

więc spokojnie wrócić do omawianego na początku przykładu z pociągami i kartkami. Teraz jest już jasne, że w momencie, gdy pociąg wjeżdża na stację, powietrze, które znajduje się pomiędzy pociągami a człowiekiem stojącym blisko niego, porusza się szybciej, a więc ma niższe ciśnienie. Wiesz też, że ruch powietrza odbywa się w kierunku od wysokiego do niskiego ciśnienia. Oczywiście zatem staje się, że obiekty znajdujące się w bliskiej odległości od pociągu będą pod niego wessane. Ciekawe, że prawo to na skutek błędnego wyobrażenia zostało również nazwane paradoksem hydrostatycznym. Faktycznie, jak sami się pewnie przekonaliście, rozumowanie to nie jest całkowicie intuicyjne. Jednak w życiu codziennym zjawisko to występuje częściej. Weźmy na przykład drzewa trzaskające podczas przeciągu, silne poddmuchy wiatru między budynkami lub na schodach w podziemnym przejściu.

Podobnie nurt w rzece – zawsze wciąga obiekty na środek, a najsilniejszy występuje między wysepkami. Zjawisko to może stwarzać niebezpieczeństwo w żegludze, gdy dwa statki płyną równolegle, woda między nimi płynie szybciej i statki mogą się zderzyć. Jak widać, zjawisk tych jest bardzo dużo i potrafimy je wyjaśnić w stosunkowo nieskomplikowany sposób. Ciebie, Drogi Czytelniku, zachęcam do obserwowania otaczającego Cię świata i znajdowania kolejnych przykładów.

A na koniec zagadka. Potrzebne jest pudełko, suszarka i zapalona świeca. Ustaw świecę za rogiem pudełka i skieruj strumień powietrza z suszarki wzdłuż niego. W którą stronę przesunie się płomień świecy? Zostanie wypchnięty czy wciągnięty przez poruszające się powietrze?

Agnieszka CHUDEK

GW190425 – nieoczekiwane masywny układ gwiazd neutronowych?

Michał BEJGER

Na początku roku zespoły LIGO i Virgo ogłosiły pierwszą „wyjątkową” (to znaczy nadającą się do osobnej publikacji) detekcję z trzeciego cyklu obserwacji (O3) detektorów Advanced LIGO i Advanced Virgo. Sygnał GW190425 został zarejestrowany 25 kwietnia 2019 roku. Był obserwowany przez około 128 sekund, a zmierzona wtedy masa ćwierku $M_c = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5} \simeq 1,44_{-0,02}^{+0,02} M_\odot$ wskazuje, że powstał on w wyniku połączenia się dwóch lekkich obiektów zwartych, najprawdopodobniej gwiazd neutronowych. Masa ćwierku GW190425 jest wyraźnie większa od tej zmierzonej w pierwszym tego typu sygnale, GW170817. Oznacza to, że łączna masa łączących się obiektów była niezwykle wysoka, jak na znane dotychczas układy podwójne gwiazd neutronowych, ponieważ wyniosła aż $3,4 M_\odot$, a składniki miały masy w zakresie od $1,5$ do $1,9 M_\odot$.

Przed odkryciem GW190425 LIGO i Virgo obserwowały wiele sygnałów emitowanych przez układy podwójne czarnych dziur (o masach między 6 a $50 M_\odot$), i jeden wywołany zderzeniem się gwiazd neutronowych (wspomniany wcześniej GW178017). Za typową masę gwiazdy neutronowej przez wiele lat uważano $1,4 M_\odot$, dzięki pomiarom mas w relatywistycznych układach podwójnych z pulsarem radiowym, np. w układzie podwójnym Hulse’a–Taylora. Gwiazdy neutronowe mogą mieć jednak bardzo różne masy, od około $1,17$ do $2,1 M_\odot$. Wartości mas (a zwłaszcza maksymalna możliwa wartość masy) są istotne, ponieważ gwiazdy neutronowe są obiektami zbudowanymi z materii dużo gęstszej od materii jądrowej: masa kilku słońc jest zamknięta w przestrzeni o promieniu „zaledwie” 11 – 13 km. Odkrycie, z czego się składają, jest jednym z najgorętszych problemów współczesnej astrofizyki.

Fale grawitacyjne oferują nowe metody badania wnętrza gwiazd. W czasie ostatnich kilku obrotów układu podwójnego gwiazdy są tak blisko siebie, że istotne staje się uwzględnienie ich rozciąglej i materialnej struktury (założenie, że są masami punktowymi staje się niewystarczające). Wpływa to na charakter modelowanej fali grawitacyjnej. Efekt zależy od wartości mas składników i – co bardzo ważne – od równania stanu gęstej materii gwiazd neutronowych. Układ będący źródłem GW190425 był znacząco cięższy od GW170817 i zapewne z tego powodu nie udało się, w sposób statystycznie wiarygodny, stwierdzić obecności efektów pływowych (wzajemnej deformacji pływowej składników). Jest to związane z faktem, że im cięższa gwiazda neutronowa,

Masa ćwierku GW170817 jest równa $1,186_{-0,001}^{+0,001} M_\odot$. Łączna masa gwiazd wynosiła ponad $2,7 M_\odot$, a masy składników oszacowano na od $1,16$ do $1,6 M_\odot$.

Pulsar w układzie Hulse’a–Taylora ma masę $1,4398 M_\odot$, a masa towarzysza, najprawdopodobniej również gwiazdy neutronowej, to $1,3886 M_\odot$.

Równanie stanu (opisujące zależność między ciśnieniem a gęstością) zawiera informacje o mikroskopowych właściwościach zimnej, gęstej materii. Przepis ten stanowi dane wejściowe dla równań hydrodynamicznych gwiazdy, czyli jest powiązany z masą i rozmiarem gwiazdy, a także z jej podatnością na deformację pływową w polu grawitacyjnym drugiego składnika.

Interpretacja GW190425 jako układu zawierającego co najmniej jedną czarną dziurę oznaczałaby istnienie zupełnie nowej, nieznanego do tej pory populacji czarnych dziur, a jak wiadomo, „nadzwyczajne twierdzenia wymagają nadzwyczajnych dowodów” (Carl Sagan).



Rozwiązanie zadania M 1640. Niech n będzie liczbą uczestników pewnego kółka, spełniającego opisane w zadaniu warunki. Udowodnimy, że $n \leq 8$. Przydatny okaże się następujący lemat, którego dowód można znaleźć na przykład w Wikipedii pod hasłem *twierdzenie Ramseya*:

Wśród dowolnych 6 uczestników kółka można znaleźć trzech, którzy się wzajemnie lubią lub trzech, którzy się wzajemnie nie lubią.

Wybermy pewnego uczestnika A . Przypuśćmy, że lubi on pewnych 6 uczestników. Zgodnie z założeniem zadania oraz powyższym lematem wśród nich znajduje się 3, którzy wzajemnie się lubią, i razem z A tworzą oni czwórkę, która przeczy założeniom zadania. Przypuśćmy teraz, że A nie lubi pewnych 4 uczestników. Wśród nich znajduje się dwóch, którzy się nie lubią, i razem z A tworzą oni trójkę sprzeczną z założeniami. Wynika stąd, że $n \leq 9$. Gdyby jednak $n = 9$, to każdy uczestnik musiałby lubić dokładnie 5 uczestników. Jest to sprzeczność, gdyż suma liczb sympatii poszczególnych uczestników wyniosłaby 45, a musi to być liczba parzysta ze względu na wzajemność uczuć. W tej sytuacji $n \leq 8$.

Jeśli ponumerujemy 8 uczniów liczbami od 1 do 8 i okaże się, że uczniowie o numerach k i l lubią się tylko wtedy, gdy $|(k - l) \bmod 8| \leq 2$, to ta grupka będzie spełniać warunki zadania, co kończy rozwiązanie.

tym bardziej jest zwarta i bardziej ściśnięta przez ekstremalną grawitację, a przez to mniej podatna na odkształcenie (ale oczywiście zależy to też od konkretnego, realizowanego w Naturze, nieznanego obecnie równania stanu). Sytuację dodatkowo komplikuje fakt, że nie zaobserwowaliśmy, jak w przypadku GW170817, emisji promieniowania elektromagnetycznego (w tym krótkiego błysku γ), czyli nie mamy bezpośrednich dowodów na rozzerwanie pływowe gwiazd i rozrzućenie radioaktywnej materii wokół miejsca zderzenia, co zdarzyło się podczas obserwacji GW170817. Niemniej jednak obserwacje takie jak GW190425 zapewniają inny niż dotychczas wgląd w bardzo gęstą materię, a także w możliwe scenariusze powstawania układów podwójnych gwiazd neutronowych.

Podstawowa hipoteza o GW190425 zakłada, że było to połączenie dwóch gwiazd neutronowych, jednej o „typowej” masie około $1,4 M_{\odot}$, a drugiej dużo masywniejszej, około $2 M_{\odot}$. Radioastronomowie zaobserwowali do tej pory w Galaktyce kilkanaście układów podwójnych z gwiazdami neutronowymi. Masy składników są mniej więcej podobne do tych zmierzonych w GW170817 (zakres mas od $1,17$ do $1,65 M_{\odot}$), a masy całkowite układów znajdują się w przedziale od $2,5$ do $2,9 M_{\odot}$. Układ GW190425 odsta je więc znacząco od populacji galaktycznej. Alternatywna, egzotyczniejsza, hipoteza jest natomiast taka, że sygnał został wyemitowany podczas zderzenia „zwykłej” gwiazdy neutronowej z lekką czarną dziurą. Jednak do tej pory nie ma mocnych dowodów obserwacyjnych na istnienie czarnych dziur o masach mniejszych od około $4 M_{\odot}$.

Można zatem przypuszczać, że GW190425 jest skutkiem połączenia się dwóch gwiazd neutronowych, ale jednocześnie bardzo ciekawe jest zrozumienie, jak układ ten mógł w ogóle powstać, czy jest wyjątkowy i czy sposób jego powstania różni się od historii innych układów podwójnych w Galaktyce.

Standardowym sposobem powstawania układów podwójnych gwiazd neutronowych jest izolowana ewolucja „w polu” układu podwójnego dwóch zwykłych, masywnych gwiazd. Układy te nie wchodzi w interakcje z innymi gwiazdami aż do końca życia, gdy oba składniki wybuchają kolejno jako supernowe, pozostawiając po sobie gwiazdy neutronowe. By doszło do emisji fal grawitacyjnych rejestrowanych przez LIGO i Virgo, układ podwójny musi przetrwać dwie eksplozje, a separacja między gwiazdami musi być odpowiednia, aby układ podwójny mógł zacieśnić orbitę w czasie życia Wszechświata. Jedną z hipotez tłumaczących niezwykle wysoką masę GW190425 i brak podobnych układów w Galaktyce jest to, że takie przypadki łatwo przeoczyć, ponieważ ich czas życia jest w skali astronomicznej niezwykle krótki. Gwiazdy znajdują się od razu na bardzo ciasnej orbicie, o okresie obrotu mniejszym niż godzina (dla porównania, najciaśniejszy układ galaktyczny ma okres orbitalny 2 godziny).

Niektórzy astronomowie spekulują, że układ powstał w wyniku oddziaływań dynamicznych w gęstych obszarach gwiazdowych, takich jak gromady kuliste. Częstsze niż „w polu galaktycznym” oddziaływania grawitacyjne między gwiazdami mogą bowiem prowadzić do powstania układu podwójnego. Wiadomo też, że niektóre masywne gwiazdy neutronowe znajdują się w takich gromadach. Problemem w tym wytłumaczeniu jest niewielka obserwowana liczba kandydatów na takie układy: w Galaktyce tylko 1 na 10 znanych układów podwójnych gwiazd neutronowych znajduje się w gromadach kulistych, nie jest więc łatwo wytłumaczyć teoretycznie szacowaną na podstawie tej jednej obserwacji GW190425 częstość występowania powstających w tym modelu układów.

W naszej Galaktyce bardzo rzadko dochodzi do zderzeń gwiazd neutronowych (mniej więcej raz na sto tysięcy lat). Detektory takie jak Advanced LIGO i Advanced Virgo są dostatecznie czułe, by rejestrować zjawiska w odległości setek milionów lat świetlnych, gdy zatem osiągną pełną czułość (w kampanii obserwacyjnej O4 i później), umożliwi to obserwacje sygnałów typu GW190425 i GW170817 co najmniej kilka razy w roku. Kto wie, co zarejestrujemy następnym razem?