

Pierwsza jednoczesna detekcja fal grawitacyjnych i fotonów

Grawitacja jest jednym z czterech podstawowych oddziaływań znanych fizykom. Mimo że doświadczamy jej w codziennym życiu, jej natura jest najslabiej zbadana zwłaszcza w warunkach odbiegających od ziemskich. Obserwacje Kosmosu pozwalają nam na śledzenie procesów zachodzących w ogromnych, nieosiągalnych na Ziemi polach grawitacyjnych, i w ten sposób testować nasze teorie. Jak do tej pory świetnie sprawdza się ogólna teoria względności Einsteina: opis sposobu, w jaki masy zakrzywiają wokół siebie przestrzeń i zmieniają tempo, w jakim płynie czas. Jeśli masy poruszają się w czasoprzestrzeni z przyspieszeniem, to faliuje ona i drga proporcjonalnie do wielkości mas i szybkości ich ruchu. Zmienne w czasie zachowanie się odległości i przepływu czasu w czasoprzestrzeni, wywołane ruchem mas, nazywamy falami grawitacyjnymi.

Detektory fal grawitacyjnych Advanced LIGO (USA) i Advanced Virgo (projekt europejski, do którego należy także polski zespół Polgraw [1]) zostały zbudowane w celu wykrywania fal grawitacyjnych emitowanych przez odległe, kosmiczne katastrofy. Projekty LIGO i Virgo od lat współpracują, dokonując wspólnie detekcji i analizując dane. Do tej pory zarejestrowaliśmy 4 zjawiska, które polegają na zderzeniu się czarnych dziur o masach kilkadziesiąt mas Słońca każda, i ich połączeniu się w jedną, większą, szybko kręcącą się czarną dziurę. Ostatnie nowości w tej dziedzinie to tegoroczna Nagroda Nobla z Fizyki oraz pierwsza w historii detekcja fal przez sieć trzech detektorów; Advanced Virgo zaczął naukowe obserwacje 1 sierpnia 2017 roku. Dzięki temu po raz pierwszy w historii możliwy był pomiar polaryzacji fal grawitacyjnych (fale grawitacyjne, podobnie jak fale elektromagnetyczne, mają dwie niezależne polaryzacje).

Opisywana dziś kolejna obserwacja fal grawitacyjnych pochodzi z nowego typu źródeł: układu podwójnego gwiazd neutronowych. Gwiazdy neutronowe to najbardziej ekstremalne, najgęstsze obiekty znane nauce – jedna łyżeczka materiału gwiazdy neutronowej waży mniej więcej tyle, co cała obecnie znajdująca się na Ziemi populacja ludzka! Powstają podczas eksplozji gwiazd supernowych, podczas których materia jest zgniatana do gęstości wielokrotnie większych od gęstości jąder atomowych. Takiej materii nie da się w żaden sposób wyprodukować i zbadać na Ziemi.

17 sierpnia 2017 roku globalna sieć trzech detektorów Advanced LIGO i Advanced Virgo zarejestrowała trwający ponad 100 sekund bardzo wyraźny sygnał „ćwierku”, oznaczony symbolem GW170817, wyemitowany przez zapadający się układ podwójny. Długość sygnału, jego zakres częstotliwości oraz zmierzona masa ćwierku $\mathcal{M}_c = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$ (gdzie m_1, m_2 to masy składników), równa $1,188_{-0,002}^{+0,004} M_\odot$ wskazują na układ gwiazd neutronowych. Tracący energię układ zacieśnia się aż do momentu zderzenia, kiedy to gwiazdy łączą się w jeden gorący, niestabilny obiekt. Około

$\Delta t = 1,74 \pm 0,05$ sekund po momencie zarejestrowania zderzenia obserwatoria satelitarne Fermi oraz INTEGRAL zarejestrowały błysk energetycznego promieniowania: krótki błysk gamma, oznaczony GRB 170817a. Podobne zjawiska są znane astronomom od ponad 50 lat: są najjaśniejszymi elektromagnetycznymi kataklizmami, widocznymi z kosmologicznych odległości. Lokalizacja źródła dostarczona przez satelitę Fermi była, niestety, bardzo przybliżona. Na szczęście dzięki temu, że w obserwacjach fal uczestniczył trzeci detektor – Advanced Virgo – który dodatkowo znajdował się w bardzo dogodnym położeniu względem kierunku na źródło, możliwa była precyzyjna lokalizacja pozycji źródła na podstawie jedynie danych z LIGO i Virgo: pola 28° kwadratowych w gwiazdozbiórze Hydry. Dzięki tej informacji różne rodzaje teleskopów szybko namierzyły nowe źródła światła w galaktyce NGC 4993. Znajduje się ona w odległości w pełni kompatybilnej z wartością 40_{-14}^{+8} Mpc wynikającą z detekcji fal. Prawdopodobieństwo zbiegu okoliczności (czyli odnotowanie niezwiązanych „ćwierku” i błysku gamma) jest mniejsze niż $5 \cdot 10^{-8}$. Szybka lokalizacja pozwoliła na obserwacje fotonów pochodzących z wybuchu oraz jego późniejszej ewolucji w świetle widzialnym, ultrafiolecie, podczerwieni, w zakresie radiowym i X. Pełna lista prac w [2].

Czego nowego nauczymy się z obserwacji GW170817? Po pierwsze, mamy dostęp do zupełnie nowej metody pomiaru odległości we Wszechświecie, niezależnej od tradycyjnych metod polegających na „świecach standardowych”. Układ podwójny będący „syraną standardową” [3] dostarcza odległości d , którą można porównać ze znaną prędkością ucieczki v_H galaktyki NGC 4993, czyli zastosować prawo Hubble’a: $v_H = H_0 d$. Otrzymujemy w ten sposób nowy pomiar stałej Hubble’a, $H_0 = 70,0_{-8,0}^{+12,0}$ km s⁻¹ Mpc⁻¹ i nowe oszacowanie tempa rozszerzania się Wszechświata. Porównanie przesunięcia czasowego pomiędzy falami grawitacyjnymi i fotonami przydaje się do obliczenia prędkości fal grawitacyjnych v_{GW} : $(v_{GW} - c)/c \approx c\Delta t/d$. Prędkość v_{GW} okazuje się być bardzo bliska c : $v_{GW} = c_{-0,000006}^{+0,000001}$ m/s. Analiza ostatnich orbit i zderzenia się gwiazd neutronowych pozwala na wykluczenie niektórych teorii opisujących materię gęstą: obserwacje preferują gwiazdy o promieniach mniejszych od 14 km, a pozostałość po zderzeniu ma masę co najmniej $2,74_{-0,01}^{+0,04} M_\odot$ – jest albo ciężką gwiazdą neutronową, albo lekką czarną dziurą, co z pewnością da do myślenia astrofizykom od gęstej materii. Obserwacje świecenia pozostałości po zderzeniu wyjaśniają pochodzenie metali cięższych od żelaza. Światło widzialne i podczerwone pochodzi z rozpadu ciężkich radioaktywnych pierwiastków powstałych z materii gwiazd neutronowych rozrzuconych po zderzeniu. Z obserwacji GW170817 wynika, że przeważająca większość m.in. złota i platyny, które znajdujemy obecnie na Ziemi, powstała podczas takich właśnie katastrof.

Michał BEJGER

[1] <https://polgraw.camk.edu.pl>

[2] http://public.virgo-gw.eu/gw170817_papers

[3] Newtonowskie intuicje dla fal grawitacyjnych, *Delta* 3/17