

## POSZUKIWANIE FAL GRAWITACYJNYCH TOWARZYSZĄCYCH BŁYSKOM GAMMA W DANYCH O3a LIGO-VIRGO

Krótkie błyski [gamma](#) (GRBs) to niezwykle jasne błyski wysokoenergetycznych [promieniowania gamma](#) z odległego kosmosu, które wykrywa się mniej więcej raz dziennie. Błyski gamma są emitowane w postaci wąskich strumieni (dżetów) i są tak jasne, że możemy je zobaczyć z odległości miliardów lat świetlnych.

Istnieją co najmniej dwa różne rodzaje zjawisk astrofizycznych, które mogą wytworzyć GRB. Tak zwane *długie GRB* są bardziej powszechne (około 70% wszystkich GRB) i są związane z wybuchami supernowych, co przemawia za tym, że ta kategoria wybuchów pochodzi od masywnych wybuchających gwiazd, gdy ich rdzenie się zapadają. Wytworzony w ten sposób GRB trwa od kilku sekund do wielu minut.

*Krótkie GRB* może trwać od kilku milisekund do najwyżej kilku sekund. Uważamy, że większość, jeśli nie wszystkie krótkie GRB, są wynikiem zderzenia się par niezwykle gęstych gwiazd zwanych gwiazdami neutronowymi; inną możliwością jest sytuacja, gdy czarna dziura rozrywa gwiazdę neutronową w procesie jej pochlania. W obu scenariuszach GRB bardzo duża ilość materii może zostać gwałtownie przyspieszona w sposób, który mógłby wyemitować fale grawitacyjne w naszym kierunku. Przykładem może być [GW170817](#), sygnał który towarzyszył krótkiemu GRB z pobliskiej galaktyki.

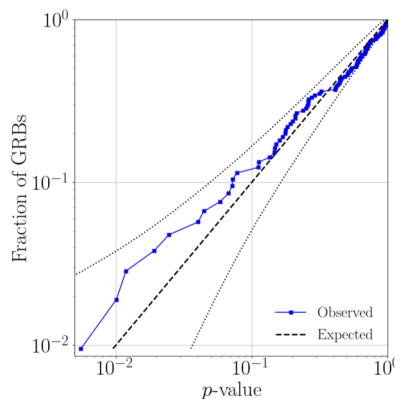
Astronomowie fal grawitacyjnych monitorują GRB wykrywanej przez satelity [Fermi](#) i [obserwatorium Neila Gehrels Swift](#), dwa teleskopy kosmiczne czułe w paśmie promieniowania gamma. Dla każdego nowo zgłoszonego GRB możemy sprawdzić, czy dane [LIGO](#) i [Virgo](#) zawierają fale grawitacyjne pochodzące z tego samego kierunku i w tym samym czasie. Postępując w ten sposób możemy wykryć słabe fale grawitacyjne, które w przeciwnym razie byłyby pominięte.

### JAK POLUJEMY NA FALE GRAWITACYJNE

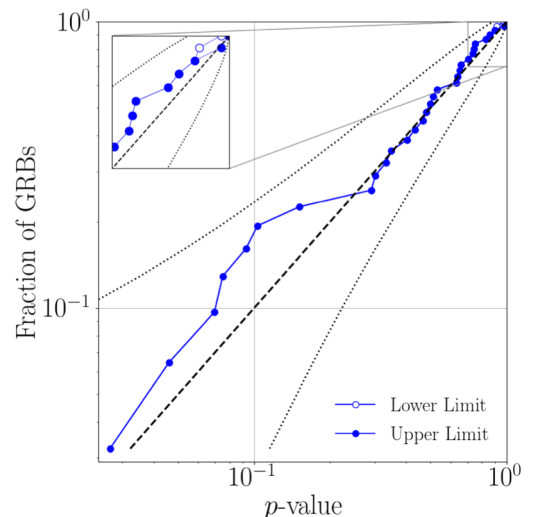
Używamy dwóch technik do znajdowania takich sygnałów. Pierwsza z metod nie zakłada określonego kształtu fali grawitacyjnej, a tylko, by sygnał pojawiał się na konsekwentnie w co najmniej dwóch detektorach LIGO i Virgo. Metoda umożliwia wykrycie fal powstałych w wyniku zderzeń w układzie podwójnym lub zapadających się gwiazd. Nazywamy to „ogólną” metodą wyszukiwania i używamy jej zawsze, gdy pojawia się GRB i nasze obserwatoria grawitacyjne zbierają dane. Druga technika poszukuje tylko sygnałów o określonym kształcie, zwanym [ćwierkiem](#). Ten typ sygnału jest generowany, gdy pary obiektów zwartych krążą w układzie podwójnym; w szczególności dotyczy to układów podwójnych gwiazd neutronowych i układów mieszanych czarnej dziury i gwiazdy neutronowej. Z tego powodu, używamy poszukiwania opartego o model tylko wtedy, gdy uważamy, że GRB może być krótki, tzn. wytworzony przez takie zderzenie. Zdecydowaliśmy się na użycie tego rozwiązania, gdy GRB trwało 4 sekundy lub krócej, ponieważ powinno to zapobiec pominięciu krótkiego GRB przez pomyłkę.

### WYNIKI NASZYCH POSZUKIWAŃ W ZAKRESIE FAL GRAWITACYJNYCH

W okresie od kwietnia do września 2019 r. LIGO i Virgo zbierały dane w kampanii obserwacyjnej O3a. W tym czasie wykorzystaliśmy ogólną metodę poszukiwań dla zbioru 105 GRB, a metodę „modelową” dla 32 krótkich GRB. Nie znaleźliśmy żadnych związanych z nimi sygnałów fal grawitacyjnych (zob. [Rys. 1](#) i [2](#)). Nie jest to zaskoczeniem z dwóch powodów: po pierwsze, jako że GRB wysyłają promieniowanie gamma w wąskich dżetach, duża ich część pozostanie niewykryta (dżet nie będzie skierowany w naszą stronę). Po drugie, ponieważ większość GRB znajduje się bardzo daleko, rzadko zdarza się, aby pochodziły one z odległości, przy której nasze detektory są dostatecznie czułe.



Rysunek 2: Jak Rys. 1, ale w przypadku zastosowania metody „ogólnej” dla około 105 GRB.



Rysunek 1: W metodzie poszukiwania fal grawitacyjnych przy użyciu modelu brany pod uwagę jest najlepszy kandydat dla każdego krótkiego GRB wraz z pomiarem jego wiarygodności statystycznej. Porównujemy to z danymi dla innych przedziałów czasowych, aby oszacować prawdopodobieństwo, że kandydat jest wynikiem szumu, a nie fali grawitacyjnej (wartość  $p$ ). Na wykresie przedstawione są wyniki dla 32 kandydatów (połączone kropki), przy czym oś pozioma daje wartości wartości  $p$ , a oś pionowa pokazuje ułamek kandydatów, z niższą wartością  $p$ . Linia przerywana jest krzywą, jakiej można by się spodziewać po samym szumie detektora i to przypadkowej szansie detekcji (i braku fal grawitacyjnych). Im większa jest wartość  $p$  (dalej w prawo), tym większa jest szansa, że jest to zdarzenie jest szumem, a nie falą. Liniami kropkowymi zaznaczono granice oczekiwanego statystycznego zachowania się szumu w naszych poszukiwaniach. Widzimy, że wszyscy kandydaci (połączone kropki) znajdują się w obrębie linii kropkowanych, co oznacza, że wszystkie są zgodne z tym, czego można oczekiwać od tła szumu detektora.



Odwiedź nasze strony internetowe:  
<http://www.ligo.org>  
<http://www.virgo-gw.eu>



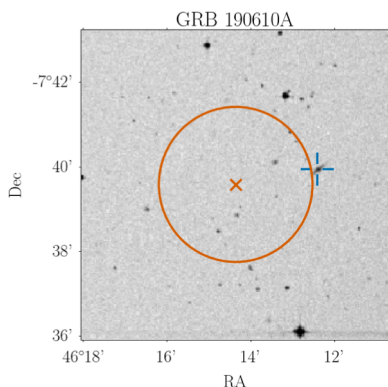
Jeśli nie znajdziemy sygnału fali grawitacyjnej odpowiadającego GRB, szacujemy maksymalną odległość, dla jakiej nasze obserwatoria wykryłyby różne rodzaje sygnałów, poprzez dodanie sztucznych sygnałów fal do naszych danych i sprawdzenie, które z nich znajdujemy naszymi metodami. Dzięki temu możemy powiedzieć, że dla każdego GRB w naszym zbiorze, jeśli towarzyszyła mu fala grawitacyjna (a my jej nie wykryliśmy), to źródło znajduje się nie bliżej niż pewna odległość. Wyniki ze wszystkich naszych poszukiwań dostarczają rozkładu „odległości wykluczenia” (zob. Rys. 3 i 4).

## PRZYPADK GRB 190610A

Nasze szacunki mogą również nakładać ograniczenia na GRB bez znanych odległości (w przypadku dużego odsetka GRB nie jest ona dobrze znana). Jednym z ciekawych przypadków jest GRB 190610A, dla którego nasza modelowana metoda mówi nam, że jeśli GRB 190610A został wyprodukowany przez dwie zderzające się gwiazdy neutronowe, to najprawdopodobniej zdarzyło się to w odległości większej niż 63 Mpc (około 200 milionów lat świetlnych). GRB pochodzi z kierunku bardzo bliskiego galaktyce znajdującej się w odległości 165 Mpc (około 600 milionów lat świetlnych) - nasza analiza nie wyklucza, że źródło GRB znajdowało się w tej galaktyce (Rys. 5).

## WIDOKI NA PRZYSZŁOŚĆ

Choć w danych z O3a nie znaleźliśmy fal grawitacyjnych w koincydencji z obserwowanymi GRB (jak np. w sierpniu 2017 roku, [kiedy obserwowaliśmy GW170817](#)), nasze detektory są wciąż udoskonalane. Mając czulsze detektory, będziemy mieli większe szanse na wykrycie większej liczby fal grawitacyjnych związanych z GRB. Połączenie informacji, które otrzymujemy z poszczególnych fal grawitacyjnych i GRB może dać nam cenny nowy wgląd w mechanizmy i właściwości tych tajemniczych błysków energetycznego promieniowania.



Rysunek 5: Okrąg na wykresie oznacza zakres błędów pozycji dla GRB190610A, błysku który mógł wystąpić w galaktyce oddalony od nas o około 165 Mpc (około 600 milionów lat świetlnych stąd), oznaczonej niebieskim krzyżem. Odległość ta jest większa niż „odległość wykluczenia” (Rys. 3 i 4) dla tego GRB, więc być może blysk powstał w tej galaktyce, ale znajduje się ona zbyt daleko, by nasze detektory wykryły fale grawitacyjne.

## GLOSARIUSZ

**Czarna dziura:** Obszar czasoprzestrzeni spowodowany przez wyjątkowo zwartą masę, gdzie grawitacja jest tak intensywna, że nic nie może się z tego obszaru wydostać, w tym światło.

**Ćwierk:** Ćwierk to nazwa charakterystycznego kształtu sygnału fali grawitacyjnej, emitowanego przez parę zwartych obiektów, takich jak czarne dziury lub gwiazdy neutronowe, znajdujących się w układzie podwójnym. W sygnale ćwierku częstotliwość i amplituda zwiększają się z czasem.

**Zapadnięcie się rdzenia masywnej gwiazdy:** Masywne gwiazdy produkują żelazo poprzez syntezę jądrową. Wyprodukowane żelazo opada na środek gwiazdy i tworzy jej rdzeń. Gdy jest już wystarczająco masywny, ten żelazny rdzeń zapada się pod własnym ciężarem i ciśnieniem zewnętrznym, co prowadzi do rozpadu całej gwiazdy.

**Promieniowanie elektromagnetyczne (EM):** Promieniowanie potocznie nazywane światłem, choć tylko niewielka jego część może być zauważona przez ludzkie oko. W celu zwiększenia energii, rodzaje światła EM obejmują: radio, widzialne (optyczne), UV (ultrafioletowe), promieniowanie rentgenowskie, promieniowanie gamma.

**Promienie gamma:** Promieniowanie elektromagnetyczne o największej energii na widmie elektromagnetycznym.

**Blysk gamma:** Krótkie rozkłady bardzo energicznych fotonów zwanych promieniami gamma. Blyski gamma (GRB) trwają zazwyczaj do kilkudziesięciu sekund.

**LIGO:** Laserowe Interferometryczne Obserwatorium Fal Grawitacyjnych składa się z dwóch interferometrycznych detektorów fal grawitacyjnych o długości 4 km, oddzielonych od siebie około 3000 km, znajdujących się w Livingston, LA i Hanford, WA w Stanach Zjednoczonych.

**Rok świetlny:** Jednostka odległości odpowiadająca odległości, jaką światło pokonuje w ciągu jednego roku. Rok świetlny jest w przybliżeniu równy 9,46 biliona kilometrów.

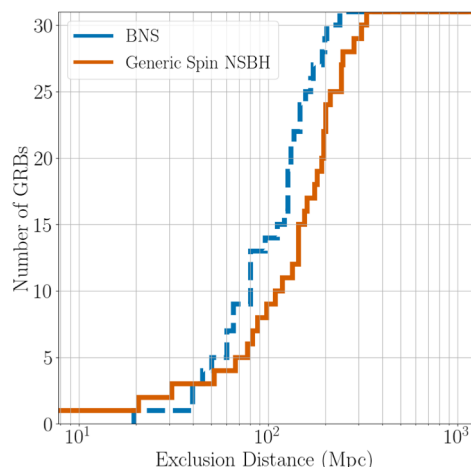
**Megaparsek (Mpc):** Jednostka odległości astronomicznej, równa około 3,26 miliona lat świetlnych.

**Gwiazda neutronowa:** Niezwykle gęsty obiekt, który pozostał po zapadnięciu się masywnej gwiazdy. Typowa gwiazda neutronowa ma masę pół miliona razy większą od masy Ziemi, ale tylko około 30 km średnicy.

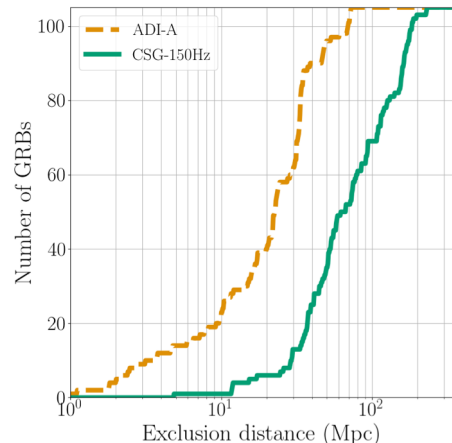
**Wartość p:** Miara istotności statystycznej danego pomiaru. Ogólnie rzecz biorąc wartość p odpowiada na pytanie „jak prawdopodobna jest hipoteza, że dane zawierają tylko szum”. Zdarzenia o niskiej wartości p występują częściej niż rzeczywiste sygnały fal grawitacyjnych.

**Supernowa:** Gwałtowna eksplozja, często obserwowana na niebie jako gwałtownie jaśniejący obiekt, który następnie stopniowo zmniejsza jasność. Supernowa może przyćmić resztę galaktyki, w której się znajduje. Istnieje wiele różnych supernowych. Niektóre z nich pochodzą z zapadnięcia się masywnej gwiazdy, inne ze zderzenia dwóch białych karłów.

**Virgo:** Detektor Virgo to interferometr zlokalizowany w Cascinie, we Włoszech, w pobliżu Pizy.



Rysunek 3: Wykres przedstawia liczbę błysków gamma w funkcji „odległości wykluczenia”, obliczoną przez naszą metodę wykorzystującą model sygnału. Odległość ta, dla każdego wyszukiwania informuje o najmniejszej odległości, przy której GRB nie zostałyby przez nas wykryty (zakładając konkretny model). Odległości te obliczamy poprzez dodanie sygnałów fal grawitacyjnych o różnej sile do danych dotyczących wystąpienia danego błysku gamma. Najbliższa odległość, na której wykrywa się mniej niż 90% tych fałszywych dodanych sygnałów jest definiowana jako „odległość wykluczenia”. Zakładając konkretny rodzaj sygnału fali grawitacyjnej, z układu podwójnego gwiazd neutronowych (BNS - linia przerywana) lub koalescencji gwiazdy neutronowej z czarną dziurą (NSBH - linia ciągła), blysk gamma musiał nastąpić w większej odległości. Odległość jest mierzona w [megaparsekach](#) (Mpc).



Rysunek 4: Jak na Rys. 3, ale dla metody ogólnej metody, która nie zakłada znajomości modelu sygnału. Wykorzystane tu dodane do danych sygnały fal grawitacyjnych są oparte o dwa możliwe scenariusze emisji błysków gamma. Pierwszy model nosi nazwę ADI-A, opisujący promieniowanie fali grawitacyjnej elementu materii orbitującego w dysku akrecyjnym wokół czarnej dziury. Drugi scenariusz, CSG, jest sygnałem periodycznym o amplitudzie zmieniającej się zgodnie z funkcją Gaussa, co jest uproszczonym przybliżeniem krótkotrwałej fali grawitacyjnej. Odległość jest mierzona w [megaparsekach](#) (Mpc).

## WIĘCEJ INFORMACJI:

Odwiedź nasze strony internetowe:

<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Przeczytaj cały artykuł, dostępny online [tutaj](#).