

pokaże się już 7° od nich, prezentując tarczę w fazie 6%. Na zakończenie miesiąca Srebrny Glob w fazie 13% przejdzie 5° na północ od Jowisza.

Jak zawsze w drugiej połowie miesiąca, promieniują Lirydy, których maksimum aktywności przypada około 22 kwietnia. Radiant roju znajduje się jakieś 8° na

południowy zachód od Węgi i wznosi się od zmerchu, by do końca nocy astronomicznej osiągnąć wysokość prawie 70°. W maksimum można spodziewać się około 20 zjawisk na godzinę, a Księżyc nie przeszkodzi w obserwacjach.

Ariel MAJCHER



## Prosto z nieba: Znowu ta szczelina

Podczas pierwszych trzech kampanii obserwacyjnych (O1, O2 i O3) współpraca LIGO–Virgo zarejestrowała w sumie 90 potwierdzonych sygnałów fal grawitacyjnych, a od rozpoczęcia kampanii O4 zebrano ich już ponad 200, głównie ostatnich chwil układów podwójnych czarnych dziur. Wynika to oczywiście z lepszej czułości detektorów, a co za tym idzie, z większej objętości Wszechświata, z której nadchodzą do nas sygnały.

Interferometry typu LIGO i Virgo wykorzystują triangulację do określenia pozycji źródła na niebie. Wymaga to jednoczesnej detekcji co najmniej dwóch, a jeszcze lepiej trzech różnych detektorów, aby można było porównać różnice czasowe w przybyciu fali grawitacyjnej oraz różnice amplitud i faz sygnału, do każdego z detektorów. Jeśli działa tylko jeden detektor, można zmierzyć jedynie czas przybycia sygnału i oszacować amplitudę  $h$  sygnału, czyli odległość  $r$  do zdarzenia, ponieważ  $h \propto 1/r$ .

A. G. Abac i in., "Observation of Gravitational Waves from the Coalescence of a 2.5 – 4.5  $M_{\odot}$  Compact Object and a Neutron Star", 2024, ApJL 970 L34.

\*Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Ferrara, Włochy

Powracamy do kwestii „szczeliny masowej”, czyli hipotetycznej przerwy (luki) w rozkładzie mas gwiazd neutronowych i czarnych dziur, z grubsza pomiędzy 3 a 5  $M_{\odot}$ . Ostatnio pisaliśmy o niej w  $\Delta_{24}^9$ , tym razem pojawia się znów z powodu publikacji zespołu LIGO–Virgo–KAGRA (LVK). Detekcja interesującego sygnału GW230529 nastąpiła 29 maja 2023 roku, czyli na początku trwającej wciąż kampanii obserwacyjnej LVK O4 (wiosna 2023 – jesień 2025).

Sygnał GW230529 jest szczególnie interesujący, ponieważ jego źródło – układ podwójny – składał się z obiektu o masie typowej dla gwiazd neutronowych,  $1,4_{-0,2}^{+0,6} M_{\odot}$ , oraz drugiego, o masie  $3,6_{-1,2}^{+0,8} M_{\odot}$ , znajdującego się w „szczelinie masowej”. Sygnały z układów podwójnych, zawierające składnik znajdujący się w „szczelinie”, były wcześniej rejestrowane przez detektory LIGO i Virgo, ale ten jest pierwszym, dla którego to masywniejszy składnik się w niej znajduje. Z uwagi na fakt, że w momencie detekcji działał tylko detektor LIGO Livingston (zwany L1), dokładna pozycja sygnału na niebie nie została określona. Pechowo, drugi detektor LIGO (Hanford, H1) był w trakcie uruchamiania, a detektor Virgo (V) był wtedy zupełnie wyłączony. W konsekwencji nie udało się zaobserwować ewentualnego promieniowania elektromagnetycznego, które mogło towarzyszyć ostatnim chwilom GW230529. Modele astrofizyczne przewidują w tym przypadku powstanie tzw. kilonowej, czyli eksplozji gorącej radioaktywnej materii po zderzeniu się składników, albo pływowego rozerwania gwiazdy neutronowej przez czarną dziurę jeszcze przed ostatecznym kolapsem.

Wykrycie GW230529 jest istotne z wielu powodów. Po pierwsze dostarcza kolejnego dowodu na istnienie obiektów zwartych w „szczelinie masowej”, obszarze wcześniej uważanym za słabo „zasiedlony”. Pozostaje oczywiście pytanie o naturę masywniejszego składnika: przypuszczalnie jest to małomasywna czarna dziura, ale nie jest wykluczone, że jest nim bardzo masywna gwiazda neutronowa (byłby to niezwykle przed dla badaczy bardzo gęstej materii). Z analizy fali, która dotarła do detektora L1, wynika, że masywniejszy składnik miał niezanedbywalny spin  $\chi$  (bezwymiarowy moment pędu  $\chi = cJ/(GM^2)$ ,  $J$  to moment pędu) oszacowany na  $\chi = 0,44_{-0,37}^{+0,40}$ . Nie jest on jednak tak duży, jak oczekivalibyśmy w przypadku czarnej dziury powstałej z wcześniejszego połączenia się dwóch mniejszych czarnych dziur. Szacuje się, że połączenie dwóch mniejszych nierotujących czarnych dziur prowadzi do powstania czarnej dziury o spinie  $\chi \approx 0,7$ , który bierze się z transferu orbitalnego momentu pędu układu do spinu końcowego obiektu.

Obserwacja dowodzi, że wcześniejsze modele ewolucji gwiazd i procesów formowania się czarnych dziur mogą wymagać doprecyzowania, ponieważ już widać, że czarne dziury, zwłaszcza te lekkie, mogą tworzyć się na wiele sposobów, m.in. podczas zderzeń gwiazd neutronowych, a być może także w wyniku wybuchów specjalnej klasy asymetrycznych supernowych. Wydaje się więc pewne, że „szczelina masowa” nie jest rzeczywistą luką w rozkładzie mas, lecz raczej odzwierciedleniem dotychczasowych ograniczeń obserwacyjnych. Nie do końca udana obserwacja GW230529 (nie udało się zobaczyć zjawiska w falach elektromagnetycznych) ma jednak istotne znaczenie dla „tradycyjnej” astrofizyki, skoro zarejestrowaliśmy GW230529, to w przyszłości wykryjemy więcej zdarzeń tego typu, potencjalnie z towarzyszącymi im sygnałami elektromagnetycznymi. Dostarczą one informacji o właściwościach i zachowaniach obiektów zwartych w tym zakresie mas.

Michał BEJGER\*