

# GÓRNE GRANICE IZOTROPOWEGO TŁA FAL GRAWITACYJNYCH Z TRZECH PIERWSZYCH KAMPANII OBSERWACYJNYCH ADVANCED LIGO I ADVANCED VIRGO

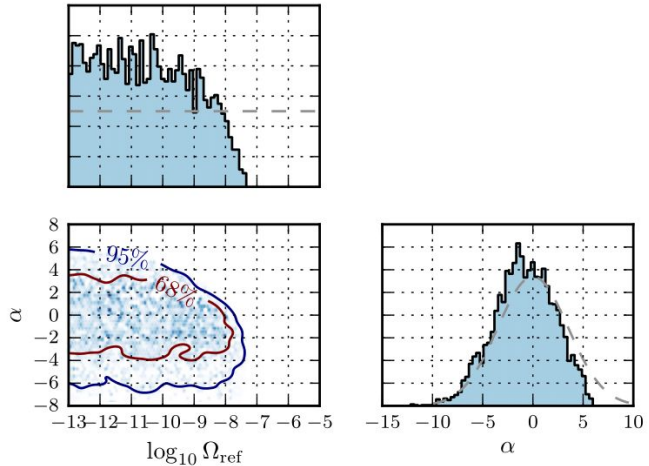
[Mikrofalowe promieniowanie tła \(CMB\)](#) dostarczyło nam informacji na temat pochodzenia Wszechświata, ponieważ jest to najstarsze promieniowanie elektromagnetyczne, jakie możemy mierzyć. Podobnie istnieje [tło fal grawitacyjnych \(GWB\)](#), które jest superpozycją fal grawitacyjnych generowanych przez różne źródła astrofizyczne i kosmologiczne; ze względu na słabe sprzężenie fal grawitacyjnych i materii, może ono sięgać w czasie nawet dalej niż CMB. Przykładami źródeł astrofizycznych są odległe [koalescencje układów podwójnych](#) i [kolapsy supernowych](#), których nie wykrywamy jako indywidualne zjawiska. Obecnie mamy przewidywania co do zakresu możliwych amplitud dla tła pochodzącego od odległych układów podwójnych, ale tło pochodzące od zapadających się gwiazd supernowych ma obecnie nieznaną amplitudę, choć jest raczej pewne, że istnieje. Ponadto istnieje kilka bardziej spekulatywnych źródeł kosmologicznych, takich jak [struny kosmiczne](#), [inflacja](#) i [przejścia fazowe pierwszego rzędu](#). Wykrycie któregośkolwiek z tych źródeł tła fal grawitacyjnych byłoby wielkim przełomem i dostarczyłoby fundamentalnego wglądu w procesy astrofizyczne i/lub kosmologiczne.

Przeanalizowaliśmy dane z pierwszych trzech [kampanii obserwacyjnych](#) (O1, O2 i O3) detektorów Advanced LIGO i Advanced Virgo. Nie byliśmy w stanie stwierdzić detekcji, choć -- ze względu na włączenie najnowszych danych z O3 - położiliśmy górne ograniczenia na [emisję GWB](#) bardziej rygorystyczne niż te, które były publikowane wcześniej (zobacz Ry. 1). Poprawiliśmy czułość naszych poszukiwań poprzez zastosowanie procedury usuwania szumu.

W trakcie analizy upewniliśmy się, że - zgodnie z naszą najlepszą wiedzą - nie wykrywamy skorelowanego sygnału pochodzącego z lokalnego szumu środowiskowego, którego źródła mogą być instrumentalne, geologiczne lub związane z działalnością człowieka. Ponadto złagodiliśmy wpływ głośniejszych [gliczy](#) za pomocą techniki zwanej brankowaniem (ang. *gating*), zastosowanej po raz pierwszy w poszukiwaniu tła fal grawitacyjnych, ale będącej standardową techniką w poszukiwaniach sygnałów z układów podwójnych. Polega ona na wyzerowaniu każdego glicza w [dziedzicznie czasowej](#). Jest to również pierwszy przypadek, kiedy w poszukiwaniu GWB uwzględniliśmy dane z [interferometru](#) Virgo, oprócz dwóch instrumentów LIGO. Dane z interferometrów zostały [wzajemnie skorelowane](#), a następnie użyte, poprzez [wnioskowanie bayesowskie](#), do wyznaczenia górnej granicy amplitudy GWB na 95% [poziomie wiarygodności](#). Korelacja danych pozwoliła usunąć z analizy pozostały szum środowiskowy, zakładając, że jest on nieskorelowany pomiędzy interferometrami. Detektory o wzajemnie równoległych ramionach zlokalizowane w tym samym miejscu są najbardziej czułe na GWB, ale także na lokalne źródła szumu. Dlatego też czułość na GWB jest zdominowana przez parę detektorów LIGO, które są najbliższe bycia współosiowymi i współlokalizowanymi, choć ich czułość wciąż jest znacznie mniejsza od maksymalnie możliwej. Wkład detektora Virgo do czułości wynosi tylko kilka procent, ze względu na jego odległość i orientację w porównaniu z detektorami LIGO. Dzięki nieustannym wysiłkom wszystkich naukowców ulepszających interferometry, aktualna górna granica jest około 5 razy lepsza w porównaniu z poprzednimi wynikami. Podczas gdy część tej poprawy wynika po prostu z przeanalizowania większej ilości danych, większość tego wzrostu wynika ze zwiększenia czułości. Gdyby interferometry pracowały z taką samą czułością jak w O2, dodatkowe dane doprowadziłyby do poprawy górnej granicy tylko o czynnik mniejszy niż 2.

Poszukiwaliśmy również globalnie skorelowanego szumu magnetycznego, znanego jako [rezonanse Schumanna](#), badając pomiary pola magnetycznego za pomocą specjalnych czujników umieszczonych w pobliżu trzech interferometrów. Identyfikacja rezonansów Schumanna jest konieczna, ponieważ mogą one pojawiać się jako efektywne tło i w ten sposób „zanieczyszczać” szukany sygnał. Pola magnetyczne sprzęgają się z krytycznymi częściami interferometru, np. z magnesami na zwierciadłach końcowych, używanymi do sterowania zwierciadłami, a więc i interferometrem. Jeśli to sprzężenie jest wystarczająco silne, może spowodować powstanie obserwowalnego sygnału, w którym przesunięcie zwierciadła nie jest spowodowane przechodzącą falą grawitacyjną, ale polem magnetycznym.

Rezonanse Schumanna mogą powodować znaczące korelacje, w konsekwencji prowadząc do błędnego twierdzenia o wykryciu tła fal grawitacyjnych. Aby skonstruować prognozę możliwego zanieczyszczenia magnetycznego (patrz Rys. 2) potrzebujemy dwóch kluczowych składników. Pierwszym z nich są dokładne pomiary pola magnetycznego na miejscu za pomocą dedykowanych czujników. Drugim jest pomiar, jak te pola magnetyczne sprzęgają się z interferometrami, w wyniku czego mogą wejść jako "fałszywy sygnał fal grawitacyjnych". Aby określić to sprzężenie, przy pomocy cewki wytwarzamy silne pola magnetyczne w pobliżu interferometru i obserwujemy ich wpływ na wnioskowanie o fałszywym sygnale fal grawitacyjnych, jednocześnie dokładnie mierząc pola magnetyczne. Testujemy zanieczyszczenie magnetyczne na dwa sposoby. Po pierwsze, szukamy zanieczyszczenia w poszczególnych [przedziałach częstotliwości](#). Po drugie, szukamy możliwości, że suma magnetycznych zanieczyszczeń w różnych przedziałach częstotliwości kumuluje się dając wynik, który jest powyżej naszej czułości.



**Rysunek 1:** Wykres przedstawiający rozkłady prawdopodobieństwa dla amplitudy tła fal grawitacyjnych  $\Omega_{ref}$  i indeksu widmowego  $\alpha$  w wyrażeniu  $\Omega_{ref}(f/25 \text{ Hz})^\alpha$ , które jest naszym założeniem o zależności tła fal od częstotliwości  $f$  (obejmującym zależność od częstotliwości szeregu możliwych źródeł). Rozkłady te pokazują, że dane preferują niższe wartości  $\Omega_{ref}$ . Szare przerywane linie reprezentują założenia „a priori” dotyczące tych parametrów. Krzywe 68% i 95% ograniczają obszary zawierające te właśnie procenty całkowitego prawdopodobieństwa.

Odwiedź nas w internecie:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

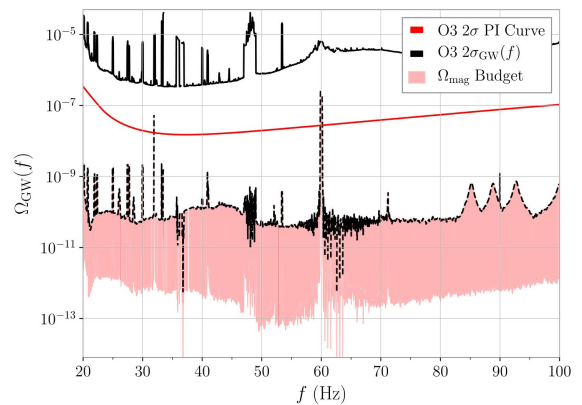


Nasza konkluzja jest taka, że dokonane przez nas oszacowania skorelowanego szumu magnetycznego są znacznie poniżej czułości, którą osiągnęliśmy w O3, zarówno w poszczególnych częstotliwościach, jak i w odniesieniu do sumy dla wielu częstotliwości (patrz Rys. 2). Dodatkowo zaimplementowaliśmy metodologię, opartą o wnioskowanie bayesowskie, do jednoczesnego dopasowania dla GWB i rezonansów Schumanna w danych. Zgodnie z naszymi innymi rezultatami, nie znaleźliśmy ani sygnału z GWB, ani z rezonansów Schumanna. Oczekujemy, że nowo opracowany system okaże się niezwykle użyteczny w przyszłych poszukiwaniach, gdy czułość detektorów wzrośnie jeszcze bardziej.

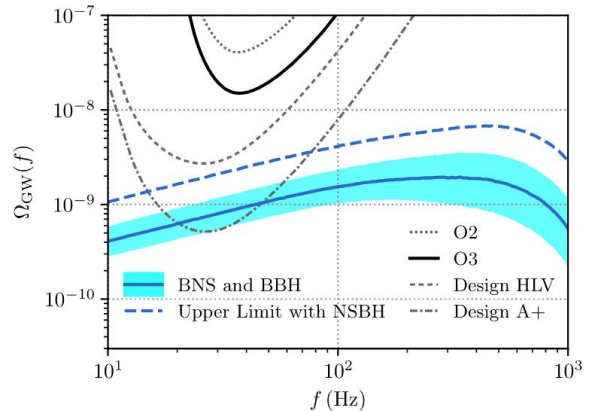
Wyznaczyliśmy również górne granice na skalarnie lub wektorowo spolaryzowane tło fal grawitacyjnych. Są to polaryzacje „zabronione” w ogólnej teorii względności (OTW), która przewiduje jedynie tensorowo spolaryzowane fale. Zaobserwowanie alternatywnych polaryzacji wskazywałoby, że OTW Einsteina wymaga modyfikacji. Poszukiwania polaryzacji poza OTW zyskały na dodaniu danych z Virgo, ponieważ dodanie większej liczby detektorów do sieci może pomóc w rozróżnieniu różnych polaryzacji. Nie znaleźliśmy dowodów na istnienie „zakazanych” polaryzacji. Inne obserwacje, m.in. sygnału z układu podwójnego gwiazd neutronowych GW170817, również potwierdzają czysto tensorowe polaryzacje fal grawitacyjnych.

Używamy również modelu do przewidywania GWB wytwarzanego przez populację ciasnych układów podwójnych (patrz Rys. 3), które mogą być pierwszym źródłem GWB, jakie LIGO i Virgo mogą wykryć, co omówiono tutaj. Do modelu włączyliśmy najnowsze obserwacje z katalogu LIGO-Virgo GWTC-2. Stwierdziliśmy, że GWB może być potencjalnie wykryte przez unowocześnioną wersję obecnych detektorów, znaną jako LIGO A+ i Advanced Virgo Plus. Zastosowaliśmy również wspólną analizę dla GWB i obserwacji sygnałów z poszczególnych układów podwójnych. Ponieważ GWB jest czuły na sygnały emitowane przez układy podwójne w większych odległościach niż indywidualnie wykrywalne układy podwójne, możliwe jest, że pomiary GWB mogą poprawić pomiary częstości występowania zjawisk łączenia się układów podwójnych czarnych dziur we wczesnym Wszechświecie. Chociaż nie ma to miejsca w przypadku O3, pokazujemy, że GWB może być użyteczny w przyszłych badaniach.

Pomimo faktu, że - jak dotąd - nie byliśmy w stanie wykryć GWB, obecna analiza jest dużym krokiem naprzód w naszej dziedzinie. Wiele cech zostało wprowadzonych do analizy po raz pierwszy, takich jak włączenie danych z trzeciego interferometru, użycie bramkowania do usunięcia zakłóceń, integracja dopasowania do rezonansów Schumanna w spójnej metodologii bayesowskiej, oraz użycie modelu do przewidywania GWB wytwarzanego przez ciasne układy podwójne. Te nowe cechy mogą okazać się krytyczne dla przyszłych poszukiwań, gdy osiągniemy czułość pozwalającą na stwierdzenie detekcji.



Rysunek 2: Wykres pokazuje efekt skorelowanego sygnału magnetycznego, nazwanego  $\Omega_{\text{mag\_Budget}}$  (wyrażony jako gęstość energii  $\Omega_{\text{GWB}}$  fal grawitacyjnych, które byłyby wnioskowane z tego skorelowanego sygnału w interferometrach), zarówno dla poszczególnych przedziałów częstotliwości (czarna przerywana krzywa), jak i zintegrowanego efektu dla wielu przedziałów częstotliwości (czarna przerywana krzywa). Górna część czerwonego pasma (czarna przerywana krzywa) znajduje się poniżej czarnej krzywej czułości, oznaczonej  $2\sigma_{\text{GWB}}(f)$ , wskazując, że zanieczyszczenie magnetyczne jest znacznie poniżej czułości w każdym indywidualnym przedziale częstotliwości. Czerwona krzywa czułości, oznaczona jako  $2\sigma_{\text{PI Curve}}$ , pokazuje czułość poszukiwań skumulowanego szumu magnetycznego w wielu przedziałach częstotliwości. Widzimy, że czerwone pasmo jest znacznie poniżej czerwonej krzywej czułości. Zmierzone oszacowania skorelowanego szumu magnetycznego są znacznie poniżej czułości, jaką osiągamy w O3, zarówno dla poszczególnych częstotliwości, jak i przy uwzględnieniu sumy dla wielu częstotliwości.



Rysunek 3: Wykres porównuje czułość obecnych i przyszłych obserwacji z przewidywaniami dla tła pochodzącego z populacji układów podwójnych, tj. sumy koalescencji układów gwiazd neutronowych (BNS) i podwójnych czarnych dziur (BBH). Niebieska linia jest medianą oszacowania siły GWB z BNS i BBH, podczas gdy jasnoniebieski pasek jest 90% przedziałem niepewności. Ponadto pokazane są czułości odpowiadające drugiej i trzeciej kampanii obserwacyjnej (odpowiednio O2 i O3), jak również czułości odpowiadające temu, co spodziewamy się osiągnąć przy docelowej czułości LIGO i Virgo i oraz ich wersji A+ (dla sieci LIGO-Virgo, HLV). Przerywana niebieska linia reprezentuje górną granicę (dla 95% poziomu wiarygodności) przewidywanego tła układów podwójnych, uzyskaną po uwzględnieniu koalescencji gwiazd neutronowych z czarnymi dziurami (NSBH). Nie ma jeszcze żadnych potwierdzonych detekcji NSBH, więc ich częstość występowania jest bardziej niepewna niż BNS czy BBH.

## DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ

Odwiedź nasze strony internetowe:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu), [gwcenter.icrt.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrt.u-tokyo.ac.jp/en/)

Przeczytaj pracę naukową [tutaj](#).

Dowiedz się więcej o falach grawitacyjnych [tutaj](#).

Przeczytaj o [potrzebie używania wielu detektorów](#).

Przeczytaj, czym są [„zakazane” w ogólnej teorii względności polaryzacje fal](#).

Dowiedz się więcej o [koalescencjach ciasnych układów podwójnych](#).

## GLOSARIUSZ

**Mikrofalowe promieniowanie tła:** Promieniowanie elektromagnetyczne pochodzące z wczesnego etapu istnienia Wszechświata, znane również jako „promieniowanie reliktowe”. Więcej informacji można znaleźć [tutaj](#).

**Kampania obserwacyjna:** Okres, w którym interferometry są w pełni sprawne i zbierają dane do późniejszej analizy. Trzecia kampania obserwacyjna (O3) trwała od 1 kwietnia 2019 r. do 1 października 2019 r., a następnie była kontynuowana od 1 listopada 2019 r. do 27 marca 2020 r.

**Siła tła fal grawitacyjnych:** Gęstość energii fal grawitacyjnych, wyrażona jako ułamek całkowitej gęstości energii we Wszechświecie istniejącej w postaci fal grawitacyjnych.

**Glicz:** Krótkotrwałe zakłócenie w danych dotyczących fal grawitacyjnych, analogiczne do szumu w głośniku, które może być pomyłone z prawdziwym sygnałem fal grawitacyjnych lub go maskować. Przeczytaj więcej o zakłóceniach [tutaj](#).

**Domena czasowa:** Analiza funkcji matematycznych lub sygnałów fizycznych w odniesieniu do czasu.

**Korelacja wzajemna:** Miara podobieństwa dwóch (lub więcej) zestawów danych. Jeśli dane z dwóch oddzielnych detektorów fal grawitacyjnych są skorelowane, może to wskazywać na obecność tła fal grawitacyjnych (pod warunkiem, że wykluczone są inne możliwe źródła korelacji).

**Poziom wiarygodności:** Przedział, w którym niepewna wartość parametru mieści się z określonym prawdopodobieństwem.

**Wnioskowanie bayesowskie:** Metoda, która pozwala wykorzystać pewną wiedzę lub przekonanie, które już posiadamy (powszechnie znane jako prior) do obliczenia prawdopodobieństwa powiązanego zdarzenia przy użyciu pewnych danych. Więcej informacji można znaleźć [tutaj](#).

**Rezonanse Schumanna:** Fale radiowe o ekstremalnie niskiej częstotliwości generowane przez pioruny, pomiędzy powierzchnią Ziemi a jonosferą, warstwą atmosfery zaczynającą się na wysokości około 60 kilometrów. Przeczytaj więcej [tutaj](#).

**Przedziały częstotliwości:** Odstęp między próbkami podczas analizowania funkcji matematycznych lub sygnałów fizycznych w odniesieniu do częstotliwości, a nie czasu.

**Polaryzacja fal grawitacyjnych:** Geometryczny kształt rozciągania i ściskania czasoprzestrzeni spowodowany przez fale grawitacyjną podczas jej ruchu. Diagram tego zjawiska można znaleźć na rysunku 5 w [ym linku](#).

**Krzywa czułości:** Czułość detektora jest zdeterminowana przez dużą liczbę źródeł szumu odpowiadających wielu różnym zjawiskom fizycznym (np. szum sejsmiczny lub elektroniczny). Suma wszystkich tych źródeł szumu określa czułość detektora przy każdej częstotliwości, dając jego krzywą czułości.