuje, że czarna dziura w GW200115 miała masę pomiędzy $\sim 3.5M_{\odot}$ i $\sim 7.5M_{\odot}$. Prawy panel pokazuje informacje o masie gwiazdy neutronowej - na przykład pomarańczowa krzywa na tym panelu wskazuje, że gwiazda neutronowa GW200105 miała masę między $1.75M_{\odot}$ i $2.2M_{\odot}$. Zielone cieniowanie na tym panelu podsumowuje obecną wiedzę o tym, jak masywne mogą być gwiazdy neutronowe, pokazując, że obserwowane przez nas obiekty mają masy wystarczająco małe, by być gwiazdami neutronowymi. Rysunek zawiera również informacje o dwóch wcześniejszych obserwacjach fal grawitacyjnych: GW190814, który jest prawdopodobnie połączeniem czarnej dziury o masie $23M_{\odot}$ z inną czarną dziurą o masie $2.5M_{\odot}$ (najbliższą kiedykolwiek zaobserwowaną); oraz GW190426_152155, który wygląda jak układ NSBH, ale sygnał był tak słaby, że nie jest jasne, czy był pochodzenia astrofizycznego.

Ponieważ cięższe obiekty w obu układach mają masy 8,9 M_{\odot} i 5,7 M_{\odot} , jedynymi znanymi obiektami, którymi mogą one być, są czarne dziury. Masy tych czarnych dziur są zgodne z przewidywaniami modeli powstawania i ewolucji gwiazd.

Masy lżejszych obiektów to około 1,9 M_{\odot} i 1,5 M_{\odot} , znacznie mniej niż masa jakiegokolwiek znanej czarnej dziury. Masy te są zgodne z masami znanych gwiazd neutronowych, takich jak te obserwowane w Układzie Drogi Mlecznej lub wykryte za pomocą fal grawitacyjnych (np. GW170817).

JAK POWSTAŁ TEN UKŁAD? JAK CZĘSTO TO SIĘ ZDARZA?

Jak powstały układy NSBH? Istnieją na to dwa główne scenariusze. W jednym z nich, zwanym “izolowaną ewolucją układu podwójnego” dwie zwykle gwiazdy okrążające siebie wzajemnie, mają na tyle duże masy, że w końcowym etapie ewolucji eksplodują jako supernowe. Pozostałością po wybuchu bardziej masywnej gwiazdy jest czarna dziura, a po mniej masywnej gwiazda neutronowa. Inny scenariusz zakłada, że gwiazda neutronowa i czarna dziura powstały w wyniku eksplozji supernowych niezależnie, a następnie będąc blisko siebie uformowały układ podwójny. Do tego typu “dynamicznego oddziaływania” może dojść w gęstym ośrodku gwiazdowym takim jak np. [gromady kuliste](#). Aby odróżnić te dwie możliwości, kluczowa może być orientacja spinu czarnej dziury. W przypadku układu podwójnego ewoluującego w izolacji, oś wirowania czarnej dziury w wielu przypadkach może mieć kierunek bliski kierunkowi osi obrotu układu podwójnego; spodziewamy się też, że gwiazda neutronowa będzie poruszać się w płaszczyźnie orbitalnej czarnej dziury. W przypadku oddziaływań dynamicznych nie ma żadnego wyróżnionego kierunku, więc orientacja spinu czarnej dziury w stosunku do spinu orbitalnego jest dowolna.

Oszacowanie spinu czarnej dziury w **GW200105** nie pozwala nam na rozróżnienie żadnego z tych scenariuszy. Jednak w przypadku **GW200115** stwierdzamy, że kierunek rotacji czarnej dziury jest prawdopodobnie przeciwny do kierunku obrotu układu podwójnego. Na przykład, jeśli gwiazda neutronowa orbituje wokół czarnej dziury zgodnie z ruchem wskazówek zegara, to czarna dziura obraca się wokół własnej osi w kierunku przeciwnym. To sugeruje, że układ GW200115 mógł uformować się w gęstym środowisku gwiazdowym, takim jak gromada kulista.

Jak wiele NSBH we Wszechświecie łączy się w danym okresie czasu?

Obserwacja tych dwóch układów NSBH pokazuje, że koalescencji tego typu obiektów może być od 5 do 15 rocznie w objętości o promieniu miliarda lat świetlnych. To szacowane tempo łączenia się NSBH można wytłumaczyć zarówno izolowaną ewolucją układów podwójnych jak i dynamicznymi oddziaływaniami w gęstych gromadach gwiazd, ale dostępne do tej pory dane nie pozwalają nam na wskazanie bardziej prawdopodobnego scenariusza.

DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ:

Odwiedź nasze strony: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, gwcenter.icr.u-tokyo.ac.jp/en/
Przeczytaj darmowy preprint artykułu dostępny [tutaj](#).

SŁOWNICZEK

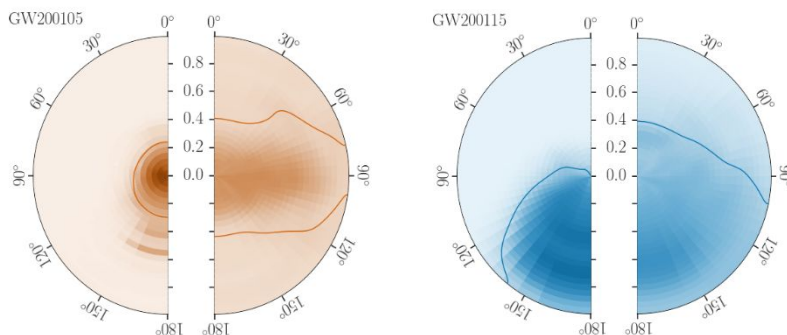
Inspiracja (faza spiralowania): proces, w którym w wyniku emisji fal grawitacyjnych dwa zwarte objekty w układzie podwójnym np. gwiazda neutronowa i czarna dziura zbliżają się do siebie poruszając się po spiralnych orbitach aż w końcu się łączą.

Gwiazda neutronowa: największy stabilny obiekt we Wszechświecie, pozostałość po masywnej gwiazdzie. Kiedy masywna gwiazda wyczerpie swoje paliwo jądrowe, jej jądro zapada się do gwiazdy neutronowej, a zewnętrzne warstwy są odrzucone podczas wybuchu supernowej. Gwiazdy neutronowe są mniej więcej tak masywne jak nasze Słońce, ale mają tylko kilkadziesiąt kilometrów średnicy.

Czarna dziura: obszar czasoprzestrzeni z grawitacją tak silną, że uniemożliwia czemukolwiek, w tym światłu, ucieczkę. [Czarne dziury](#) występują w różnych rozmiarach: [czarne dziury o masach gwiazdowych](#) powstają w wyniku zapadania się gwiazd, a ich masy wahają się od kilku mas Słońca do około 65 mas Słońca. [Czarne dziury o masach pośrednich](#) mają masy od około 100 mas Słońca do 10^5 mas Słońca. Wreszcie [supermasywne czarne dziury](#) mają od ponad 10^5 do ponad 10^9 mas Słońca.

Układ podwójny obiektów zwartych: układ złożony z dwóch zwartych pozostałości gwiazdowych, np. gwiazd neutronowych lub czarnych dziur, krążących bardzo blisko wokół siebie.

Gromada kulista: bardzo gęsta grupa gwiazd połączonych ze sobą grawitacyjnie.



Rysunek 3: Obliczone wartości i kierunki spinów czarnych dziur i gwiazd neutronowych (prawe półkole) dla GW200105 i GW200115. Promień dysku oznacza wartość spinu w zakresie od 0 (brak spinu) do 1 (maksymalne tempo rotacji czarnych dziur). Kierunek spinu jest pokazany jako kąt od 0° (obiekty rotują w tym samym kierunku co ruch orbitalny) do 180° (obiekty rotują w kierunku przeciwnym do ruchu orbitalnego). Zaciemnienie pokazuje możliwe wartości spinu i jego kierunku. Półkole najbardziej po lewej jest najbardziej zaciemnione w pobliżu środka, co oznacza, że spin czarnej dziury w GW200105 był prawdopodobnie niewielki. Zaciemnienie półkole drugiego od prawej sięga aż do dołu wykresu, a więc czarna dziura w GW200115 zapewne się obracała w kierunku przeciwnym do ruchu orbitalnego.

Filtr dopasowany: Technika analizy danych służąca do wykrywania sygnałów ukrytych w zaszumowanych danych. Modele przebiegów fal grawitacyjnych obliczone na podstawie ogólnej teorii względności są przesuwane względem danych w celu sprawdzenia, czy w danych znajdują się odpowiadające im zachowania.

Ogólna teoria względności: Teoria grawitacji zaproponowana przez Alberta Einsteina w 1915 roku. W teorii tej przestrzeń i czas są jak elastyczna tkanina, która odkształca się w obecności materii i energii, a objekty poruszają się po trajektoriach w tej zakrzywionej przestrzeni.

Widmo elektromagnetyczne: Światło widzialne rozciąga się od czerwieni do fioletu, ale poza zakresem, który widzą nasze oczy, widmo to trwa nadal. Za światłem czerwonym znajduje się podczerwień, mikrofałe i fale radiowe, a za fioletem - ultrafiolet, promienie X i gamma. Tak wygląda spektrum promieniowania elektromagnetycznego, a astronomowie wykorzystują każdą część tego zakresu, aby dowiedzieć się więcej o Wszechświecie. Promieniowanie elektromagnetyczne jest falą pól elektrycznych i magnetycznych, a różnią się między sobą częstotliwością lub długością fali.

Rok świetlny: Jednostka odległości równoważna dystansowi, jaki światło pokonuje w ciągu jednego roku. Rok świetlny jest w przybliżeniu równy 9,46 trylionom kilometrów.

M_☉: Jednostka znana masą Słońca, wynosząca około 2×10^{30} kg. Masa Słońca jest powszechnie używana w astronomii do określenia mas obiektów.

Luka (przerwa) masowa: Przerwa w rozkładzie mas obiektów zwartych, sugerowana przez brak obserwacji obiektów o masach w przedziale pomiędzy $2.5 M_{\odot}$ a $5 M_{\odot}$.