

Pierwsza bezpośrednia detekcja fal grawitacyjnych

Czternastego września 2015 roku dwa detektory LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*) w Stanach Zjednoczonych (L1 w Livingston w stanie Luizjana i H1 w Hanford w stanie Waszyngton) zarejestrowały po raz pierwszy w historii fale grawitacyjne, czyli zaburzenia czasoprzestrzeni przewidziane przez Einsteina w 1916 roku. Fale powstały w wyniku zapadnięcia się układu podwójnego gwiazdowych czarnych dziur i powstania jednej, masywniejszej i szybko rotującej czarnej dziury. Oznacza to potwierdzenie przewidywań ogólnej teorii względności oraz stanowi bezpośrednią obserwację czarnych dziur i układów podwójnych czarnych dziur. Co najważniejsze, a podniosły ton jest tu akurat na miejscu, obserwacja ta otwiera zupełnie nowe okno obserwacyjne na Wszechświat. Praca opisująca odkrycie została przyjęta do druku przez *Physical Review Letters* [1] jeszcze przed publicznym ogłoszeniem odkrycia 11 lutego 2016 roku.

Odkrycie raportują wspólnie amerykański zespół LIGO i europejski Virgo, które od 2007 roku współdzielą się danymi i wspólnie je analizują. Pechowo, ale zgodnie z planem rozbudowy i poprawiania czułości, detektor Virgo, położony koło Pizy we Włoszech, nie uczestniczył w obserwacjach. Dołączy w połowie roku, tworząc z instrumentami LIGO trójkę najczulszych detektorów fal grawitacyjnych i zapewniając niezbędną w tej dziedzinie obserwacyjnej możliwość triangulacji źródeł na niebie (o czym za chwilę). Duży wkład pracy włożyli natomiast analitycy danych z projektu Virgo, w tym Polacy z grupy Virgo-POLGRAW, wśród nich niżej podpisany. Sygnał oznaczony GW150914 i zarejestrowany na początku kampanii obserwacyjnej O1 (w zasadzie jeszcze podczas rozruchu nazwanego ER8 – *Engineering Run 8*) jest na tyle silny – stosunek sygnał-szum równy 24 – i widoczny w obu detektorach naraz (z odpowiednim przesunięciem czasowym wynoszącym 7 ms), że od początku było wiadomo, iż coś jest na rzeczy. Oszacowanie prawdopodobieństwa fałszywego alarmu odpowiada wystąpieniu sygnału o podobnej istotności raz na 200 tys. lat, co jest równoważne poziomowi istotności większemu od $5,1\sigma$.

Parametry układu zostały obliczone przez dopasowanie do danych najlepszego modelu przy użyciu metod filtru dopasowanego. Model-filtr składa się z dwóch części: analitycznego, postnewtonowskiego opisu relatywistycznego układu podwójnego oraz numerycznych wyników symulacji zderzenia się czarnych dziur. Po korelacji z danymi najlepiej dopasowany model to układ podwójny czarnych dziur o masach 29 i 36 mas Słońca, który pojawił się w paśmie czułości detektora przy częstotliwości około 30 Hz. Zaobserwowano 8 orbit układu podwójnego (sygnał o rosnącej częstotliwości i amplitudzie zwany „ćwierkiem”), po którym przy częstotliwości 150 Hz nastąpiło połączenie dwóch czarnych dziur w jedną (ang. *merger*, zlanie się układu) i końcowy *ringdown* (wypromieniowanie niesymetryczności horyzontu

i powstanie czarnej dziury Kerra). Parametry nowo powstałej czarnej dziury oszacowano na 62 masy Słońca, a moment pędu na 0,67 wartości krytycznej. Zderzenie zaszło w odległości 400 Mpc (1,3 miliarda lat świetlnych), czyli miliard trzysta milionów lat temu, ponieważ fale podróżują z prędkością światła. Orbitowanie, zlewanie się i ringdown trwały w sumie jedynie 0,2 s, a końcowa prędkość orbitalna składników przekraczała połowę prędkości światła. W trakcie całego zjawiska 3 masy Słońca zostały zamienione w energię fal grawitacyjnych. W momencie maksymalnej „jasności” moc wypromieniowywana w falach była równa $3,6 \cdot 10^{49}$ W, co odpowiada około 200 $M_{\odot}c^2/s$ (dla porównania, błyski γ to parę rzędów wielkości mniej: 10^{44} W). W tym momencie GW150914 był wielokrotnie „jaśniejszy” od całego obserwowalnego Wszechświata w emisji elektromagnetycznej (przy założeniu 10^{11} galaktyk, z których każda składa się z 10^{11} gwiazd podobnych do Słońca, które, jak wiadomo, emituje $4 \cdot 10^{26}$ W). Lokalizacja zjawiska na niebie jest obciążona dużym błędem: 600 stopni kwadratowych z wiarygodnością 90%. To z powodu obserwacji tylko przez dwa detektory naraz – uzyskuje się wtedy koło na sferze niebieskiej reprezentujące możliwe położenie obiektu. Dodatkowe uwzględnienie polaryzacji fal pozwala na częściowe ograniczenie prawdopodobnego obszaru, ale dopiero trzeci detektor (Virgo) da zadowalającą precyzję kilku stopni kwadratowych. Co prawda, nikt nie spodziewał się błysku elektromagnetycznego z tego zdarzenia, ale gdyby takowy został zaobserwowany, byłoby jeszcze ciekawiej.

Oprócz zastanawiania się, ile będzie z tego odkrycia Nagród Nobla (niektórzy mówią nawet o dwóch – za rejestrację fal oraz za dowód na istnienie czarnych dziur) astrofizycy przyzwyczajają się do myśli o zupełnie nowej dziedzinie badań. Możliwości kolejnych przełomów jest mnóstwo: pierwsza obserwacja błysku elektromagnetycznego i grawitacyjnego z tego samego obiektu pozwoliłaby np. na określenie odległości na dwa niezależne sposoby – z jasności obiektu i „jasności” (amplitudy) fali grawitacyjnej. Specjaliści od procesów gwiazdotwórczych i populacji gwiazd zacierają ręce: czarne dziury w sygnale GW150914 są dużo masywniejsze niż te znane z naszej Galaktyki, co oznacza, że obserwując w przyszłości podobne obiekty będzie można nałożyć ograniczenia na różne słabo poznane etapy ewolucji gwiazd. Już teraz wiadomo, że masywne gwiazdy, mogące stworzyć układ GW150914, musiały powstać w regionie o niskiej metaliczności. Pierwsza obserwacja demonstruje także możliwości testowania alternatywnych teorii grawitacji – udało się np. poprawić ograniczenia na masę grawitonu, hipotetycznego bozonu przenoszącego oddziaływanie grawitacyjne, pochodzące z obserwacji relatywistycznych układów z pulsarami.

Michał BEJGER

[1] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, *PRL* **116**, 061102 (2016).