

## Jak szybko rozszerza się Wszechświat?

Z pozoru niewinne, zawarte w tytule pytanie od kilku lat wywołuje gorące spory w środowisku kosmologów. Okazuje się bowiem, że aktualna dziś odpowiedź na nie brzmi: zależy, jak mierzy.

Zacznijmy jednak od podstawowych definicji. Tempo rozszerzania się Wszechświata opisujemy, podając prędkość zmian odległości między dwoma niezwiązanymi i nieoddziałującymi obiektami we Wszechświecie względem odległości między obiektami. Wynik wyznaczony dziś nosi nazwę stałej Hubble'a, ale – wyznaczony we wcześniejszych chwilach ewolucji Wszechświata – miałby inną wartość, dlatego lepiej byłoby go nazywać parametrem Hubble'a określonym dla danej chwili. Parametr Hubble'a ma wymiar odwrotności czasu, podobnie jak częstotliwość, ale najwygodniej jest używać jednostek  $\text{km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$ . Parametr ten w tych jednostkach ma wartość  $67,4 \pm 0,5$  według pomiarów satelity Planck lub  $74,0 \pm 1,4$  według pomiarów drabiny odległości. Drastyczna niezgodność tych dwóch wyników jest źródłem wspomnianych kontrowersji.

Może różne metody pomiaru stałej Hubble'a powodują, że wyniki obarczone są jakimś dodatkowym błędem? Przyjrzyjmy się im zatem nieco dokładniej.

Zespół naukowy satelity Planck mierzy niejednorodności mikrofalowego promieniowania tła, które zostało wyemitowane, gdy Wszechświat miał kilkaset tysięcy lat. Aby określić strukturę tych niejednorodności, należy wiedzieć, jak szybko w tak wczesnym Wszechświecie przemieszczały się zaburzenia gęstości i ciśnienia, które w normalnych okolicznościach nazwalibyśmy po prostu dźwiękiem. To zależy od wzajemnych proporcji liczby nukleonów i fotonów we wczesnym Wszechświecie, czyli od parametrów założonego modelu kosmologicznego. Wiedząc, jakie są rozmiary niejednorodności, możemy zmierzyć kąt, pod jakim je widzimy, a stąd określić, jak są daleko. Ta odległość jest związana z tempem rozszerzania się Wszechświata od chwili wyemitowania mikrofalowego promieniowania tła aż do chwili obecnej oraz związana ze stałą kosmologiczną.

W październiku 2018 roku Międzynarodowa Unia Astronomiczna w głosowaniu (przewagą 78% głosów za) zdecydowała o zmianie nazwy prawa Hubble'a na prawo Hubble'a–Lemaître'a, uznając w ten sposób ważny wkład Georges'a Lemaître'a, który w 1927 roku przewidział istnienie zależności pomiędzy prędkością ucieczki galaktyki a odległością do niej.

Rodzi się tu pokusa, aby zwątpić w model kosmologiczny, jednak zgadza się on doskonale z wieloma innymi obserwacjami na tyle dobrze, że trudno coś w nim bezkarnie zmieniać.

Najdokładniejszy obecnie wynik wyznaczenia stałej Hubble'a za pomocą drabiny odległości pochodzi od zespołu SH0ES. Kieruje nim Adam Riess, który po uzyskaniu w wieku 42 lat Nagrody Nobla za odkrycie przyspieszonego rozszerzania się Wszechświata bynajmniej nie przeszedł na naukową emeryturę. Skonstruowana przez SH0ES drabina odległości pozwala na określenie zależności między przesunięciem ku czerwieni danego obiektu (patrz  $\Delta_{19}^4$ ) a jego odległością od nas. Dla pobliskich cefeid wyznacza się odpowiednią zależność metodą paralaksy. Pobliskie supernowe typu Ia występują odpowiednio często w towarzystwie odległych cefeid, można więc tę zależność wyznaczyć i dla nich, ekstrapolując wyniki uzyskane w poprzednim kroku. Kolejna ekstrapolacja pozwala na sięgnięcie do jeszcze dalszych supernowych i wiarygodne pomiary parametrów kinematyki Wszechświata w wielkiej skali.

Czytelników zaniepokojonych ekstrawagancką typografią akronimu użytego w powyższym akapicie uprzejmie informujemy, że  $H_0$  odnosi się do powszechnego oznaczenia stałej Hubble'a, występującego w nazwie zespołu kierowanego przez Riessa: *Supernovae,  $H_0$ , for the Equation of State of Dark Energy*.

Jasne jest już chyba, że w przypadku każdego z omawianych wyników hasło „naukowcy zmierzili” oznacza ogrom mrówczej pracy i współpracę wielu ekspertów o uzupełniających się kompetencjach.

Podstawowa kontrowersja bierze się z porównania rezultatów dla światła „starego”, czyli mikrofalowego promieniowania tła pochodzącego z pierwszych (w skali kosmicznej) epok po Wielkim Wybuchu, ze światłem „nowym”, wyświeconym przez gwiazdy. Czy można coś tu jeszcze poprawić? Jak najbardziej! – mówią najnowsze wyniki prac innych badaczy, w tym zespołu H0LiCOW.

Zarówno akronim określający buty, jak i święte krowy wydają się mieć umiarkowany związek z przedmiotem pomiarów.

Inna metoda wyznaczenia odległości do odległych obiektów wykorzystuje soczewkowanie grawitacyjne odległych kwazarów. Jeśli na drodze między takim źródłem a ziemskim obserwatorem stanie masywna galaktyka, obserwator zobaczy dwa obrazy źródła. Jeśli będą one się zmieniać w pewnym niewielkim odstępie czasowym, pozwoli to określić ilość materii na drodze tych promieni, a na tej podstawie – odległość do kwazara i do soczewkującej galaktyki. Te dane już wystarczają do niezależnego określenia stałej Hubble'a. Opublikowane w 2019 roku wyniki H0LiCOW ( $73,3 \pm 1,8$ ), choć obarczone sporą niepewnością, są zgodne z wynikiem SH0ES, a nie Plancka.

Pat trwa.

Krzysztof TURZYŃSKI