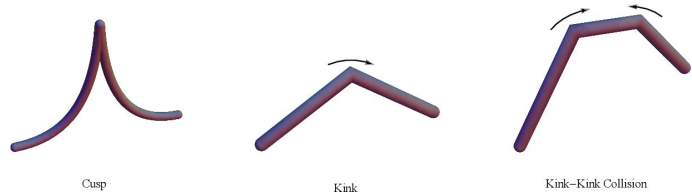


OGRANICZENIA DOTYCZĄCE STRUN KOSMICZNYCH W OPARCIU O DANE Z TRZECIEJ KAMPANII OBSERWACYJNEJ DETEKTORÓW ADVANCED LIGO-VIRGO

WSTĘP

Rozszerzający się Wszechświat nieustannie stygnie. Proces ten może prowadzić do powstania [strun kosmicznych](#): jednowymiarowych [defektów topologicznych](#), których energia jest skoncentrowana wzdłuż linii. Struny kosmiczne podobne są do pęknięć, które mogą pojawić się w lodzie w czasie zamarzania wody. We Wszechświecie struny kosmiczne są generalnie zakrzywione, ewoluują i w wyniku oddziaływania między sobą mogą tworzyć zamknięte pętle.



Rysunek 1. Wizualizacja szpiców (ang. cusps), załamań (ang. kinks) oraz zderzeń załamań strun kosmicznych [Źródło obrazu: [Lona, Hyde and Vachaspati](#)]

Struny kosmiczne istnieją w wielu [teoriach pola](#) motywowanych fizyką cząstek elementarnych i istnieje również kilka obserwacyjnych przewidywań na ich temat. Oznacza to, że struny kosmiczne mogłyby dostarczyć narzędzi do badania fizyki wykraczającej poza [model standardowy](#), w skalach energii znacznie większych niż te osiągnane przez akceleratory, takie jak [Wielki Zderzacz Hadronów](#) w CERN. W szczególności emisja fal grawitacyjnych przez kosmiczne struny jest jedną z ich najbardziej obiecujących sygnatur obserwacyjnych, której możemy szukać za pomocą naziemnych detektorów fal grawitacyjnych [LIGO](#), [Virgo](#) i [KAGRA](#).

FALE GRAWITACYJNE Z ZAPĘTLONYCH STRUN KOSMICZNYCH

Pętle strun kosmicznych oscylują i wypromieniowują energię, głównie w postaci fal grawitacyjnych, co powoduje ich kurczenie się i ostatecznie zanik. Widmo fal grawitacyjnych oscylującej pętli jest zdominowane przez własności struny zwane szpicami (ang. cusps) i załamaniem (ang. kinks). Te pierwsze to punkty na strunie, które przez chwilę poruszają się z prędkością światła; te drugie to nieciągłości, które pojawiają się parami w wyniku wymiany partnerów w strunach. Duża ilość impulsów fal grawitacyjnych może się sumować, tworząc stochastyczne (tj. losowo określone) tło fal grawitacyjnych. Czasami impulsy o dużej amplitudzie mogą pojawić się ponad stochastycznym tłem - podobnie jak pojedynczy głośny krzyk jest słyszany ponad odgłosem hałaśliwego tłumu - i w zasadzie można by takie impulsy wykrywać indywidualnie.

W danych zebranych przez detektory Advanced LIGO i Advanced Virgo podczas ich trzeciej kampanii obserwacyjnej, nazwanej O3, poszukiwaliśmy sygnałów fal grawitacyjnych wytwarzanych przez szpice, załamania i zderzenia załamań strun kosmicznych (patrz Rys. 1). Rozważaliśmy dwa modele analityczne (nazwane A i B) dotyczące rozkładu pętli strun kosmicznych, oparte na wynikach dwóch różnych symulacji komputerowych tego rozkładu. Ponadto opracowaliśmy trzeci model (nazwany C), który miał być bardziej „agnostyczny” poprzez interpolację między modelami A i B; w naszych poszukiwaniach rozważaliśmy dwa warianty (C-1 i C-2) tego modelu.

ANALIZA I WYNIKI

W danych zebranych przez detektory LIGO i Virgo szukaliśmy, w ramach każdego z czterech wyżej wymienionych modeli, zarówno impulsów fal grawitacyjnych z pojedynczych strun kosmicznych, jak i stochastycznego tła złożonego z bardzo wielu sygnałów wytwarzanych przez kosmiczne struny. Szukając impulsów fal grawitacyjnych, najpierw zidentyfikowano kandydatów, którzy pasowali do teoretycznie przewidywanego kształtu impulsu, a następnie zastosowano dalsze metody analizy w celu obliczenia prawdopodobieństwa, że kandydat był rzeczywistym sygnałem, a nie szumem w detektorze. Poszukiwanie stochastycznego tła przeprowadzono, obliczając [gęstość energii](#) sygnałów fal grawitacyjnych ze strun kosmicznych przewidzianą w każdym z rozważanych przez nas modeli; przewidywania te porównano następnie z wynikami obserwacji, wykorzystując brak detekcji sygnału do ustalenia górnych ograniczeń na gęstość energii tła.

Odwiedź nasze strony:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ

Odwiedź nasze strony:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

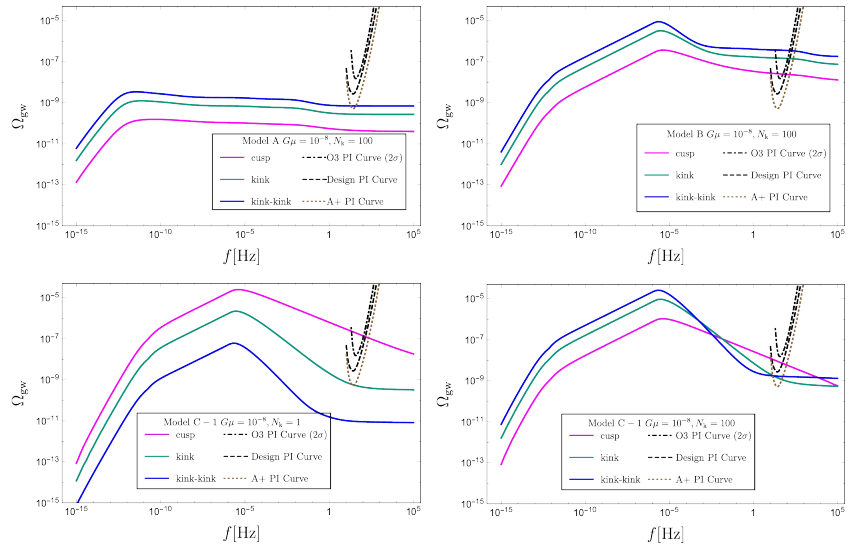
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Przeczytaj [tutaj](#) publicznie dostępny artykuł naukowy.

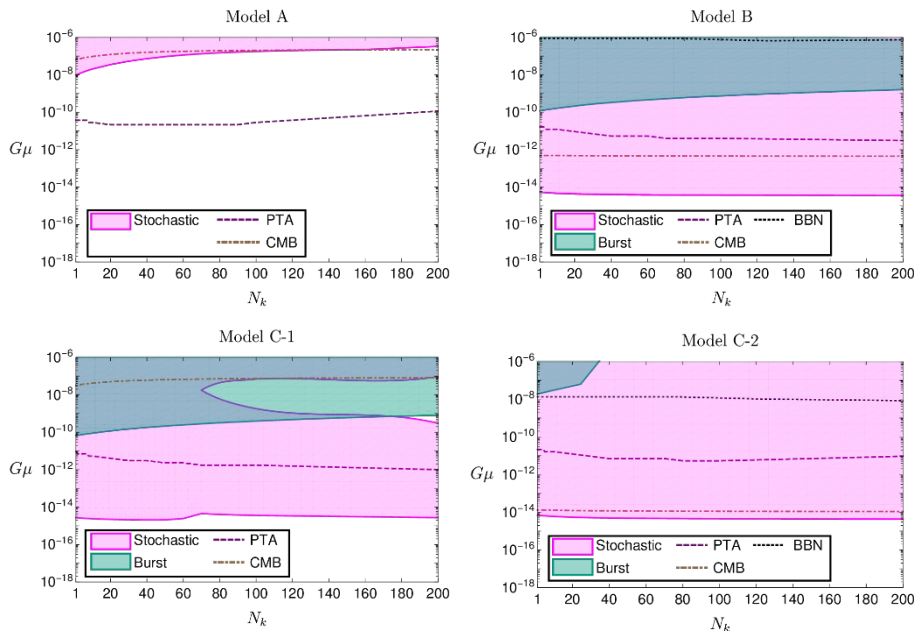
Więcej informacji o falach grawitacyjnych znajdziesz [tutaj](#).

Chociaż nie wykryliśmy żadnych sygnałów fal grawitacyjnych wytwarzanych przez struny kosmiczne, fakt braku detekcji takich sygnałów pozwolił ograniczyć, dla każdego z rozważanych modeli rozkładu pętli, możliwe wartości dwóch parametrów opisujących struny kosmiczne — naprężenia struny i liczby załamań na pętli. Ograniczenia te przedstawiono na Rys. 2 i 3. W szczególności stwierdziliśmy, że najsilniejsze ograniczenia na naprężenie struny pochodzą z analizy poszukiwań stochastycznego tła fal grawitacyjnych.

Porównaliśmy również nasze wyniki z ograniczeniami uzyskanymi w oparciu o chronometraż układów pulsarów (ang. [pulsar timing array](#)), a także pośrednimi ograniczeniami z [nukleosyntezy w Wielkim Wybuchu](#) i wynikającymi z obserwacji [kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła](#). Kolejna [kampania obserwacyjna, O4](#), da nową możliwość poszukiwania sygnałów fal grawitacyjnych z kosmicznych strun, ponieważ w trakcie niej detektory LIGO i Virgo będą jeszcze bardziej czułe, a detektor KAGRA dołączy do obserwacji.



Rys. 2: Przewidywane widma gęstości energii fal grawitacyjnych dla różnych modeli funkcji rozkładu pętli (zwanych A, B, C-1) i różnych liczb załamań na oscylację pętli, N_k . Naprężenie struny $G\mu$ ma ustaloną wartość 10^{-8} (G oznacza stałą Newtona, μ to liniowa gęstość masy struny). Na górze po lewej: model A, $N_k = 100$. Na górze po prawej: model B, $N_k = 100$. Na dole po lewej: model C-1, $N_k = 1$. Na dole po prawej: model C-1, $N_k = 100$. Pokazujemy widma gęstości energii dla trzech różnych składowych oraz scałkowane krzywe czułości (wprowadzone w artykule [Thrane'a i Romano](#)) dla stochastycznego wyszukiwania izotropowego w kampanii O3, a także spodziewany przebieg tych krzywych dla sieci detektorów LIGO Hanford, LIGO Livingston i Virgo po osiągnięciu ich docelowej czułości oraz dla detektorów [Advanced LIGO+](#) (A+).



Rys. 3: Kontury wykluczenia, dla 95% poziomu ufności, w przestrzeni $(N_k, G\mu)$ parametrów strun kosmicznych, ustalone na podstawie poszukiwań w danych Advanced LIGO-Virgo stochastycznego tła (różowy), impulsów (jasnozielony) i obu wyszukiwań łącznie (ciemnozielony). Kontury ograniczają obszary w przestrzeni parametrów, co do których mamy 95% pewność, że nie znaleziono w nich prawdziwych parametrów. Rozważane są cztery modele opisujące rozkład pętli strun kosmicznych: model A (na górze po lewej), model B (na górze po prawej), model C-1 (na dole po lewej) i model C-2 (na dole po prawej). Należy zauważyć, że wyniki wyszukiwania stochastycznego łączą dane z kampanii obserwacyjnych O1, O2 i O3, podczas gdy wyszukiwanie impulsów obejmuje tylko dane z kampanii O3.