

OBSERWACJA FAL GRAWITACYJNYCH

Fale grawitacyjne nie są rzadkim zjawiskiem, które występuje w kosmosie raz na jakiś czas. Powstają one w następstwie różnych kosmicznych wydarzeń i przebiegają przez Ziemię bardzo często. Badanie ich genezy jest bezcennym źródłem wiedzy o kosmosie.



Amedeo Romagnolo

Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika
Polskiej Akademii Nauk w Warszawie

Amedeo Romagnolo

Jest doktorantem w Centrum Astronomicznym im. Mikołaja Kopernika w Warszawie. Pracuje nad syntezą populacji źródeł fal grawitacyjnych, badając głównie aspekty teoretyczne i obliczeniowe tworzenia się układów podwójnych czarnych dziur i gwiazd neutronowych. Bierze także udział w projektach dotyczących poszukiwania egzoplanet nadających się do zamieszkania.
amedeoromagnolo@gmail.com

Historia fal grawitacyjnych sięga 1916 roku, kiedy Albert Einstein w ogólnej teorii względności przewidział zaburzenia czasoprzestrzeni w postaci falistych zmarszczek. Fale takie powstają na skutek przesunięcia symetrii masy ciała lub układu. Jeśli biegamy w kółko i nagle zaczynamy poruszać się po mniejszym obwodzie, wprowadzamy zaburzenie czasoprzestrzeni. Kiedy satelita zmienia nieco orbitę okołoziemską, również dochodzi do takiego zaburzenia.

Jednak fale grawitacyjne pochodzące z takich zdarzeń są bardzo słabe i nie mamy tak czułych urządzeń, które mogłyby je zarejestrować. Obecnie na świecie działają cztery detektory fal grawitacyjnych: LIGO Hanford i LIGO Livingston w Stanach Zjednoczonych, Virgo we Włoszech i Kagra w Japonii. Rejestrują one fale grawitacyjne o wysokiej energii, powstające podczas nagłej zmiany orbit przez dwa obiekty o wielkiej masie krążące wokół środka masy układu. Taka sytuacja doprowadziła do powstania fal grawitacyjnych, które zostały zarejestrowane jako pierwsze w historii 14 września 2015 roku przez detektory LIGO i Virgo, co zostało ogłoszone we wspólnym komunikacie 11 lutego 2016 roku. Obecnie dostępne detektory mają zdolność zarejestrowania fal pochodzących z czarnych dziur i gwiazd neutronowych wchodzących na tak małe orbity, że doprowadza to do ich połączenia się w jeden obiekt.

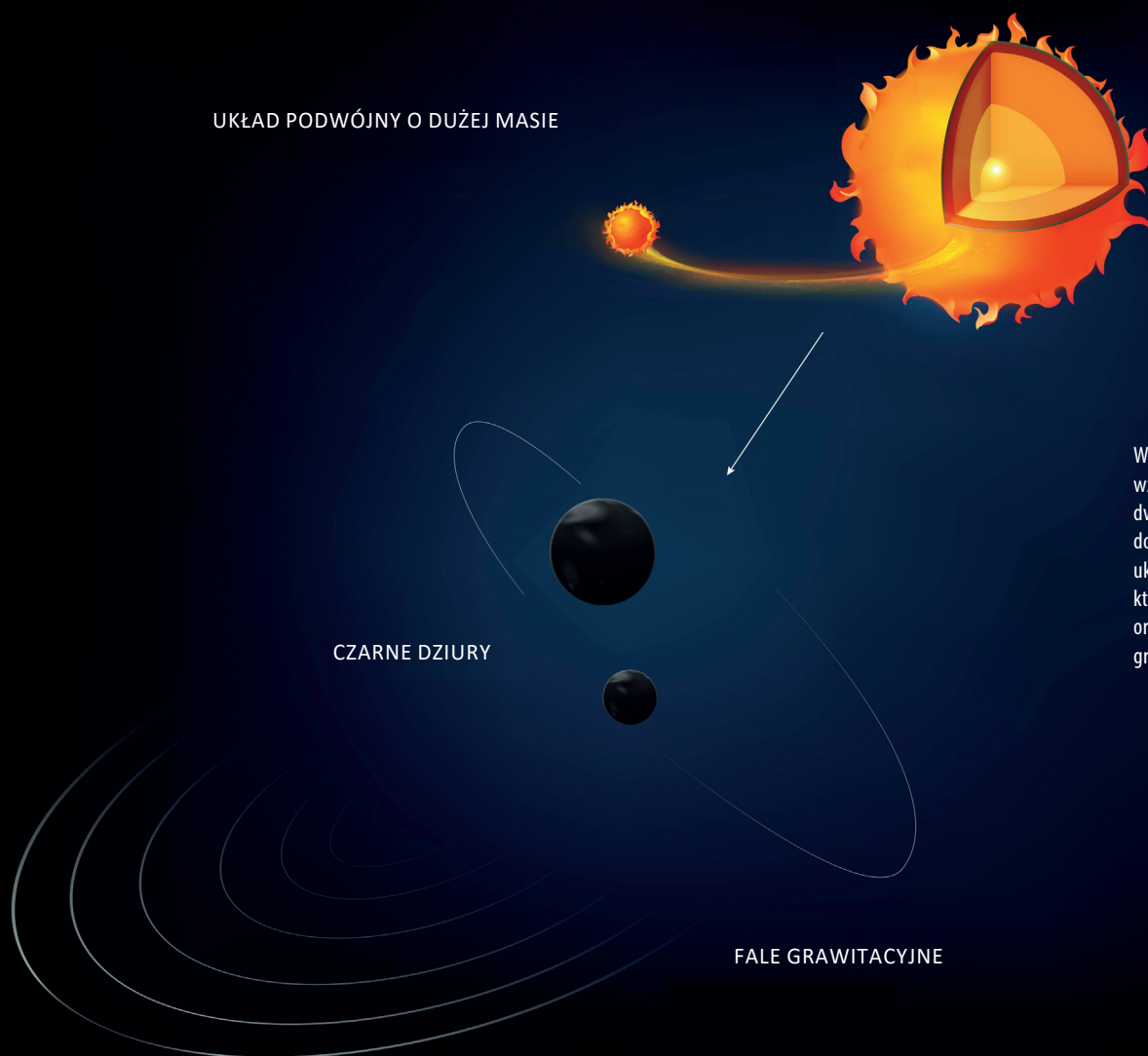
Pochodzenie fal grawitacyjnych

Zarówno gwiazdy neutronowe, jak i czarne dziury są pozostałościami starych gwiazd, które zapadły się pod wpływem własnej grawitacji. Choć gwiazd neutronowych powinno być znacznie więcej niż czarnych dziur w części kosmosu dostępnej obserwacji, to źródłem większości zaobserwowanych fal grawitacyjnych są jednak czarne dziury. Jest tak, ponieważ mają one znacznie większe masy niż gwiazdy neutronowe i efekt ich połączenia się jest znacznie silniejszy.

Ponieważ badanie fal grawitacyjnych jest nowym polem astrofizyki, uczeni wciąż poszukują odpowiedzi na fundamentalne pytania dotyczące teorii i doświadczeń. Przewiduje się, że łączenie się czarnych dziur w ramach układu podwójnego może być wynikiem jednej z trzech ścieżek ewolucyjnych tych obiektów:

1. **Odizolowana ewolucja układu podwójnego**, która zachodzi, kiedy dwie gwiazdy krążą wokół siebie nawzajem i nie wpływa na nie żaden układ zewnętrzny.
2. **Ewolucja dynamiczna**, w której układy zewnętrzne wpływają na tworzenie się i ewolucję podwójnych układów czarnych dziur.
3. **Pierwotne czarne dziury**, które miałyby powstać nie w wyniku zapadnięcia się gwiazdy o wielkiej masie, lecz na skutek gromadzenia bardzo wysokich skupisk energii wkrótce po Wielkim Wybuchu.

Każda z wyżej wymienionych ścieżek obejmuje kilka szczegółowych typów scenariuszy tworzenia się podwójnych układów czarnych dziur i ich połączenia. Według obecnego stanu wiedzy wydaje się, że najlepiej udokumentowaną ścieżką jest ewolucja odizolowana, w którym taki system rozwija się bez wpływu innych ciał.



Wizja artystyczna wzajemnego oddziaływania dwóch gwiazd, prowadząca do powstania podwójnego układu czarnych dziur, których zdegenerowane orbity są źródłem fal grawitacyjnych

GRAFIKA: KASIA DREWNIANY

Podwójne układy gwiazd

W ścieżce odizolowanej zwykle badaniu są poddawane układy dwóch masywnych gwiazd o masach przekraczających masę Słońca ponadpięciokrotnie. W ciągu swojego życia gwiazdy takie przechodzą przez różne stadia rozwoju, aż w końcu przekształcają się w gwiazdy neutronowe lub czarne dziury. Najciekawsze zjawiska w układach podwójnych występują zwykle pod koniec życia gwiazd, kiedy to dochodzi do ich intensywnego rozszerzania. Wówczas warstwy zewnętrzne są bardzo luźno powiązane z jądrem i może dojść do ich oderwania i przyciągnięcia przez grawitację drugiej gwiazdy w układzie. Nosi to nazwę wypływu materii z powierzchni Roche'a (ang. *Roche lobe overflow event*) i polega na przejmowaniu części masy (zob. ilustracja), trwającym aż do końca istnienia układu podwójnego lub do momentu, kiedy gwiazda biorca nie jest już w stanie przyciągnąć więcej masy od gwiazdy dawcy. Proces ten nie charakteryzuje się 100-proc. wydajnością i część przekazywanej masy nie trafia do dawcy, tylko zostaje rozproszona w otoczeniu. Zgodnie z prawami mechaniki utrata masy skutkuje zmniejszeniem momentu pędu, co powoduje zmniejszenie się odległości między gwiazdami.

Im bliżej siebie znajdują się gwiazdy neutronowe lub czarne dziury, tym szybciej obracają się wokół siebie i tym silniejszy emitują sygnał w postaci fal gra-

witacyjnych. Wpływ materii z powierzchni Roche'a w układzie podwójnym skutkuje więc w przyszłości zarejestrowaniem fal grawitacyjnych przez nasze detektory.

Symulowane zapadnięcia się gwiazd

Używając dostępnych modeli teoretycznych i obliczeniowych, stworzyliśmy (i ciągle udoskonalamy) kody ewolucyjne, które symulują ewolucję masywnych gwiazd w układach podwójnych od ich powstania aż do zapadnięcia się. Niektóre z tych kodów symulują procesy magnetohydrodynamiczne gwiazd w trzech wymiarach, ale taka pełna symulacja może zająć kilka miesięcy. Inne kody są jednowymiarowe, ale oparte na nich symulacje powstają w kilka dni i jednocześnie są zadowalające pod względem dokładności. Inne z kolei, przy odpowiedniej kalibracji i uproszczeniach, zaledwie w jeden dzień tworzą symulacje zachowania milionów gwiazd. Większość praw fizycznych zastosowanych w kodach nie jest tzw. pierwszymi zasadami: nie wywodzą się one z ustalonych modeli matematycznych opisujących zjawiska naturalne, lecz z wnioskowania na podstawie obserwacji empirycznych. Przykładowo, równanie $E=mc^2$ to jedno z praw pierwszych zasad. Kiedy jednak na podstawie

wskazania przez termometr 0 st. C wnioskujemy, że woda zamrze, jest to wnioskowanie przez analogię do wcześniejszego doświadczenia. Nie wdając się w dywagacje na temat tego, czy fizyka pierwszych zasad w ogóle istnieje, możemy stwierdzić, że zaletą teorii opartych na opisie doświadczeń jest to, że nie musimy czekać, aż uzyskamy matematycznie doskonałe przedstawienie danego zjawiska, jeśli jego rozumienie oparte na obserwacji daje wystarczająco dobre rezultaty. Należy jednak pamiętać, że potrzeba bardzo wiele danych empirycznych, by w ogóle stworzyć podstawy takiej teorii.

Ogólny obraz procesów fizycznych zachodzących w trakcie wypływu materii z powierzchni Roche'a jest dość dobrze opisany, choć brakuje mu dokładności. Należy mieć na uwadze, że w każdej symulacji życia gwiazdy nawet bardzo mała zmiana wartości kilku stałych może mieć ogromny wpływ na ekspansję, skład chemiczny, stratyfikację i ostateczny efekt śmierci tej gwiazdy.

Detektory fal grawitacyjnych ujawniają nam teraz cały kosmos nieodkrytych wcześniej układów podwójnych czarnych dziur łączących się z sobą.

Masywne gwiazdy występują w kosmosie dość rzadko w porównaniu z mniejszymi gwiazdami, a biorąc pod uwagę, że proces ich spalania i śmierć następują znacznie szybciej, nie dysponujemy dużą ilością danych pozwalających zbadać fizykę cząstek elementarnych znajdujących się w ich wnętrzach. Ponadto niektórych procesów zachodzących wewnątrz masywnych gwiazd nie da się zbadać w laboratoriach. O ile możemy testować reakcje jądrowe zachodzące wewnątrz Słońca i będące źródłem jego energii, to reakcje zachodzące wewnątrz ostatnich stadiów życia masywnych gwiazd wymagałyby wytworzenia temperatur rzędu dziesiątek miliardów stopni, co przekracza możliwości laboratoriów fizyki nuklearnej ponad tysiąc razy. Niestety, stanowi to duże wyzwanie dla teoretycznej astrofizyki gwiazd: jeżeli stworzone przez nas modele są oparte na ograniczonej liczbie obserwacji i wynikach uzyskanych w laboratoriach, ich status teoretyczny jest obciążony dużą niepewnością.

Nowe źródło informacji

Jak więc można badać powstanie i ewolucję gwiazd neutronowych i czarnych dziur, nie wiedząc nawet

dokładnie, jak ewoluowały ich gwiazdy protopląści? Tu właśnie przychodzi z pomocą astrofizyka fal grawitacyjnych. Większość czarnych dziur – albo nawet wszystkie – powstało przez zapadnięcie się jąder gwiazd, większość z nich nie jest widoczna dla normalnych teleskopów. Detektory fal grawitacyjnych ujawniają nam teraz cały kosmos nieodkrytych wcześniej układów podwójnych czarnych dziur łączących się z sobą. Dzięki temu możemy lepiej zrozumieć, jak ewoluują gwiazdy, gdyż własności jąder są bezpośrednio powiązane z fizyką gwiazd. Procesy fizyczne zachodzące w mniejszych gwiazdach (takich jak Słońce) różnią się znacznie od tych, które zachodzą w masywnych obiektach, gdyż te ostatnie wytwarzają znacznie więcej energii, co z kolei ma wpływ na zachowanie przegrzanej plazmy gwiazdnej.

Powiększamy naszą wiedzę nie tylko na temat ewolucji gwiazd, lecz także na temat fizyki procesów bardzo wysokiej energii, takich jak supernowe. Choć nie osiągnięto jeszcze ostatecznych wniosków co do tego, czy gwiazdy protopląści czarnych dziur wybuchają jako supernowe, czy też zapadają się pod wpływem grawitacyjnego kolapsu, badanie fal grawitacyjnych przybliża nas do odpowiedzi na to pytanie. Jeśli gwiazda eksploduje, jej zewnętrzne warstwy ulegają rozproszeniu i powstała w ten sposób czarna dziura będzie lżejsza od swojego protoplasty. Jeśli zaś następuje pełna implozja, nie ma ubytku masy i czarna dziura powinna być cięższa.

Zdarzenia typu „kilonowa”

Powstanie gwiazd neutronowych przypisuje się z dość dużą pewnością wybuchom supernowych. Połączenie się dwóch gwiazd neutronowych, a być może także gwiazdy neutronowej z czarną dziurą, charakteryzuje się pewną własnością, której nie wykazują połączenia dwóch czarnych dziur. Polega ona na tym, że tuż przed ich fuzją występuje faza niestabilności, wywołująca reakcje termojądrowe określane jako zdarzenie kilonowej. Następuje wtedy silna, choć krótka emisja fal grawitacyjnych, promieni gamma i neutronów. Kilonowe są źródłem większości najcięższych pierwiastków w kosmosie, takich jak złoto i platyna. Jedynym zarejestrowanym do tej pory połączeniem gwiazd neutronowych było zdarzenie GW170817, podczas którego powstały pierwiastki ciężkie o masie około 16 tys. razy większej niż masa Ziemi oraz oczywiście czarna dziura. Wynika z tego, że obserwacje łączenia się gwiazd neutronowych za pomocą detektorów fal grawitacyjnych, detektorów neutronów i klasycznych teleskopów nie tylko pomagają nam zrozumieć procesy zachodzące w masywnych układach podwójnych, lecz także dają nam wiedzę na temat ewolucji składu chemicznego kosmosu. To z kolei jest jednym z kluczowych elementów zrozumienia, jak powstają planety i życie. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

What are gravitational waves and their sources, www.ligo.caltech.edu/page/what-are-gw.

Massive stars evolution, www.education.psu.edu/astro801/content/l6_p5.html.

Neutron star binaries and kilonovae, www.psu.edu/news/eberly-college-science/story/merging-neutron-stars-unfolding-story-kilonova-told-x-rays/.