

Zaktualizowany katalog LIGO–Virgo–KAGRA ustanawia nowe rekordy w astronomii fal grawitacyjnych wysokiej precyzji

Konsorcjum LIGO–Virgo–KAGRA opublikowało dziś nowy katalog źródeł fal grawitacyjnych. Do katalogu dodano łącznie 161 sygnałów wykrytych między kwietniem 2024 roku a końcem stycznia 2025 roku, co zwiększa całkowitą liczbę dotychczas zarejestrowanych sygnałów fal grawitacyjnych do 390. Wśród najważniejszych wyników znalazły się: dowody na istnienie czarnych dziur drugiej generacji, najdokładniejsza jak dotąd lokalizacja źródła fal grawitacyjnych na niebie oraz pierwszy pomiar trzech modów drgań czarnej dziury. To bogactwo rezultatów świadczy o osiągnięciu dojrzałości przez astronomię fal grawitacyjnych.

Międzynarodowa sieć detektorów fal grawitacyjnych LIGO, Virgo i KAGRA (LVK) udostępniła publicznie zaktualizowany katalog wszystkich dotychczas zaobserwowanych źródeł fal grawitacyjnych, o nazwie „Gravitational Wave Transient Catalogue-5.0” (GWTC-5). Towarzyszą temu artykuły naukowe, przesłane do publikacji w czasopismach „Astrophysical Journal” i „Astrophysical Journal Letters”. Dane analizowane w tych pracach zostały zebrane przez detektory między kwietniem 2024 r. a końcem stycznia 2025 r., podczas części „b” czwartej serii obserwacyjnej (O4), czyli O4b. W tym okresie wykryto 161 nowych źródeł fal grawitacyjnych, co zwiększyło łączną liczbę potwierdzonych zdarzeń zaobserwowanych przez sieć od pierwszego wykrycia w 2015 r. do oszałamiającej liczby 390. Międzynarodowa sieć LVK składa się z dwóch bliźniaczych detektorów Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory Narodowej Fundacji Naukowej Stanów Zjednoczonych (NSF LIGO), detektora Virgo, który mieści się w Europejskim Obserwatorium Grawitacyjnym we Włoszech, oraz japońskiego detektora KAGRA, który jest nadzorowany przez Instytut Badań Promieniowania Kosmicznego (ICRR) Uniwersytetu Tokijskiego.

Najnowsza aktualizacja katalogu, wraz z jego poprzednią wersją GWTC-4 obejmującą sygnały zarejestrowane między majem 2023 r. a styczniem 2024 r., zawiera 75% wszystkich sygnałów fal grawitacyjnych zaobserwowanych do tej pory od momentu pierwszej detekcji w 2015 r. Ten imponujący wynik pokazuje, jak kluczowe są modernizacje detektorów mające na celu zwiększenie ich czułości. Prowadzi to do niezwykłego wzrostu liczby wykrytych sygnałów w każdej kolejnej kampanii obserwacyjnej. W rzeczywistości międzynarodowe konsorcjum LIGO–Virgo–KAGRA naprzemiennie stosuje okresy zbierania danych (kampanie obserwacyjne) z fazami poświęconymi modernizacji detektorów i ich ponownemu uruchamianiu na zwiększonej czułości. Dlatego też katalog sygnałów fal grawitacyjnych – zawierający zweryfikowane dane i parametry fizyczne źródeł sygnałów – jest okresowo aktualizowany i udostępniany szerszej społeczności naukowej.

Niezwykła czułość naszych detektorów – powiedział Ed Porter, badacz z Laboratoire Astroparticule et Cosmologie (APC) CNRS – pozwala nam obecnie rejestrować trzy lub cztery sygnały fal grawitacyjnych tygodniowo. Stale rosnąca ilość danych, nad analizą i badaniem których pracuje cała społeczność naukowców i astronomów, przeniosła nas z ery wstępnych odkryć w erę astronomii fal grawitacyjnych wysokiej precyzji. Obecnie badania fal grawitacyjnych umożliwiają analizy, które wcześniej były niewyobrażalne: badania populacji czarnych dziur, coraz dokładniejsze testy ogólnej teorii względności w ekstremalnych warunkach fizycznych obserwowanych zjawisk oraz rozwój nowych metod uzyskiwania coraz dokładniejszych oszacowań stałej Hubble’a. To scenariusz, na który niewielu ludzi postawiłoby zaledwie dziesięć lat temu.

Oprócz nowych perspektyw, jakie otwiera bardzo duża liczba opublikowanych obserwacji, nowy katalog zawiera również kilka wyjątkowych odkryć, które ustanawiają nowe rekordy w obserwacjach w dziedzinie astronomii fal grawitacyjnych: najlepsza lokalizacja na niebie, jaką kiedykolwiek osiągnięto dla źródła fal grawitacyjnych, najwyraźniejszy sygnał fal grawitacyjnych, jaki kiedykolwiek zarejestrowano, a także dowody na istnienie czarnych dziur drugiej generacji.

Najlepsza lokalizacja źródła na niebie, jaką kiedykolwiek osiągnięto w astronomii fal grawitacyjnych

Sygnał wykryty przez dwa detektory LIGO w Stanach Zjednoczonych i detektor Virgo w Europie 15 czerwca 2024 roku – i dlatego nazwany GW240615 – ustanowił rekord najdokładniejszej lokalizacji na niebie wśród wszystkich zaobserwowanych dotychczas sygnałów fal grawitacyjnych. Źródło zostało zidentyfikowane na obszarze zaledwie 6 stopni kwadratowych, czyli na niewielkim fragmencie sfery niebieskiej. Ten wyjątkowy wynik uzyskano dzięki metodzie triangulacji z wykorzystaniem danych ze wszystkich trzech działających wówczas detektorów, w tym detektora Virgo, który ponownie dołączył na początku kampanii obserwacyjnej O4b w kwietniu 2024 roku, znacząco polepszając możliwość dokładnej lokalizacji źródła.

Coraz dokładniejsza lokalizacja źródeł na niebie jest niewątpliwie jednym z priorytetów całej społeczności astronomicznej, co wiąże się z przeszukiwaniem możliwie najmniejszych obszarów nieba pod kątem

sygnałów elektromagnetycznych generowanych przez obserwowane źródła fal grawitacyjnych — zwłaszcza w przypadku łączenia się gwiazd neutronowych lub łączenia się czarnej dziury z gwiazdą neutronową — powiedziała Marie Anne Bizouard, rzeczniczka współpracy Virgo i badaczka z Narodowego Centrum Badań Naukowych (CNRS) w Nicei — Wiedzieliśmy, że wkład Virgo będzie decydujący w zwiększeniu dokładności lokalizacji obserwowanych źródeł fal grawitacyjnych. Jesteśmy dumni z wybitnej pracy wykonanej przez zespół odpowiedzialny za uruchomienie detektora, który miał kluczowy wkład w ustanowieniu nowego rekordu.

Sygnał fal grawitacyjnych o tej rekordowo dokładnej lokalizacji był wynikiem gwałtownego połączenia się dwóch czarnych dziur o masach wynoszących około 26 i 30 mas Słońca, które zderzyły się ze sobą w odległości ponad 3 miliardów lat świetlnych od Ziemi.

Poprawa lokalizacji źródeł sygnałów na niebie przez sieć detektorów, w połączeniu z większą ilością dostępnych danych, umożliwiła również dokładniejsze oszacowanie stałej Hubble'a H_0 , która mierzy obecne tempo rozszerzania się Wszechświata. Korzystając z danych z katalogu GWTC-5, konsorcjum LVK uzyskało nowy, niezależny pomiar stałej Hubble'a, $H_0 = 71.0_{-7}^{+9}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹, który jest ponad 25% bardziej dokładny niż oszacowanie oparte na danych z poprzedniej wersji katalogu. Wartość ta jest zgodna z tradycyjnymi pomiarami korzystającymi z danych zarówno z naszego kosmicznego sąsiedztwa, jak i z danych związanych z wczesnym Wszechświatem, ale nie jest jeszcze wystarczająco precyzyjna, aby rozwikłać rozbieżność między tymi wynikami.

Najwyraźniejszy sygnał fali grawitacyjnej, jaki kiedykolwiek zarejestrowano

Wykrycie fal grawitacyjnych nie oznacza po prostu przechwycenia sygnału, ale oznacza wydobycie go z szumu zakłócającego pracę detektorów. Wymaga to intensywnych działań redukujących wpływ szumu i wysoce zaawansowanej analizy danych, w której „siła” lub „klarowność” sygnału jest wyrażana za pomocą stosunku sygnału do szumu (SNR). Opublikowany dziś katalog zawiera „najczystszy” sygnał fal grawitacyjnych, jaki kiedykolwiek wykryto, ze stosunkiem sygnału do szumu wynoszącym 76,9. Sygnał ten, GW250114, dotarł do Ziemi 14 stycznia 2025 roku i powstał w wyniku połączenia dwóch czarnych dziur o niemal identycznych masach (odpowiednio 32 i 34 razy większych od masy Słońca), do którego doszło w odległości ponad miliarda lat świetlnych od Ziemi. Jego „klarowność” doprowadziła do wyjątkowych wyników naukowych, które zostały już opublikowane i ogłoszone przez konsorcjum LVK w ostatnich miesiącach, w tym najdokładniejszego testu ogólnej teorii względności, jaki kiedykolwiek przeprowadzono, oraz potwierdzenia twierdzenia Stephena Hawkinga o polu powierzchni czarnej dziury.

Kiedy dwie czarne dziury się łączą, ich zderzenie „dzwoni”, emitując określone tony, charakteryzujące się dwiema liczbami – częstotliwością oscylacyjną i czasem tłumienia – powiedział Keefe Mitman, fizyk z Uniwersytetu Cornell. Jeśli zmierzysz jeden ton w danych ze zderzenia, możesz obliczyć masę i spin czarnej dziury powstałej w wyniku zderzenia. Ale jeśli zmierzysz dwa lub więcej tonów w danych – co umożliwia wyraźny sygnał, taki jak GW250114 – każdy z nich w efekcie daje inny pomiar masy i spinu, zgodnie z ogólną teorią względności.

Jeśli te dwa pomiary zgadzają się ze sobą, w praktyce weryfikujemy ogólną teorię względności – powiedział Mitman. Ale jeśli zmierzymy dwa tony, które nie pasują do tej samej kombinacji masy i spinu, możemy zacząć badać, jak bardzo odbiegamy od przewidywań ogólnej teorii względności. Sygnał GW250114 był wystarczająco wyraźny, aby naukowcy mogli zmierzyć dwa tony i ograniczyć trzeci. Wszystkie pomiary są zgodne z ogólną teorią względności Einsteina.

Czarne dziury drugiej generacji

Kolejny bardzo istotny wynik, zawarty w nowym katalogu opublikowanym dzisiaj – choć został już ogłoszony przez konsorcjum LVK w ostatnich miesiącach – dotyczy dwóch bardzo szczególnych sygnałów: GW241011 i GW241110. Sygnały te, wykryte w październiku i listopadzie 2024 roku, w odstępie zaledwie jednego miesiąca, zostały wygenerowane przez dwa zderzenia czarnych dziur znajdujących się odpowiednio około 700 milionów i 2,4 miliarda lat świetlnych od Ziemi. Pewne cechy tych zderzeń – w szczególności spin czarnych dziur (prędkość ich wirowania oraz orientacja spinu) – wskazują, że obiekty te mogą być czarnymi dziurami „drugiej generacji”, czyli czarnymi dziurami, które same są wynikiem wcześniejszych koalescencji. Obiekty te prawdopodobnie powstały w bardzo gęstych ośrodkach, takich jak gromady gwiazd, gdzie czarne dziury wielokrotnie zderzają się i łączą się ze sobą. Rosnąca liczba obserwowanych zdarzeń pozwoliła badaczom na badanie i coraz dokładniejszą identyfikację właściwości różnych populacji czarnych dziur. Jeden z artykułów towarzyszących katalogowi omawia właśnie ten konkretny aspekt.

Jednym z najbardziej intrygujących wątków wyłaniających się z nowego katalogu jest pojawienie się grupy czarnych dziur o masach od około 10 do 20 mas Słońca, które wydają się mieć wspólną cechę: szybko się obracają; prawdopodobnie są to czarne dziury „drugiej generacji” – powiedział Mario Spera, badacz z Virgo Collaboration w SISSA. – Zagadką jest nie tylko to, że te czarne dziury szybko się obracają, ale dlaczego ta subpopulacja charakteryzuje się takimi masami. To kolejna wskazówka, że Wszechświat może wciąż skrywać ważne informacje o powstawaniu, ewolucji i łączeniu się czarnych dziur. Ten obraz będzie bogatszy i bardziej zaskakujący z każdym nowym katalogiem fal grawitacyjnych opublikowanym przez LVK.

Współpraca LIGO-Virgo-KAGRA

LIGO jest finansowane przez Narodową Fundację Nauki (NSF) i prowadzone przez Caltech oraz MIT. Wsparcie finansowe dla projektu Advanced LIGO było koordynowane przez NSF, przy czym Niemcy (Max Planck Society), Wielka Brytania (Science and Technology Facilities Council) oraz Australia (Australian Research Council) wniosły znaczący wkład w projekt. W pracach zaangażowanych jest ponad 1600 naukowców z całego świata działających w ramach LIGO Scientific Collaboration, która obejmuje również GEO Collaboration. Dodatkowe instytucje członkowskie są wymienione na stronie: <https://my.ligo.org/census.php>.

Konsorcjum Virgo liczy obecnie około 1000 członków reprezentujących ponad 175 instytucji z 20 różnych (głównie europejskich) krajów. Europejskie Obserwatorium Grawitacyjne (EGO), w którym znajduje się detektor Virgo w pobliżu Pizy we Włoszech, finansowane jest przez Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) we Francji, Narodowy Instytut Fizyki Jądrowej (INFN) we Włoszech, Narodowy Instytut Fizyki Subatomowej (Nikhef) w Niderlandach, The Research Foundation – Flanders (FWO) oraz Belgijski Fundusz Badań Naukowych (F.R.S.–FNRS) w Belgii. Polski wkład w projekt finansowany jest przez MNiSW. Więcej informacji dostępnych jest na stronie Virgo: <https://www.virgo-gw.eu>.

KAGRA to detektor interferometryczny o długości ramion 3 km, zlokalizowany w Kamioka w prefekturze Gifu w Japonii. Instytucją odpowiedzialną za projekt jest Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) Uniwersytetu w Tokio. Projekt jest współprowadzony przez National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) oraz High Energy Accelerator Research Organization (KEK). Konsorcjum KAGRA tworzy ponad 400 członków ze 128 instytucji z 17 krajów. Informacje o KAGRA dostępne są na stronie: <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>. Materiały naukowe można znaleźć pod adresem: <http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/KAGRA>

Media Contacts:

LIGO-Virgo-Kagra Collaboration
LVK Communications Group
Lead Susanne Milde +49 172 3931349
susanne.milde@ligo.org

EGO and Virgo
Vincenzo Napolano
napolano@ego-gw.it
+393472994985

NSF
Jason Stoughton
Staff Associate for Science Communications
703-292-7063
jstought@nsf.gov

Caltech
Whitney Clavin
wclavin@caltech.edu
626-395-1944

MIT
Abigail Abazorius
abbya@mit.edu
617-253-2709

KAGRA
Shinji Miyoki
kagra-pub@icrr.u-tokyo.ac.jp
+81-578-85-2623

POLGRAW
Dorota Rosinska
drosinska@astrow.edu.pl