

Detektory fal grawitacyjnych mogą teraz dostrajać się automatycznie

Sieć detektorów fal grawitacyjnych LIGO–Virgo–KAGRA (LVK) zyskała nową metodę poprawy czułości instrumentów: nazywa się ona kalibracją astrofizyczną (ang. astrophysical calibration) i działa podobnie do automatycznego dostrajania się (ang. autotune) stosowanego w muzyce.

Gdy fala grawitacyjna przechodzi przez Ziemię i detektory LIGO, Virgo i KAGRA są gotowe ją zarejestrować, to ich czułość zależy od wielu czynników i może się zdarzyć, że jeden z detektorów nie będzie w pełni sprawny w tym momencie. W takich sytuacjach kluczowe staje się odpowiednie przetworzenie zebranych danych tak, aby poprawić ich jakość. Sieć detektorów dysponuje teraz nowym skutecznym narzędziem do osiągnięcia tego celu: kalibracją astrofizyczną.

Rozchodzące się fale grawitacyjne deformują czasoprzestrzeń, rozciągając ją i ściskając. Efekt ten powoduje zmianę długości ramion detektora o około 10^{-19} m — to znacznie mniej niż średnica protonu! Aby wykrywać tak niewielkie zmiany, detektory muszą być bardzo precyzyjnie kalibrowane w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem układów sprzężenia zwrotnego oraz dokładnych modeli opisujących reakcję detektora na przechodzącą falę grawitacyjną. Należy również uwzględnić wpływ samych układów sterowania. Jeśli kalibracja nie jest optymalna, „odczyt” sygnału, a tym samym interpretacja zjawiska kosmicznego, które go wywołało, mogą zostać zaburzone.

Jednak jeśli zarejestrowany sygnał fali grawitacyjnej jest wystarczająco silny — to znaczy wyraźnie dominuje nad szumem tła — porównanie go z przewidywaniami ogólnej teorii względności (wraz z porównaniem sygnałów obserwowanych przez inne detektory) może zostać wykorzystane do późniejszej re-kalibracji danych ze „źle dostrojonego” detektora. Modele teoretyczne są w istocie jak zapis nutowy, który opisuje sygnał. W połączeniu z danymi z dobrze „nastrojonych” detektorów pozwalają one oczyścić dane z gorzej skalibrowanego detektora z niepożądanych efektów i dzięki temu poprawnie odtworzyć sygnał. Proces ten przypomina działanie programów do produkcji muzycznej, takich jak auto-tune, które potrafią skorygować fałszujący głos wokalisty tak, aby odpowiadał właściwym dźwiękom melodii.

Fale grawitacyjne są zmarszczkami czasoprzestrzeni. W chwili, gdy docierają do Ziemi — miliony lat po zdarzeniach, które je wytworzyły — są niezwykle słabe — powiedział Christopher Berry, badacz z Institute for Gravitational Research na University of Glasgow. — Nie są czymś, co możemy bezpośrednio usłyszeć, ale możemy tak przekształcić sygnały fal grawitacyjnych zarejestrowane przez nasze detektory, zwiększając odpowiednio ich częstotliwość, aby móc ich słuchać. Każdy sygnał ma swój charakterystyczny „świergot” zwany też “ćwierkiem”. Każdy taki świergot zawiera ogromną ilość informacji, które możemy analizować, aby dowiedzieć się więcej o źródle sygnału — o jego masie, rotacji, odległości i położeniu na sferze niebieskiej. W szczególności w przypadku łączenia się dwóch czarnych dziur technika kalibracji astrofizycznej działa dlatego, że charakterystyczny świergot takiego sygnału jest opisywany z niezwykłą precyzją przez ogólną teorię względności Einsteina.

W artykule przyjętym do publikacji w [Physical Review Letters](#) badacze z konsorcjum LIGO–Virgo–KAGRA pokazują, jak technika ta została zastosowana do dwóch szczególnie silnych i interesujących sygnałów: GW240925 i GW250207. Jak zawsze, nazwy sygnałów wskazują daty detekcji — odpowiednio wrzesień 2024 roku i luty 2025 roku. W chwili dotarcia obu tych sygnałów do Ziemi detektor LIGO Hanford (w stanie Waszyngton w USA) nie działał w optymalnych warunkach, co znacznie utrudniło interpretację zebranych przez niego danych.

Porównując przewidywane sygnały z obserwowanymi, badacze byli w stanie dokładnie określić, w jaki sposób detektor LIGO Hanford zniekształcał dane podczas wspólnych obserwacji z detektorem LIGO Livingston w Luizjanie oraz detektorem Virgo we Włoszech. W przypadku sygnału GW240925 metoda ta potwierdziła znane błędy kalibracji zmierzone bezpośrednio na miejscu. Natomiast dla GW250207 konieczne było zastosowanie kalibracji astrofizycznej, ponieważ nie były dostępne wiarygodne pomiary kalibracji wykonane na miejscu.

Wykorzystując skorygowaną kalibrację detektora LIGO Hanford, badacze ustalili, że sygnał GW240925 został wygenerowany przez dwie czarne dziury o masach 9 i 7 mas Słońca, znajdujące się w odległości około 350 megaparseków od Ziemi. Z kolei sygnał GW250207 pochodził od dwóch czarnych dziur o masach 35 i 30 mas Słońca, oddalonych od Ziemi o około 200 megaparseków. Bez właściwego uwzględnienia niepewności kalibracji oszacowania tych mas mogłyby prowadzić do nieprawidłowych wartości.

Elisa Maggio, badaczka z włoskiego Narodowego Instytutu Fizyki Jądrowej oraz była post doktorantka i stypendystka programu Marie Curie w Instytucie Fizyki Grawitacyjnej Maxa Plancka (Albert Einstein Institute) w Poczdamie, powiedziała: *Odkrycia te pokazują, że przez dekadę pracy od czasu pierwszej detekcji rozwinęliśmy wszechstronne zrozumienie całego procesu analizy danych — począwszy od samych sygnałów po zachowanie detektorów. W rzadkich przypadkach, gdy coś pójdzie nie tak z jednym z detektorów, dysponujemy teraz solidnymi metodami, które pozwalają wykorzystać dane z pozostałych detektorów i ostatecznie uzyskać wyniki wysokiej jakości. Jest to kluczowe do tego, aby móc zidentyfikować pozorne odstępstwa zarejestrowanego sygnału od ogólnej teorii względności wynikające ze zniekształcenia sygnału przez któryś z detektorów*

Benoît Revenu z laboratorium Subatech w Nantes powiedział: *To niezwykle, że te imponujące kosmiczne zdarzenia mogą być nie tylko mierzone przez nasze instrumenty, ale także wykorzystywane do weryfikacji samych pomiarów. Fakt, że z powodzeniem zastosowaliśmy kalibrację astrofizyczną, pokazuje, że detektory fal grawitacyjnych osiągnęły już swój wiek dojrzały i że przechodzimy od ery pierwszych odkryć do ery precyzyjnej astronomii fal grawitacyjnych. Katalog detekcji fal grawitacyjnych powiększa się coraz szybciej i już za kilka tygodni opublikujemy kolejny jego rozdział z nowymi obserwacjami, które jeszcze bardziej pogłębią i poszerzą nasze rozumienie Wszechświata oraz jego najbardziej gwałtownych zjawisk.*