

WYNIKI Z SERII OBSERWACYJNEJ GEO-KAGRA O3

WPROWADZENIE

[KAGRA](#) to nowy detektor fal grawitacyjnych (FG) w Japonii, który od października 2019 r. dołączył do międzynarodowej sieci detektorów, wraz z Advanced [LIGO](#) i Advanced [Virgo](#). KAGRA planowała rozpocząć wspólne obserwacje z Advanced LIGO i Advanced Virgo w ostatnim miesiącu (kwiecień) trzeciej serii obserwacyjnej (O3) w 2020 roku. Jednak z powodu pandemii COVID-19 Advanced LIGO i Advanced Virgo musiały zostać zamknięte 27 marca 2020 roku. Na szczęście KAGRA znalazła partnera, [GEO 600](#) (w skrócie GEO) w Niemczech, który działa nieprzerwanie w ramach kolaboracji LIGO.

W kwietniu 2020, GEO i KAGRA przez dwa tygodnie prowadziły wspólne obserwacje. Nazywamy to wspólną **serią obserwacyjną** GEO--KAGRA O3GK. Wyniki zostały przedstawione w artykule naukowym. Ze względu na słabą **czułość** obu detektorów, nie ogłoszono żadnej pewnej detekcji FG. Niemniej jednak, w ciągu tych dwóch tygodni astronomowie zaobserwowali kilka **rozbłysków promieniowania gamma (RPG)**, a kolaboracja LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) przeprowadziła serię powiązanych poszukiwań FG: **przegląd całego nieba** w poszukiwaniu koalescencji **podwójnych gwiazd neutronowych (PGN)** i niemodelowanych **rozbłysków**, a także ukierunkowane poszukiwania koalescencji zwartych układów podwójnych (ZUP) i niemodelowanych rozbłysków powiązanych z RPG zaobserwowanymi podczas serii obserwacyjnej (**poszukiwania ukierunkowane na RPG**).

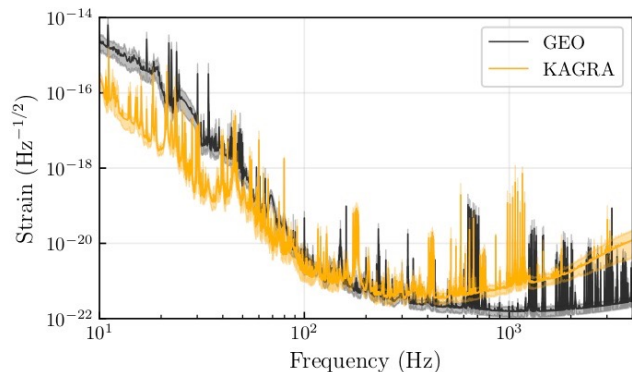
W uzyskanych danych nie zidentyfikowano żadnych sygnałów FG, co, biorąc pod uwagę czułość detektorów, było zgodne z oczekiwaniami. Pokazuje to jednak, że istnieje gotowość do uwzględnienia w analizie danych KAGRY, co będzie miało coraz większe znaczenie, gdyż KAGRA zbliża się do swojej maksymalnej czułości.

KAGRA I GEO 600

Seria O3GK był pierwszą wspólną obserwacją KAGRY z innym detektorem FG. KAGRA jest laserowym interferometrem FG z ramionami o długości 3 km, zlokalizowany w Kamioce, Gifu w Japonii. KAGRA jest zbudowana pod ziemią w kopalni i wykorzystuje lustra kriogeniczne dla czterech mas testowych, co zmniejsza tło sejsmiczne i termiczne. W kwietniu 2019 r. większość komponentów interferometru była zainstalowana i rozpoczęto prace związane z jego uruchomieniem (dostrajanie detektorów w celu zwiększenia ich czułości). Po uruchomieniu czułość KAGRY została zwiększona, aby do końca marca 2020 r. objąć **obserwowalny zakres PGN** wynoszący około 1 **megaparsek** (3,26 mln lat świetlnych). Ponieważ KAGRA jest nowym detektorem, wciąż ulepszanym, nie osiągnęła jeszcze maksymalnej czułości.

GEO jest jednym z najstarszych detektorów FG będących interferometrem i, pomimo tego że jest mniejszym detektorem z ramionami o długości 600 metrów, odgrywa ważną rolę jako poligon testowy nowych technologii. Czułość detektorów FG jest ograniczona przez szum od instrumentów.

Na dodatek szumu, który jest zasadniczo stały w czasie, w danych znajdują się krótkotrwałe instrumentalne artefakty, które nazywamy usterekami. Podczas gdy wiele wysiłku wkłada się w to, aby hałas był jak najniższy i pozbawiony zakłóceń, usterek mogą przyjmować taką samą formę jak krótkotrwałe sygnały FG. Uruchamiając jednocześnie dwa detektory, znacznie zmniejszamy liczbę takich usterek, które w przeciwnym razie można by było pomylić z rzeczywistymi sygnałami.



Rysunek 1: (Lewy panel Rys. 1 z naszej publikacji) Wykres przedstawiający typową czułość KAGRY (żółta krzywa) i GEO (czarna krzywa) podczas wspólnego okresu obserwacyjnego. Oś pionowa podaje średni **szum odkształcenia** w detektorach, który jest miarą tego, w jakim stopniu zwierciadła poruszają się w funkcji częstotliwości (oś pozioma). Krzywe ciągłe pokazują średnią czułość dla każdego przedziału częstotliwości, a zacienione obszary pokazują 5-ty i 95-ty percentyl dla danego zakresu.

Rysunek 1 przedstawia typową czułość obydwu detektorów podczas wspólnej serii obserwacyjnej. Mniejsze odkształcenie odpowiada większej czułości. Przy niższych częstotliwościach KAGRA jest bardziej czuła, podczas gdy przy wyższych częstotliwościach GEO jest bardziej czuła. Podczas serii obserwacyjnej KAGRA mogła wykryć orbitujące PGN znajdujące się w odległości aż do 0,8 megaparseków (2,6 milionów lat świetlnych), a GEO mógł to zrobić dla odległości około 1,1 megaparseków (3,6 milionów lat świetlnych).

Rysunek 2 przedstawia zakres obserwowalnych PGN dla dwóch detektorów w czasie wspólnej serii obserwacyjnej.

PRZESZUKIWANIE CAŁEGO NIEBA

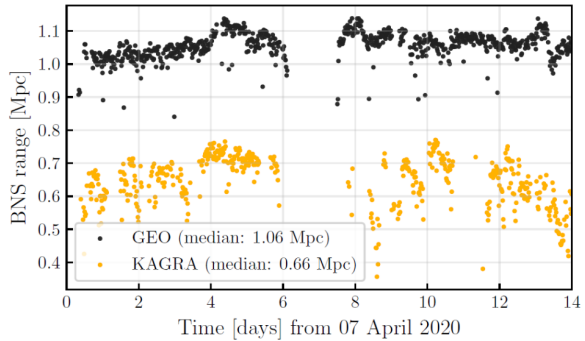
Kolaboracja LVK przeprowadziła poszukiwanie **układów podwójnych i rozbłyków obejmujące całe niebo**. Poszukiwanie układów podwójnych wykonywane jest z **dopasowanym filtrem**, w którym porównuje się dane z zestawem **przebiegów wzorcowych** opartych na teoretycznych modelach FG wyemitowanych podczas koalescencji PGN. Poszukiwanie rozbłyków obejmujące całe niebo to wyszukiwanie niemodelowanych sygnałów przejściowych FG. Wyniki obydwu obserwacji całego nieba nie odkryły żadnych sygnałów FG. Wynik pokazany jest na wykresie na **Rysunku 3**.

POSZUKIWANIA UKIERUNKOWANE NA RPG

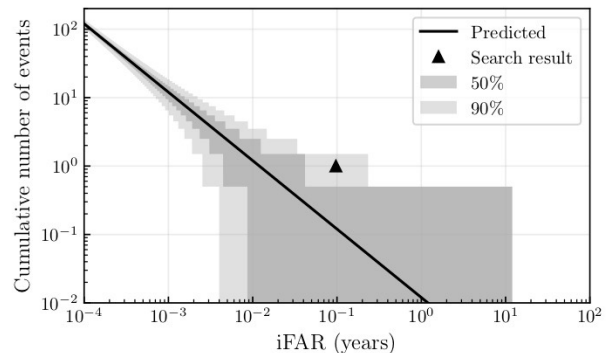
Podczas serii obserwacyjnej miało miejsce kilka interesujących wydarzeń astronomicznych, RPG, którym potencjalnie mogły towarzyszyć FG. Dane dotyczące tych wydarzeń zostały przeanalizowane bardziej wnikliwie. Wykryto cztery RPG, w tym dwa **długie RPG** (o czasie trwania dłuższym niż dwie sekundy) i dwa **krótkie RPG** (o czasie trwania krótszym niż dwie sekundy), zgodne z danymi zebranymi zarówno przez KAGRA, jak i GEO. Kolaboracja LVK przeprowadziła **poszukiwania ukierunkowane na RPG układów podwójnych i rozbłyków**, które przeszukują pasmo czasowe i położenie na niebie ograniczone obserwacjami elektromagnetycznymi RPG. Kolaboracja LVK doszła do wniosku, że nie ma dowodów na emisję FG związaną z którymkolwiek z tych czterech RPG.

Jeden z analizowanych RPG, RPG 200415A, został powiązany z **ogromnym rozbłyskiem magnetara** w galaktyce Rzeźbiarza (NGC 253) w odległości 3,5 megaparseków.

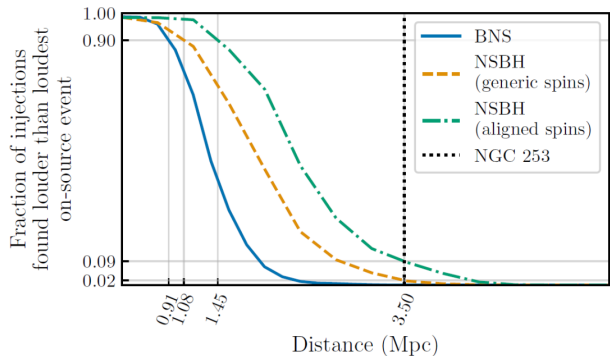
Wynik poszukiwania układów podwójnych ukierunkowanego na RPG dla RPG 200415A pokazano na **Rysunku 4**. **Wykluczona odległość** oparta na naszej analizie wynosi tylko kilka **kiloparseków**, a to nie wystarczy, aby wykluczyć prekursora koalescencji RPG i przetestować hipotezy rozbłyku olbrzymiego magnetara. Wynik poszukiwania rozbłyku ukierunkowanego na RPG jest pokazany na **Rysunku 5**. Dla każdego RPG obliczona została wykluczona odległość.



Rysunek 2: (Prawy panel Rys. 1 z naszej publikacji) Zakresy obserwowalne PGN dla KAGRA (żółte punkty) i GEO (czarne punkty) podczas wspólnej serii obserwacyjnej, wraz z ich ewolucją. Luka w okolicach 6 i 7 dnia powstała gdy oba detektory zostały dotknięte złą pogodą i nie były w stanie zbierać danych. Mediana wartości zakresu wynosi 0,66 megaparseków dla KAGRY i 1,06 megaparseków dla GEO.



Rysunek 3: (Rys. 5 z naszej publikacji) łączna liczba zdarzeń jako funkcja odwrotności **poziomu fałszywych alarmów** (iFAR) znalezionego przez poszukiwanie rozbłyków obejmujące całe niebo. Zidentyfikowano tylko jedno zdarzenie (trójkąt), które jest najgłośniejszym zdarzeniem. Znajduje się w przedziale 90%, co oznacza że jest to najprawdopodobniej szum. Zacienione obszary pokazują niepewność Poissona 50% i 90%.



Rysunek 4: (Rys. 7 z naszej publikacji) Wykluczone odległości dla RPG 200415A, wyznaczone poprzez ukierunkowane na RPG poszukiwania układów podwójnych dla sygnałów PGN (BNS) oraz gwiazdy neutronowej i czarnej dziury (NSBH). Krzywe odpowiadają trzem symulowanym populacjom: PGN (BNS) (ciągła niebieska linia), NSBH z ogólnie zorientowanymi spinami (przerwana pomarańczowa linia) i NSBH, których spiny są równoległe do orbitalnego momentu pędu (kropkowana-przerwana zielona linia). Na poziomie 90% wykluczone są odległości: 0,91 megaparseków, 1,08 megaparseków i 1,45 megaparseków, oznaczone liniami pionowymi; pokazano także odległość do NGC 253 (3,5 megaparseków). Poziome ufności odpowiadające odległości do NGC 253 dla PGN (BNS), NSBH (spiny ogólne) i NSBH (spiny równoległe) są oznaczone liniami poziomymi: odpowiednio 0%, 2% i 9%. Zatem czułość wyszukiwania nie jest wystarczająca do wykluczenia koalescencji PGN.

PERSPEKTYWY NA PRZYSZŁOŚĆ

Poprzez przedstawioną tu analizę, kolaboracja LVK wykazała, że KAGRA może stać się częścią sieci detektorów FG. Detektory LVK nie są obecnie w użyciu z powodu wprowadzanych usprawnień przed nadchodzącą czwartą serią obserwacyjną (O4), której rozpoczęcie planuje się obecnie na połowę grudnia 2022 r. (<https://www.ligo.org/scientists/GWEMAlerts.php>).

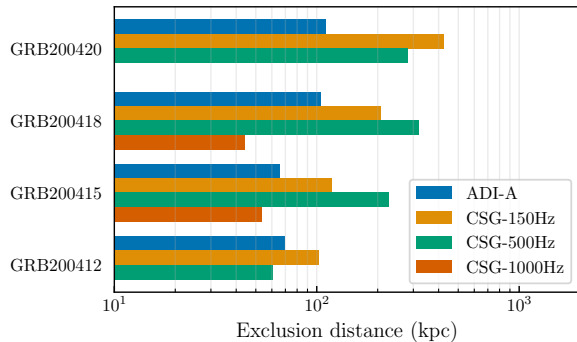
Gdy KAGRA zacznie zbierać dane ze swoimi docelowymi ustawieniami, osiągnie wówczas czułość porównywalną z detektorami Advanced LIGO i Advanced Virgo; KAGRA odegra wówczas zasadniczą rolę w wykrywaniu sygnałów FG. Niezbędne jest, aby więcej detektorów stało się częścią sieci, w celu uzyskania większej ilości informacji i poprawienia naszej zdolności lokalizacji źródeł. Fakt, że ramiona KAGRY są zorientowane inaczej niż w przypadku pozostałych detektorów, sprawia, że jej wkład do pomiarów jest jeszcze ważniejszy.

Dowiedz się więcej

Przeczytaj wiadomości na naszych stronach: <https://www.ligo.org/news.php>
<https://www.virgo-gw.eu/>
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

Przeczytaj cały artykuł naukowy: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100286/public>

Publikacja danych O3GK: <https://www.gw-openscience.org/>



Rysunek 5: (Rys. 8 z naszej publikacji) Wykluczona odległość dla każdego z czterech RPG przeanalizowanych przez RPK-ukierunkowane poszukiwanie typowych rozbłysków. Różne kolory odpowiadają różnym modelom sygnału FG; cztery rozważane modele są znane jako model A niestabilności dysku akrecyjnego oraz kołowe sygnały sinusoidalno-gaussowskie o centralnych częstotliwościach 150 Hz, 500 Hz i 1000 Hz.

Odwiedź nasze strony

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Słownik

Przeszukiwanie całego nieba: Typowe poszukiwania. W przypadku danych O3GK, kolaboracja LVK przeprowadziła wyszukiwanie z dopasowanym filtrem dla koalescencji PGN i niemodelowanych rozbłysków.

Podwójna gwiazda neutronowa: Układ składający się z dwóch gwiazd neutronowych na bliskiej orbicie wokół siebie. (Zobacz [tutaj](#).)

Zakres obserwacji podwójnej gwiazdy neutronowej: Standardowa miara czułości interferometru, która jest średnią odległością z jakiej można wykryć orbitujący układ podwójny składający się z dwóch gwiazd neutronowych ze stosunkiem sygnału do szumu w dopasowanym filtrze wynoszącym 8.

Czarna dziura: Region ekstremalnie zniekształconej czasoprzestrzeni spowodowanej przez niezwykle zwartą masę, w którym grawitacja jest tak intensywna, że uniemożliwia czemukolwiek, w tym światłu, ucieczkę.

Poszukiwanie rozbłysków: Poszukiwanie zsynchronizowanej nadwyżki energii w sieci detektorów FG, bez zakładania specyficznego modelu fali.

Zwarty obiekt: Niezwykle gęsty obiekt astrofizyczny, taki jak czarna dziura, gwiazda neutronowa lub biały karzeł.

Wykluczona odległość: Odległość, w której 90% symulowanych sygnałów zostałyby odzyskanych z co najmniej taką pewnością, jak najgłośniejsze potencjalne zdarzenie spowodowane przez szum detektora w czasie wystąpienia RPG.

Poziom fałszywych alarmów: Ten wskaźnik mierzy jak często fluktuacja szumu detektora może generować sygnał podobny do rozważanego potencjalnego zdarzenia. Im mniejszy odsetek fałszywych alarmów, tym większe prawdopodobieństwo, że potencjalne zdarzenie będzie astrofizyczne.

Promieniowanie gamma: Fotony o bardzo wysokiej energii, większej nawet niż promieniowanie rentgenowskie.

Rozblysk promieniowania gamma (RPG): Blysk promieni gamma pochodzących z odległego źródła astrofizycznego, trwający do setek sekund, ale w wielu przypadkach nawet krócej niż kilka sekund.

GEO 600: Detektor GEO to naziemny interferometr w Hanowerze w Niemczech.

Przebieg wzorcowy: Reprezentacja ewolucji sygnału fali grawitacyjnej w czasie.

Poszukiwania ukierunkowane na RPG: Poszukiwania sygnałów FG powiązanych z RPG zgłaszanymi podczas serii obserwacyjnej. Celując w czasy i pozycje na niebie RPG, możemy potencjalnie wykryć słabsze powiązane sygnały FG, lepiej niż można to zrobić przy przeszukiwaniu całego nieba. W przypadku danych O3GK kolaboracja LVK przeprowadziła wyszukiwanie z dopasowanym filtrem dla koalescencji PGN (BNS) i NSBH oraz ogólnych niemodelowanych rozbłysków.

KAGRA: Detektor KAGRA to podziemny interferometr znajdujący się w kopalni Kamioka w Gifu w Japonii. Jest to interferometr laserowy, z ramionami o długości 3 km i lustrami chłodzonymi kriogenicznie.

Kiloparsek (kpc): Tysiąc razy większa odległość niż parsek, równa około 3,26 tysięcy lat świetlnych.

Rok świetlny: Jednostka odległości odpowiadająca dystansowi jaki światło pokonuje w ciągu jednego roku. Rok świetlny to w przybliżeniu 9,46 biliona kilometrów (około 5,88 biliona mil).

LIGO: Obserwatorium fal grawitacyjnych z interferometrem laserowym składające się z dwóch detektorów interferometrycznych fal grawitacyjnych o długości 4 km, w odległości około 3000 km (1900 mil) od siebie, zlokalizowanych w Livingston w stanie Louisiana i Hanford w stanie Waszyngton, w Stanach Zjednoczonych.

Długi RPG: Czas trwania dłuższy niż 2 sekundy. Uważa się, że jest to efekt zapadania się jąder masywnych gwiazd.

Magneta: Gwiazda neutronowa, której silne pole magnetyczne prowadzi do nietypowych zjawisk, takie jak krótkie błyski.

Ogromny rozblysk magnetara: Znacznie większa wersja krótkiego rozblysku, emitująca w czasie mniejszym niż sekunda taką ilość energii, jaką Słońce emituje w ciągu 100 000 lat.

Dopasowany filtr: Technika wykrywania sygnałów ukrytych w zaszurowanych danych. Szablony fal grawitacyjnych obliczone na podstawie ogólnej teorii względności są skanowane względem danych i powiadomienie następuje, gdy w danych zostaną znalezione pasujące wzorce.

Megaparsek (Mpc): Jednostka odległości. Milion razy większa od parseka, równa około 3,26 miliona lat świetlnych.

Gwiazda neutronowa: Niezwykle gęsty obiekt, który pozostaje po zapadnięciu się masywnej gwiazdy. Gwiazda tak gęsta, że atomy nie mogą się rozdzielić, a cała gwiazda wygląda jak gigantycznego jądra atomowe. Mają masy około 1 – 2 mas Słońca, ale ich promień wynosi tylko około 10 kilometrów.

Układ podwójny gwiazda neutronowa-czarna dziura: Układ składający się z jednej czarnej dziury i jednej gwiazdy neutronowej na bliskiej orbicie wokół siebie. (Zobacz [tutaj](#).)

Szum: Fluktuacje pomiaru fali grawitacyjnej spowodowane różnymi zakłóceniami instrumentalnymi i środowiskowymi. Czułość detektora fal grawitacyjnych jest ograniczona przez szum.

Seria obserwacyjna: Okres, w czasie którego detektory fal grawitacyjnych zbierają dane obserwacyjne.

Parsek (pc): Jednostka odległości powszechnie używana w astronomii, równa około 3,26 lat świetlnych. Odpowiada w przybliżeniu 31 bilionom kilometrów.

Czułość: Opis zdolności detektora do wykrywania sygnału. Detektory o niższym szumie są w stanie wykryć słabsze sygnały i dlatego mówi się, że mają wyższą (lub większą) czułość.

Krótki RPG: Czas trwania krótszy niż 2 sekundy. Uważa się, że pochodzi z koalescencji zwartych obiektów (PGN (BNS) lub NSBH).

Stosunek sygnału do szumu: Stosunek mocy sygnału do mocy szumu, używany do porównania poziomu sygnału z poziomem szumu. Mierzy siłę sygnału w porównaniu ze źródłami hałasu, które mogą go potencjalnie zakłócić.

Odkształcenie: Zmiana długości ramienia detektora, spowodowana deformacją czasoprzestrzeni przez fale grawitacyjne przechodzące przez detektor, podzielona przez długość ramienia.

Virgo: Detektor Virgo to naziemny interferometr zlokalizowany w Cascina we Włoszech, niedaleko Pizy.