

Detektory fal grawitacyjnych

Izabela KOWALSKA*

U progu trzeciego tysiąclecia astronomia rozwija się jak nigdy dotąd. Dynamiczny postęp technologiczny pozwala budować teleskopy, które widzą więcej i dalej. Ogromna moc obliczeniowa współczesnych komputerów pozwala na analizę gigantycznych ilości danych obserwacyjnych.

Równie szybkie postępy obserwujemy na polu astrofizyki teoretycznej. Za pomocą symulacji numerycznych jesteśmy w stanie odtworzyć cały szereg procesów zachodzących w warunkach astrofizycznych. Potrafimy obserwować Wszechświat w bardzo szerokim zakresie widma fal elektromagnetycznych. Ostatnie dekady przyniosły przełomowe odkrycia dzięki obserwacjom wysokoenergetycznych fotonów.

Choć dalsza eksploracja nieba poprzez rejestrowanie światła będzie przynosić jeszcze wiele ciekawych wyników, to warto szukać nowych „okien” na Wszechświat. Jednym z nich są fale grawitacyjne. Obserwacje w tym zakresie są czymś jakościowo innym od obserwacji fal elektromagnetycznych. Każda detekcja fal grawitacyjnych przyniesie nowe informacje o zjawiskach, które znamy, i, jak się spodziewamy, będzie źródłem lawiny nowych zjawisk, o których nie mamy pojęcia.

Falę grawitacyjną może wyprodukować każdy masywny obiekt, którego tzw. moment kwadrupolowy się zmienia. W praktyce oznacza to, że musimy mieć coś, co jest niesymetryczne i rotuje bądź zapada się. Człowiek z plecakiem kręcący się wokół własnej osi też jest źródłem fal grawitacyjnych, choć za słabych, by je wykryć. Gdzie szukać obiektów, które na tyle silnie promieniują, żeby była szansa to zobaczyć? Odpowiedź jest prosta – w kosmosie. Jest kilka klas obiektów, które dobrze nadają się na źródła fal grawitacyjnych. Najpoważniejszym kandydatem są układy podwójne obiektów zwartych (mogą to być gwiazdy neutronowe, czarne dziury bądź białe karły). Już samo obiegiwanie się dwóch ciał sprawia, że emitowana jest energia w postaci promieniowania grawitacyjnego (pośrednio pokazały to omówione dalej obserwacje Hulse’a i Taylora). W miarę zacieśniania się orbity wzrasta zarówno amplituda, jak i częstotliwość wysyłanych fal, osiągając maksimum, gdy dojdzie do połączenia się składników układu – to wtedy sygnał będzie najsilniejszy i najłatwiejszy do detekcji.

Potencjalnie dobrymi źródłami fal grawitacyjnych są też wybuchy supernowych, podczas których dochodzi do gwałtownego zapadnięcia się jądra masywnej gwiazdy. W tym przypadku mamy do czynienia z „błyskiem” w falach grawitacyjnych. Niestety, promieniowanie

grawitacyjne unosi bardzo mały procent energii uwalnianej w wybuchu, więc mamy szansę zaobserwować tylko stosunkowo bliskie supernowe.

Kolejnym źródłem, którego będziemy szukać, jest ciągła emisja z rotujących gwiazd neutronowych. Na pierwszy rzut oka wydaje się to dziwne, ponieważ gwiazdy neutronowe są najbardziej kulistymi obiektami, jakie znamy. Mają promień rzędu 10 km, a „góry” na ich powierzchni są rzędu centymetrów. Okazuje się jednak, że takie odchylenia od symetrii sferycznej są wystarczające do emisji grawitacyjnej. Znamy kilka tego typu obiektów, które powinny emitować fale grawitacyjne (np. pulsar w mgławicy Krab). Z obserwacji radiowych znamy dokładną częstotliwość obrotu, a zatem wiemy dokładnie, jakiego promieniowania grawitacyjnego musimy szukać (częstość fal grawitacyjnych jest dwa razy większa niż częstość obrotu gwiazdy).

Każda z klas źródeł charakteryzuje się innym typem sygnału i wymaga od nas innej metody poszukiwania. Ponadto mamy nadzieję, że są we Wszechświecie inne, jeszcze nieznanne źródła, które dopiero odkryjemy.

W 1974 roku Russell Alan Hulse i Joseph Hooton Taylor Jr. odkryli układ podwójny składający się z pulsara i zwykłej gwiazdy. Pulsar jest obiektem bardzo małym (średnica to około 10 km), gęstym (panują tam gęstości takie jak w jądrze atomowym) i szybko rotującym (jeden obrót zwykle zajmuje mniej niż sekundę). Dodatkowo wysyła on promieniowanie radiowe skoncentrowane w wiązce, która omiata przestrzeń przy każdym obrocie (tak jak latarnia morska). Pulsy, które możemy obserwować, są bardzo regularne – ich precyzja porównywana jest z dokładnością zegarów atomowych. Dokładny pomiar czasów nadejścia sygnałów i wszelkich odchyłek pozwala wyznaczyć orbitę układu podwójnego i śledzić jej zmiany. Układ odkryty przez Hulse’a i Taylora zmienia swoją orbitę. Składniki są coraz bliżej siebie. Okazało się, że tempo, w jakim orbita się kurczy, bardzo dobrze odpowiada przewidywaniom teoretycznym – tak powinno się to odbywać, jeśli układ emituje energię w postaci fal grawitacyjnych! Odkrycie to zostało uhonorowane Nagrodą Nobla w 1993 roku. Naukowcy wierzą, że jest to pośredni dowód na istnienie promieniowania grawitacyjnego.

Ze względu na swoje własności fale grawitacyjne pozwalają „zajrzeć” do miejsc, które nigdy nie będą dostępne falom elektromagnetycznym. Spodziewamy się, że w sposób bezpośredni zobaczymy czarne dziury, o których istnieniu wnioskujemy z wpływu, jaki wywierają na otoczenie. Dowiemy się czegoś więcej o zjawiskach zachodzących w supernowych, które są zasłonięte gęstym pyłem. Chcielibyśmy odkryć reliktywne promieniowanie grawitacyjne, które jest pozostałością

* Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

po Wielkim Wybuchu, i dzięki temu zobaczyć, jaki był Wszechświat w pierwszych chwilach istnienia. Oczekiwania są bardzo duże.

Budowa pierwszej lunety zapoczątkowała fantastyczny rozwój astronomii. Podobnie będzie, gdy detektory fal grawitacyjnych zaczną wykrywać źródła fal grawitacyjnych.

Od kilku lat na całym świecie działają anteny, które szukają promieniowania grawitacyjnego. Dlaczego nic nie zobaczyły do tej pory? Fale grawitacyjne to zaburzenia samej czasoprzestrzeni, których skutki są bardzo subtelne. Fala zmienia odległości między masywnymi obiektami. Zmiany są proporcjonalne do początkowej odległości oraz amplitudy fali, która jest wielkością niezwykle małą. Żeby uzmysłowić sobie rząd wielkości, o którym mówimy, wyobraźmy sobie wybuch supernowej w centrum naszej Galaktyki. Wtedy amplituda fali grawitacyjnej będzie rzędu 10^{-20} (to znaczy taki byłby stosunek zmian odległości do odległości tych obiektów)! W skali Wszechświata odległość do centrum naszej Galaktyki jest niewielka, więc w rzeczywistości będziemy szukać jeszcze słabszych sygnałów. Słabe oddziaływanie z materią ma swoje wady i zalety. Plusem jest to, że fala niesie niezmienną informację o źródle. Minusem – trudność detekcji.

Jak więc zobaczyć falę grawitacyjną?

W tej chwili istnieje kilka metod wykrywania fal grawitacyjnych. Wszystkie one bazują na tym, że przechodząca fala nieznacznie zmienia odległości między masami próbnymi. Efekt ten jest bardzo mały, więc technologie stworzone do detekcji muszą być zaawansowane. Są dwie podstawowe klasy detektorów – rezonansowe i interferometryczne.

Pierwszą próbę wykrycia promieniowania grawitacyjnego podjął Joseph Weber. Jego detektorem był aluminiowy walec. Przejście fali grawitacyjnej wzbudziłoby drgania własne walca o tym większej amplitudzie, im ta częstość byłaby bliższa jego częstości rezonansowej. Według samego Webera doszło do pozytywnej detekcji, ale nie została ona potwierdzona przez niezależnych obserwatorów.

Współczesne detektory rezonansowe są większe i lepiej izolowane od otoczenia. Anteny działają w wielu ośrodkach naukowych: ALLEGRO (Nowy Orlean), AURIGA (Legnaro koło Padwy), Explorer (CERN), Nautilus (Frascati). Zaletą tego typu detektorów jest ich stosunkowo niska cena, ale niewątpliwą wadą jest czułość w bardzo wąskim zakresie częstości.

Detektory interferometryczne mierzą odległości pomiędzy masami próbnymi za pomocą laserów. Wiązki laserowe biegną w dwóch prostopadłych tunelach. Na końcach tuneli znajdują się zwierciadła odbijające wiązkę tak, aby jej faktyczna droga była wielokrotnie dłuższa od rozmiarów tuneli. Na przecięciu ramion dochodzi do interferencji

światła z obu tuneli. Nawet bardzo mała zmiana drogi optycznej światła laserowego (co odpowiada zmianie odległości między masami próbnymi po przejściu fali grawitacyjnej) powoduje zmianę wzoru interferencyjnego. Obecnie działające detektory tego typu to LIGO (dwie anteny w USA), VIRGO (Włochy), GEO600 (Niemcy), TAMA (Japonia).

Wszystkie te detektory mają dwa naturalne ograniczenia, które uniemożliwiają im obserwacje w całym zakresie częstości.

Granica niskich częstości związana jest z położeniem detektorów na Ziemi, która charakteryzuje się pewną aktywnością sejsmiczną oraz biosferą powodującą dodatkowe szумы. Nie możemy odizolować laboratorium od wpływu ziemskiego otoczenia. Z tego powodu planowana jest budowa detektora, który będzie działał w przestrzeni kosmicznej daleko od Ziemi. Antena LISA ma być złożona z trzech statków kosmicznych z masami próbnymi oddalonymi o 5 mln km.

Granica wysokich częstości związana jest z tym, że światło lasera nie jest ciągle, a składa się ze skończonej liczby fotonów. Zwiększenie mocy laserów mogłoby spowodować wzrost czułości w tym zakresie, bo liczba fotonów byłaby wówczas dużo większa i ich skończona ilość nie miałaby znaczenia. Takie rozwiązanie jest trudne technicznie, implikuje bowiem konieczność użycia luster o większej wytrzymałości oraz wydajniejszego chłodzenia.

Wyżej opisane typy detektorów dają możliwość bezpośredniego zaobserwowania przejścia fali grawitacyjnej. Należy podkreślić, że wielkością mierzoną będzie amplituda fali, która jest proporcjonalna do odwrotności odległości do źródła. W przypadku fal elektromagnetycznych mierzona jest energia, a więc kwadrat amplitudy. W konsekwencji nieznaczne poprawienie czułości anten grawitacyjnych wpływa na znaczący wzrost ich zasięgu.

Poza konwencjonalnymi metodami detekcji istnieją też metody pośrednie. Należy do nich tzw. chronometraż pulsarów. Obserwatoria radiowe na całym świecie śledzą równomiernie rozłożone pulsary. Gdyby przeszła fala grawitacyjna, to odległości między pulsarami i Ziemią nieznacznie zmieniłyby się, co zostałoby wykryte w postaci opóźnienia sygnałów radiowych. Ze względu na równomierne rozmieszczenie pulsarów możliwe będzie uśrednienie efektu. To, co pozostanie w danych, to ruch Ziemi wywołany przejściem fali grawitacyjnej. Planowane jest włączenie do współpracy większej liczby radioteleskopów, co poprawi czułość tej metody. W fazie przygotowań jest też projekt SKA, który będzie składał się z wielu radioteleskopów rozłożonych na powierzchni kilometra kwadratowego.

Wszystkie detektory są bezustannie ulepszane, co sprawia, że jesteśmy coraz bliżej pierwszej detekcji. Czekamy na nią z niecierpliwością.