

## Co we Wszechświecie piszczy?

Od dawna nic, bo Wszechświat jest zbyt rzadki. Na początku było jednak inaczej. Żeby się o tym przekonać, wystarczy zrobić odpowiednio dokładne zdjęcie młodego Wszechświata, a następnie wykonać precyzyjną analizę odkształceń spowodowanych rozchodzącymi się falami dźwiękowymi. Obraz „Wszechświatka” dociera do nas stale w postaci mikrofalowego promieniowania tła. To promieniowanie reliktywne niesie informację o rozkładzie temperatury, w chwili gdy Wszechświat stał się przezroczysty dla promieniowania na skutek zrekombinowania elektronowo-protonowej plazmy w atomy wodoru. Nastąpiło to 300 tysięcy lat po wielkim wybuchu, gdy temperatura spadła poniżej 3000 K.

Promieniowanie reliktywne jest chyba najdoskonalszym przykładem promieniowaniem ciała doskonale czarnego. Obserwowany rozkład odpowiada obecnie temperaturze około 2,7 K, gdyż rozszerzający się Wszechświat stale stygnie.

Przestrzenny (kątowy) rozkład mierzonej w paśmie mikrofal temperatury nie jest idealnie jednorodny. Najłatwiej dostrzec anizotropię związaną z naszym (naszej Galaktyki) ruchem. Znacznie ciekawsze są jednak fluktuacje temperatury po raz pierwszy zmierzone (opublikowane) w 1992 roku przez zespół eksperymentu COBE (Cosmic Background Explorer). Odpowiadają one fluktuacjom gęstości, z których powinien wywodzić się obecny rozkład materii we Wszechświecie. Dane zebrane przez COBE dowodzą, że amplituda tych fluktuacji nie zależy od skali kątowej w zakresie od 10 do 90 stopni. Jest to zgodne z przewidywaniami modeli kosmologicznych.

Czas na tytułowy pisk. Dla mniejszych skal kątowych, rzędu jednego stopnia i jeszcze mniejszych, od dawna oczekiwano zaobserwowania szeregu wzmocnień fluktuacji. Położenie pierwszego maksimum powinno odpowiadać tzw. horyzontowi akustycznemu, czyli odległości, na jaką fluktuacja gęstości plazmy (czyli fala dźwiękowa) zdążyła się rozprzestrzenić w czasie od Wielkiego Wybuchu do rozdzielenia się promieniowania i materii. Następne wzmocnienia odpowiadałyby kolejnym harmonicznym „piskiem podstawowym”. Amplitudy kolejnych wzmocnień i odpowiadające im skale kątowe niosłyby informację o podstawowych parametrach kosmologicznych, takich jak stała Hubble’a czy całkowita gęstość energii  $\Omega_0$  oraz jej trzy składowe: gęstość barionowa  $\Omega_b$ , gęstość ciemnej materii niebarionowej  $\Omega_c$  i gęstość energii związana ze stałą kosmologiczną  $\Omega_\Lambda$ .

Przez ostatnie dziesięć lat wykonano szereg pomiarów z większą niż w przypadku COBE kątową zdolnością rozdzielczą. W tym roku dwa eksperymenty balonowe BOOMERANG i MAXIMA-1 opublikowały wyniki bezapelacyjnie dowodzące istnienia pierwszego ze spodziewanych maksimum [1]. Jego położenie na skali kątowej zależy w zasadzie tylko od geometrii Wszechświata zdeterminowanej całkowitą gęstością

energii. Wynika to stąd, że skoro potrafimy obliczyć liniowy rozmiar horyzontu akustycznego i naszą drogę, jaką przebyły fotony promieniowania reliktywego, to mierzony rozmiar kątowy horyzontu akustycznego zależy tylko od tego, ile wynosi suma kątów w odpowiednim trójkącie równoramiennym. Jeżeli, w zgodzie z przewidywaniami modeli inflacyjnych,  $\Omega_0 = 1$ , to przestrzeń jest euklidesowa, czyli suma kątów w dowolnym trójkącie wynosi  $\pi$ . Wyniki analiz dokładnych map promieniowania, zmierzonych przez eksperymenty BOOMERANG i MAXIMA-1, okazały się zgodne z tym przewidywaniem (w granicach błędu pomiarowego).

Na marginesie warto zauważyć związaną z tym wynikiem eksplozję artykułów o naleśnikach i siodłach, w których poglądowo tłumaczy się, że Wszechświat jest płaski jak naleśnik, choć mogłyby być krzywy jak siodło lub jak sfera. Z mojego doświadczenia wynika całkowita bezużyteczność, jeżeli nie szkodliwość takiego „poglądowego” tłumaczenia zwłaszcza ujemnej krzywizny przestrzeni, gdyż siodło (w przestrzeni euklidesowej), w odróżnieniu od przestrzeni o ujemnej krzywiznie, nie może mieć symetrii obrotowej. Żeby pojąć, o co chodzi, trzeba i tak najpierw zrozumieć jakąś wersję związku krzywizny z wartością sumy kątów w trójkącie. Gdzie więc ta poglądowość?

Wróćmy jednak do naszych pisków. Z dokładniejszej analizy wynika, że ze zmierzonymi mapami promieniowania reliktywego zgodne są tylko te wersje modeli inflacyjnych, w których występuje albo niebarionowa ciemna materia, albo stała kosmologiczna, a najlepiej i jedno, i drugie. Wtedy wyniki zgadzają się też z innymi pomiarami, np. ograniczeniami wynikającymi z pomiaru przesunięcia ku czerwieni odległych supernowych typu Ia lub pomiarów struktury wielkoskalowej [2]. Dodatkowo analiza wskazuje na większą niż wynikająca z modelu nukleosyntezy gęstość materii barionowej. Rozbieżność jest na poziomie 2–3 odchyłeń standardowych (a nie 23, jak wydrukowano w artykule G. Mussera we wrześniowym *Świecie Nauki*). Biorąc pod uwagę skomplikowaną interpretację wyników, uznałbym to raczej za zadziwiająco dobrą zgodność.

Przyszłość pomiarów promieniowania reliktywego rysuje się bardzo ciekawie. Część już zebranego materiału czeka jeszcze na opracowanie, a na wiosnę ma być wyniesiony na orbitę instrument MAP, dzięki któremu powinniśmy uzyskać dużo dokładniejszych map promieniowania. Natomiast w 2007 roku planowane jest umieszczenie w tym samym punkcie Lagrange’a L2 układu Ziemia-Słońce aparatu PLANCK, który powinien całkowicie wyzyskać muzykę parametrów kosmologicznych utrwaloną w promieniowaniu doskonale czarnego młodego Wszechświata.

Piotr ZALEWSKI

[1] *Cosmology from MAXIMA-1, BOOMERANG & COBE/DMR CMB Observations*, A.H. Jaffe i inni, astro-ph/0007333

[2] A.E. Lange i inni, astro-ph/0005004