Kosmiczna linijka

Prof. Grzegorz Pietrzyński jest astronomem. Jego główne zainteresowania to kosmiczna skala odległości, pobliskie galaktyki, gwiazdy zmienne i gromady gwiazdowe. Opublikował 340 prac naukowych w najlepszych pismach astronomicznych (w tym 11 w „Nature" i „Science"), cytowanych dotychczas ponad 15 tysięcy razy. Jest laureatem licznych nagród i prestiżowych grantów badawczych, w tym Advanced Grant Europejskiej Rady ds. Badań Naukowych (ERC). Kieruje międzynarodowym projektem Araukaria.

pietrzyn@camk.edu.pl

Pomiar kosmicznych odległości jest jednym z najważniejszych, najbardziej pasjonujących i najtrudniejszych zadań współczesnej nauki. Pozwala nie tylko poznać fizyczne rozmiary Wszechświata, lecz także zbadać, jak jest zbudowany i jak ewoluuje. Wskazuje również, ile energii emitują badane obiekty, i pomaga w określaniu ich natury.

prof. Grzegorz Pietrzyński

Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika
Polska Akademia Nauk, Warszawa

Dotychczas każde znaczące zwiększenie dokładności pomiaru kosmicznych odległości prowadziło do rewolucyjnych zmian. Dzięki pomiarowi odległości do gromad kulistych poznaliśmy położenie Ziemi w naszej Galaktyce – Drodze Mlecznej. Pomiar odległości do obiektu M31 pokazał, że Wszechświat to nie tylko Droga Mleczna, lecz wiele galaktyk, które, podobnie ja nasza, zawierają setki miliardów gwiazd. Dzięki pomiarom odległości odkryto również, że odległe galaktyki oddalają się od nas z ogromnymi prędkościami, a zatem obserwowany Wszechświat się powiększa. Im dalej znajduje się obserwowany obiekt, tym szybciej się od nas oddala. To proste stwierdzenie nosi nazwę prawa Hubble'a i jest obecnie podstawą naszej wiedzy o Wszechświecie. Współczynnik proporcjonalności – parametr Hubble'a – określa jego skalę. 20 lat temu dzięki nowym pomiarom odległości odkryto, że tempo ekspansji Wszechświata ostatnio przyśpieszyło. Za to odkrycie w 2011 r. Nagrodę Nobla dostali Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt i Adam G. Riess. Aby wyjaśnić przyśpieszoną ekspansję Wszechświata, zapostulowano istnienie zagadkowego tworu – ciemnej energii, która obecnie stanowi około 70% bilansu materii i energii całego Wszechświata.

YURIJ BELETSKI

Obserwatorium Las Campanas nocą. Nad gigantycznymi teleskopami rozpościera się Droga Mleczna.

Po lewej stronie widać dwie galaktyki – Wielki i Maly Obłok Magellana – nasze najbliższe sąsiadki.

Jak widać, dzięki coraz lepszym pomiarom odległości na przestrzeni ostatniego wieku nasz obraz Wszechświata ulegał dramatycznym zmianom. We współczesnym opisie Wszechświata jednym z najważniejszych elementów jest parametr Hubble'a. Określa on rozmiary Wszechświata, jego ewolucję (występuje w równaniu stanu) oraz pozwala badać fizyczną naturę ciemnej energii. Dlatego jego wyznaczanie z coraz lepszą dokładnością jest jednym z najważniejszych zadań współczesnej nauki.

Obecnie astronomowie mają do dyspozycji kilka różnych metod pomiaru parametru Hubble'a. Dzięki przełomowi, jaki nastąpił w kosmologii obserwacyjnej, parametr Hubble'a można wyznaczać na podstawie metod kosmologicznych: analizy promieniowania mikrofalowego oraz oscylacji barionowych. Metody te są bardzo atrakcyjne lecz, niestety, wymagają dodatkowych założeń i zależą od przyjętego modelu. Parametr Hubble'a można również wyznaczyć w „klasyczny" sposób w oparciu o świece standardowe. Jest to najprostsza, w pełni empiryczna i potencjalnie najdokładniejsza metoda, dlatego w ramach projektu Araukaria skoncentrowaliśmy się właśnie na niej.

W poszukiwaniu świec standardowych

Aby zmierzyć parametr Hubble'a przy użyciu klasycznej metody, należy starannie wybrać świece standardowe, czyli grupy obiektów, które emitują tyle samo energii i znajdują się w różnych miejscach Wszechświata. Przy obserwacji takich obiektów można założyć, że różnica zmierzonej jasności wynika z różnicy odległości, w jakich się one znajdują. Oczywiście w rzeczywistości sytuacja jest bardziej złożona. W przestrzeni kosmicznej występuje gaz i pył, który pochłania i rozprasza część światła emitowanego przez nasze świece standardowe. Nie ma też idealnych świec standardowych. Zazwyczaj ich jasność zależy od różnych czynników, na przykład od zawartości metali. Zadaniem astronomów jest wybór najlepszych świec, a następnie zbadanie, jak ich jasność zależy od rozmaitych czynników oraz jak na wykonywane obserwacje wpływa obecność gazu i pyłu kosmicznego. Zwróćmy uwagę, że za pomocą świec standardowych możemy wyznaczać jedynie odległości względne – czyli możemy określić, że np. dany obiekt znajduje się cztery razy dalej niż inny. Aby móc wyznaczać odległości absolutne w jednostkach fizycznych, musimy niezależnie, innymi metodami, wyznaczyć odległości do grupy świec standardowych.

Ze względu na ogromny zakres odległości we Wszechświecie wyznaczenie parametru Hubble'a wymaga użycia kilku różnych świec standardowych. Pozwala to zbudować tak zwaną kosmiczną drabinę odległości. Najlepszymi świecami standardowymi do pomiaru parametru Hubble'a są dwa rodzaje gwiazd: Cefeidy oraz supernowe. Po ponad stu latach intensywnych badań okazało się, że można zmierzyć parametr Hubble'a w trzech krokach. W pierwszym tworzymy najniższy szczebel drabiny: mierzymy odległości do Cefeid. Następnie, używając Cefeid, mierzymy odległości do galaktyk, w których zaobserwowano supernowe. W ten sposób kalibrujemy jasność

Nazwa projektu pochodzi od nazwy drzewa, które występuje w południowym Chile. Na zdjęciu araukaria chilijska na tle wulkanu Llaima.

supernowych i nasza drabina staje się wystarczająco długa, aby za pomocą tych bardzo jasnych obiektów sięgnąć do bardzo odległych zakątków Wszechświata i wyznaczyć wartość parametru Hubble'a. W ten sposób udało się wyznaczyć parametr Hubble'a z dokładnością do około 4%. Okazuje się, że aż 70% błędu tego wyznaczenia wiąże się z niepewnością kalibracji jasności Cefeid. Dlatego, aby znacząco zwiększyć dokładność wyznaczenia parametru Hubble'a, należy przede wszystkim ulepszyć metody pomiarowe stanowiące podstawę – pierwszy szczebel – kosmicznej drabiny odległości.

Parametr Hubble'a jest we współczesnym opisie Wszechświata jednym z najważniejszych elementów. Określa rozmiary Wszechświata i jego ewolucję oraz pozwala badać naturę ciemnej energii.

Jak daleko do Obłoku

To najtrudniejsze obecnie zadanie w całej żmudnej procedurze wyznaczania parametru Hubble'a jest głównym celem międzynarodowego zespołu Araukaria, który od ponad 15 lat zajmuje się pomiarami precyzyjnych odległości do pobliskich galaktyk za pomocą różnych świec standardowych. W ramach projektu opublikowano ponad 120 prac naukowych w prestiżowych pismach naukowych, w tym cztery w „Nature". Do tej pory udało nam się uzyskać najdokładniejsze pomiary odległości do około 20 pobliskich galaktyk. W szczególności nasze pionierskie obserwacje prowadzone w bliskiej podczerwieni pozwoliły na bardzo dokładne zbadanie, jaki jest wpływ gazu i pyłu kosmicznego na jasność obserwowanych świec standardowych, w tym Cefeid.

Jednym z największym sukcesów zespołu Araukaria był pomiar odległości do Wielkiego Obłoku Magellana – najbliższej nam galaktyki – z bezprecedensową dokładnością około 2%. Jest to najdokładniejszy pomiar odległości do innej galaktyki wykonany do tej pory. Dokładność taką znamy z życia codziennego (np. pomiar wzrostu dziecka). Nasz zespół uzyskał podobną, mierząc prawdziwie astronomiczną odległość wynoszącą 1 693 000 000 000 000 000 km. W Wielkim Obłoku Magellana znajduje się ponad 3 000 Cefeid, więc nasz pomiar jest kluczowy dla kalibracji jasności tych świec standardowych. Stanowi on obecnie najsolidniejszą podstawę do pomiaru parametru Hubble'a z dokładnością lepszą niż 3%.

Pomiar odległości do Wielkiego Obłoku Magellana wykonano, opierając się na układach podwójnych zaćmieniowych. Są to układy dwóch gwiazd, które okrążają się nawzajem i obserwowane są pod dużym kątem. W takiej sytuacji jedna cyklicznie zakrywa tarczę swojego towarzysza i na odwrót, a obserwator rejestruje związane z tym zmiany jasności układu.

W przypadku układów zaćmieniowych gwiazd zaobserwowane zmiany jasności oraz pomiary prędkości gwiazd na orbicie, przy zastosowaniu bardzo prostych praw fizyki, pozwalają z doskonałą precyzją (lepszą niż 1%) wyznaczać podstawowe parametry gwiazd, w tym ich masę, rozmiary liniowe i temperaturę. Jedynym ograniczeniem jest dokładność obserwacji. Nasz zespół wyznaczył parametry fizyczne dla ośmiu układów zaćmieniowych w Wielkim Obłoku Magellana. Następnie, korzystając z zależności pomiędzy temperaturą, jasnością i rozmiarami kątowymi, wyznaczyliśmy rozmiary kątowe badanych układów gwiazd. Mając zarówno rozmiary liniowe, jak i kątowe gwiazd, można było bardzo dokładnie wyznaczyć ich odległości w prosty geometryczny sposób.

Ta sama metoda pozwoliła na wykonanie pomiaru odległości do innej pobliskiej galaktyki, Małego Obłoku Magellana, z dokładnością do 3%. W tej galaktyce również odkryto tysiące Cefeid, możemy zatem dokładnie wyznaczyć ich jasności absolutne. Cefeidy w Małym Obłoku Magellana zawierają znacznie mniej metali niż Cefeidy w Wielkim Obłoku Magellana. Dzięki temu, porównując ich jasności wyznaczone w obu galaktykach za pomocą układów zaćmieniowych, możemy empirycznie sprawdzić, jak jasność Cefeid zależy od zawartości metali. Innymi słowy – możemy określić, na ile stabilnymi świecami standardowymi są Cefeidy.

Obecnie nasz zespół pracuje nad ulepszeniem polskiej linijki kosmicznej. Dzięki dokładniejszej kalibracji zależności pomiędzy temperaturą, jasnością i rozmiarami kątowymi gwiazd zmierzymy odległość do Wielkiego Obłoku Magellana z dokładnością lepszą niż 1%. Pomiary takie będą kluczowe, aby wyznaczyć parametr Hubble'a z dokładnością około 1%. Dodatkowo, porównując empiryczny pomiar parametru Hubble'a wykonany za pomocą klasycznej metody z analogicznymi pomiarami wykonanymi za pomocą metod kosmologicznych, można przeprowadzić unikatowy test współczesnej fizyki. Porównanie obecnych wyznaczeń parametru Hubble'a wskazuje, że pomiary różnią się, lecz ich dokładność nie jest wystarczająca, aby to stwierdzić definitywnie.

Zważyć Cefeidę

Bardzo ważnym aspektem pomiarów odległości jest dogłębne zrozumienie stosowanych metod. Jeśli chcemy zmierzyć stałą Hubble'a za pomocą Cefeid, musimy poznać i zrozumieć fizykę tych gwiazd. Cefeidy, których nazwa pochodzi od jednej z pierwszych odkrytych gwiazd tego typu, znajdującej się w gwiazdozbiorze Cefeusza, to gwiazdy, w których w pewnym etapie życia – gdy gwiazda osiąga rozmiary kilkadziesiąt razy większe niż Słońce – wytwarzają się warunki sprzyjające powstawaniu pulsacji jej zewnętrznych warstw. Okresowym, kilkuprocentowym zmianom

Ilustracja pomiaru odległości do Wielkiego Obłoku Magellana. Drogowskaz umieszczony w obserwatorium Las Campanas wskazuje odległości do Wielkiego Obłoku Magellana, Słońca i Warszawy.

ulega promień gwiazdy i temperatura powierzchni. W rezultacie obserwator rejestruje charakterystyczne, okresowe zmiany jasności gwiazdy. Cefeidy są jednymi z najważniejszych i najlepiej poznanych gwiazd, ale choć są znane od ponad stu lat, nadal kryją wiele nierozstrzygniętych zagadek.

W 1968 r. zwrócono uwagę na to, że wartości podstawowego parametru determinującego właściwości i przyszłe losy Cefeid – ich masy – przewidywane przez teorie ewolucji i pulsacji gwiazd różnią się o około 20%. Niezgodność ta spędzała astronomom sen z powiek, gdyż jasno wskazywała na nieprawidłowości w naszym rozumieniu fizyki gwiazd. Rozwiązaniem problemu mógł być niezależny, bezpośredni pomiar mas Cefeid. Niestety, wszystkie dotychczasowe próby pomiaru mas Cefeid obarczone były bardzo dużymi błędami, sięgającymi 30%. Nie pozwoliły zatem rozstrzygnąć, która z teorii poprawnie przewiduje masę tych obiektów. Problem związany z masami Cefeid pozostawał nierozwiązany przez ponad 40 lat. Przełom nastąpił, kiedy zespół Araukaria dokonał analizy Cefeid w kilku układach podwójnych zaćmieniowych. Jak już wspomniałem, analiza takich układów pozwala na wyznaczenie parametrów fizycznych gwiazd z doskonałą precyzją. Dzięki tym badaniom zmierzono masy pięciu Cefeid z bezprecedensową dokładnością około 1%. Porównanie tak precyzyjnego wyniku pomiaru mas z rozważaniami teoretycznymi pozwoliło rozwiązać wieloletni problem związany z masami Cefeid. Teraz już wiemy, że masy Cefeid przewidywane przez teorię ewolucji gwiazd są o 20% zbyt wysokie.

Grzegorz Pietrzyński

Chcesz wiedzieć więcej?

Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. i inni (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant, *Astronomical Journal*, 116, 1009.

Pietrzyński G., Graczyk D. Gieren W. i inni (2013). An eclipsing-binary distance to the Large Magellanic Cloud accurate to two per cent, *Nature* 495, 76.

Pietrzyński G., Thompson I., Gieren W. i inni (2010). „The dynamical mass of a classical Cepheid variable star in an eclipsing binary system, *Nature* 468, 542.