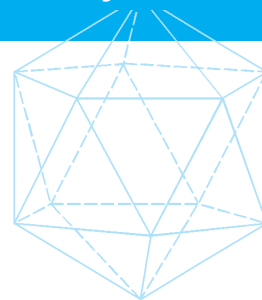




Osiągnięcia Nauki i Techniki Kierunki Rozwoju i Metody

KONWERSATORIUM POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
Wkładka nr 9 do Miesięcznika Politechniki Warszawskiej nr 11/2006

Redaktor merytoryczny — Stanisław Janeczko



W jakim Wszechświecie żyjemy?

Na podstawie odczytu wygłoszonego w dniu 27 kwietnia 2006 roku

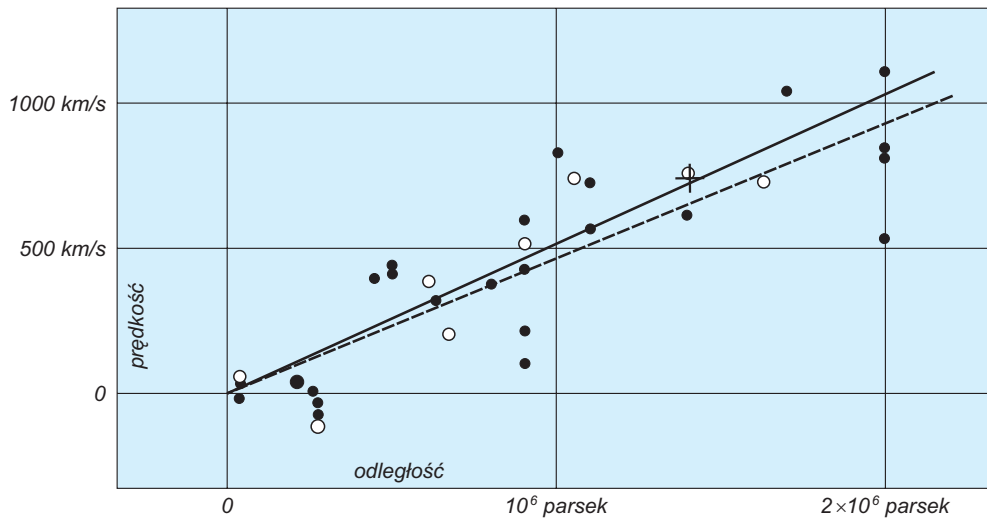
Kazimierz Stępień

Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Warszawskiego
e-mail: kst@astrouw.edu.pl

Kosmologia, traktowana jako nauka ścisła, nie istniała do początku XX wieku. Do tego czasu nieznany był (nawet w grubym przybliżeniu) wiek wszechświata, ani jego rozmiar. Wiadomo było, że Słońce znajduje się w rozległym układzie gwiazdowym — galaktyce, ale nie wiadano nic o jego granicach, a tym bardziej o tym, co znajduje się poza nimi. Stan wiedzy na temat wszechświata na przełomie XIX i XX wieku tak został podsumowany w monumentalnym dziele encyklopedycznym *Wszechświat i Człowiek*, wydanym (w tłumaczeniu polskim) w 1906 roku pod redakcją Jana Kremera: *O początek i koniec wszechrzeczy nie troszczy się wiedza przyrodnicza. Wie dobrze, że nieumiarkowane takie dążności, jakby mamidła, uwodziły myśl naszą coraz głębiej w pustynię dogmatów jałowych*. Jak widać, autorzy słusznie uznali, że przy zupełnym braku faktów obserwacyjnych, nauka powinna powstrzymać się od zajmowania się problemem powstania i budowy wszechświata.

W początkach XX wieku dokonano kilku ważnych odkryć, które zasadniczo zmieniły tę sytuację. Odkrycie radioaktywności zaowocowało metodami datowania,

które pokazały, że Ziemia, a zatem i cały wszechświat, istnieje co najmniej kilka miliardów lat. Odkryto, że poza naszą Galaktyką istnieją inne, podobne układy gwiazd wypełniające wszechświat aż do najdalszych obserwowanych jego granic. W 1916 roku Albert Einstein opublikował ogólną teorię względności (OTW) — idealne narzędzie do modelowania całego wszechświata. Autor ogólnej teorii względności od razu sam wykorzystał ją do tego celu. Zgodnie z ówczesnym stanem wiedzy przyjął, że wszechświat jest niezmienny i statyczny. By zbudować taki model, wprowadził *ad hoc* oddziaływanie między galaktykami równoważące grawitację. Odpowiedni człon w równaniach ogólnej teorii względności zawierał tzw. stałą kosmologiczną i miał sens siły odpychającej — rosnącej wraz z odległością. Taka zależność powodowała, że oddziaływanie między bliskimi obiektami (gwiazdami, czy nawet sąsiednimi galaktykami) było zaniedbywane, ale cały wszechświat nie zapadał się pod wpływem grawitacji. Kolejnego odkrycia, uważanego za najważniejsze w historii kosmologii, dokonał Edwin Hubble, który zmierzył odległości do kilkudziesięciu bliskich galaktyk i zauważył, że (obserwowane wcze-



Rysunek 1. Oryginalny wykres Hubble'a. Czarne kropki odpowiadają indywidualnym galaktykom, a kółka średnim dla kilku galaktyk

śniej) przesunięcie ku czerwieni linii widmowych galaktyk jest proporcjonalne do ich odległości (rys. 1). Stała proporcjonalności nazwana została stałą Hubble'a. Interpretując przesunięcie ku czerwieni, jako efekt oddalania się od siebie galaktyk, i uogólniając prawo Hubble'a na cały wszechświat wnioskujemy, że wszechświat rozszerza się. Taki model nie wymaga członu kosmologicznego, ale sugeruje, że wszechświat musiał mieć początek. Wprawdzie nie możemy zbliżyć się z fizycznym opisem dowolnie blisko czasu $t = 0$, gdyż w formalnym opisie natrafiamy na osobliwość — zerowy rozmiar i nieskończoną gęstość — ale możemy pokusić się o opis wszechświata od momentu, gdy osiągnął tzw. rozmiar Plancka (około 10^{-35} cm), co nastąpiło w wieku 10^{-45} s.

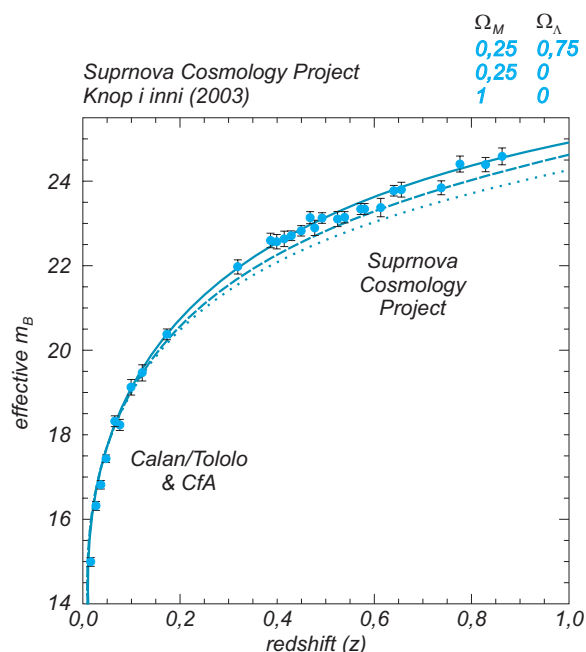
Tworząc ewolucyjny model wszechświata czynimy pewne założenia. Zakładamy mianowicie, że znane nam prawa fizyki (w tym ogólna teoria względności) obowiązują zawsze i wszędzie we wszechświecie oraz że wszechświat jest jednorodny i izotropowy, a obserwowana przez nas jego część jest reprezentatywna dla całości (tzw. zasada kopernikańska). Z opisu wczesnych stadiów życia wszechświata wynikało, że w pierwszych minutach życia musiała zachodzić w nim nukleosynteza, podczas której około 1/4 masy zawartej w barionach zamieniło się w hel. Współczesne dane obserwacyjne potwierdzają, że pierwotna materia kosmiczna składała się z wodoru i helu w oczekiwanych proporcjach (pomijając znikome ilości litu i berylu). Z modelu wynikało też, że pamiątką po gorącej fazie powinno być wypełniające cały wszechświat promieniowanie elektromagnetyczne o rozkładzie widmowym odpowiadającym paru kelwinom. Odkrycie w 1965 roku promieniowania o temperaturze 2,73 K, nazwanego mikrofalowym promieniowaniem tła (MPT) uznano za koronny dowód poprawności ewolucyjnego modelu wszechświata powstałego w wyniku Wielkiego Wybuchu. Dokładne badanie mikrofalowego promieniowania tła i diagramu Hubble'a dla coraz odleglejszych obiektów, to obecnie dwa najważ-

niejsze źródła naszej wiedzy empirycznej o ewolucji wszechświata.

Jednorodność mikrofalowego promieniowania tła w obserwowanej części wszechświata, czyli w skali rzędu kilkunastu miliardów lat świetlnych, wymusiła wprowadzenie szczególnej fazy we wczesnym jego życiu, nazwanej fazą inflacyjną, podczas której w małym ułamku sekundy wszechświat zwiększył swoje rozmiary około 10^{30} razy. Dzięki temu obszar powiązany przyczynowo (w którym promieniowanie mogło zuniformizować się) może dzisiaj przewyższać wielokrotnie obserwowaną jego część. Jednak cena za wprowadzenie fazy inflacyjnej była wysoka. Po pierwsze, inflacja wymaga, by przestrzeń wszechświata miała zerową krzywiznę, czyli była płaska (euklidesowa), co automatycznie pociąga za sobą warunek na średnią gęstość masy–energii. Gęstość ta musi być równa pewnej wartości krytycznej. Ponieważ przestrzeń, zgodnie z mikrofalowym promieniowaniem tła, rozpięta jest na masie–energii zawartej we wszechświecie, to gdy gęstość jest dostatecznie duża, przestrzeń ma dodatnią krzywiznę (w dwóch wymiarach byłaby to sfera), a gdy jest zbyt mała, krzywizna jest ujemna. Wartość krytyczna rozdzielająca te dwie rodziny przestrzeni odpowiada przestrzeni płaskiej. Po drugie, by otrzymać inflację, trzeba było wprowadzić do równań ogólnej teorii względności człon podobny do kosmologicznego, który pojawia się w określonym momencie i przyjmuje ogromną wartość pozwalającą gwałtownie rozdać wszechświat, a potem zniknąć. Człon ten miałby pochodzić od *ad hoc* wprowadzonego pola fizycznego wypełniającego próżnię, które przy pewnej temperaturze (czyli w określonym momencie ewolucji wszechświata) dokonuje przejścia fazowego z wydzielaniem dużej ilości energii, ale z ujemnym ciśnieniem rozdymającym wszechświat (normalne — dodatnie ciśnienie działa jak masa i jest źródłem grawitacji). O ile weryfikacja istnienia i własności takiego pola jest obecnie poza naszym zasięgiem, o tyle wyznaczenie średniej

gęstości wszechświata wydaje się zadaniem nietrudnym. Wchodzą do niej wszelkie formy masy i energii. Zaczniemy zatem od tych form materii, które bezpośrednio obserwujemy. Nazwiemy je materią świecąca. Oceniając, w dostatecznie dużej objętości, masę wszystkich gwiazd i pozostałości po nich, materii międzygwiazdowej i międzygalaktycznej oraz znanych form promieniowania możemy obliczyć jej gęstość. Okazuje się, że jest bardzo mała, rzędu 5% wartości krytycznej. Z taką gęstością wszechświat byłby otwarty, o ujemnej krzywiznie i ekspandowałby w nieskończoność. Ale czy to wszystko? Okazuje się, że nie. Badanie dynamiki obiektów krążących na peryferiach galaktyk (np. obłoków materii międzygwiazdowej) wskazuje, że ich prędkości są o wiele za duże w stosunku do tych, jakie wynikają z przyciągania grawitacyjnego produkowanego przez samą materię świecąca. Ponieważ obłoki nie odrywają się od swoich galaktyk, musi na nie w istocie działać kilkakrotnie większa siła przyciągania. Stąd wynika, że większość masy galaktyki zawarta jest w nieznannej nam formie materii, nazwanej ciemną materią, która manifestuje swoją obecność wyłącznie przez oddziaływanie grawitacyjne. Ilościowa analiza dynamiki badanych obiektów oraz całych galaktyk poruszających się w układach wielokrotnych pozwala wyznaczyć dość dokładnie ilość ciemnej materii i policzyć odpowiadającą jej gęstość. Dostajemy wartość rzędu 25% wartości krytycznej. Łącznie mamy zatem około 30%, czyli wciąż ponad 3 razy mniej, niż wymagane przez inflację.

W 90-tych latach XX wieku podjęto próbę rozszerzenia diagramu Hubble'a na znacznie większe odległości — sięgające wielu miliardów lat świetlnych. Wyznaczono je przez obserwację wybranego typu gwiazd supernowych, służących jako świece standardowe, w odległych galaktykach. Niektóre z nich wybuchły, gdy wszechświat był dwukrotnie mniejszy, niż obecnie. Okazało się, że ówczesne tempo rozszerzania się wszechświata było mniejsze niż dzisiaj. To bardzo zaskakujący fakt, gdyż siły grawitacji spowalniają ekspansję, a więc dawniejsze tempo ekspansji powinno być większe niż obecne. Tymczasem obserwacje wskazują, że istnieje czynnik działający przeciwnie niż grawitacja i rozpychający wszechświat. A zatem, już po raz trzeci, dochodzimy do konieczności wprowadzenia niezerowej stałej kosmologicznej! Możliwie dokładne odtworzenie obserwowanego diagramu Hubble'a przez modele z różnymi wartościami parametrów wymaga, by wartość stałej kosmologicznej była taka, że odpowiadająca jej gęstość energii wynosi około 70% wartości krytycznej (rys. 2). Jest to energia ukryta w próżni fizycznej, a nazwano ją ciemną energią. W sumie dostajemy wymaganą przez inflację wartość. Kosmologowie odetchnęli z ulgą, tym bardziej że silne, niezależne potwierdzenie takiego modelu przyszło od obserwatorów mikrofalowego promieniowania tła. Teoretyczne modele przewidują, że powinniśmy obserwować na niebie fluktuacje mikrofalowego promieniowania tła przejawiające się jako niewielkie (rzędu 10^{-5}) odchylenia temperatury od średniej. Innymi słowy, niebo powinno być pokryte plamkami gorętsze-

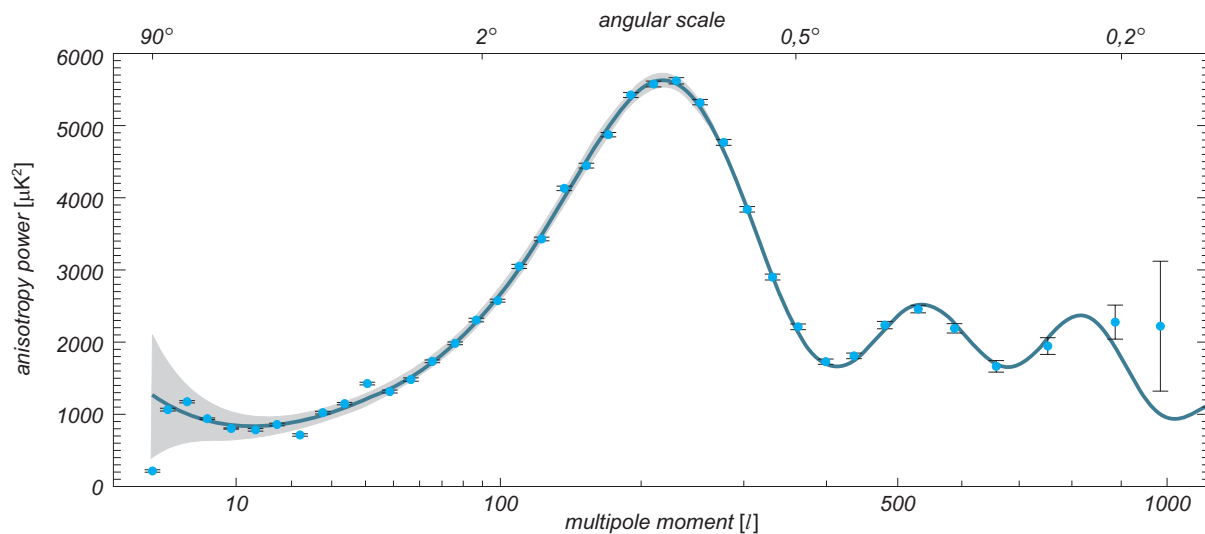


Rysunek 2. Współczesna wersja diagramu Hubble'a. Najlepiej dopasowana linia opisuje model przedstawiony w tekście artykułu. Ω_M i Ω_Λ są stosunkiem gęstości materii (świecącej i ciemnej) oraz gęstości ciemnej energii do gęstości krytycznej. Wykres Hubble'a z poprzedniego rysunku miałby tu rozmiar kropki w początku układu współrzędnych

go i chłodniejszego mikrofalowego promieniowania tła. Rozmiary kątowe plamek i amplituda odchyłek zależą od podstawowych parametrów wszechświata — krzywizny jego przestrzeni, względnej zawartości materii świecącej do ciemnej itd. Wieloletnie obserwacje tych fluktuacji potwierdziły model otrzymany na podstawie diagramu Hubble'a (rys. 3). Kosmologowie mogli więc podać stosunkowo dokładne wartości parametrów opisujących wszechświat, wraz z ich niepewnościami. Oto one:

- stała Hubble'a — 71 ± 4 km/sMpc (Megaparsek),
- średnia gęstość wszechświata (w jednostkach gęstości krytycznej) — $1,02 \pm 0,02$ w tym wkład:
 - materii baronowej (świecącej) — $0,044 \pm 0,004$
 - materii ciemnej — $0,22 \pm 0,04$
 - energii ciemnej — $0,74 \pm 0,04$
- obecny wiek wszechświata — $13,7 \pm 0,2$ mld lat
- wiek w momencie oddzielenia się mikrofalowego promieniowania tła od materii — 379 ± 8 tys. lat
- wiek w momencie powstania pierwszych gwiazd — około 200 mln lat

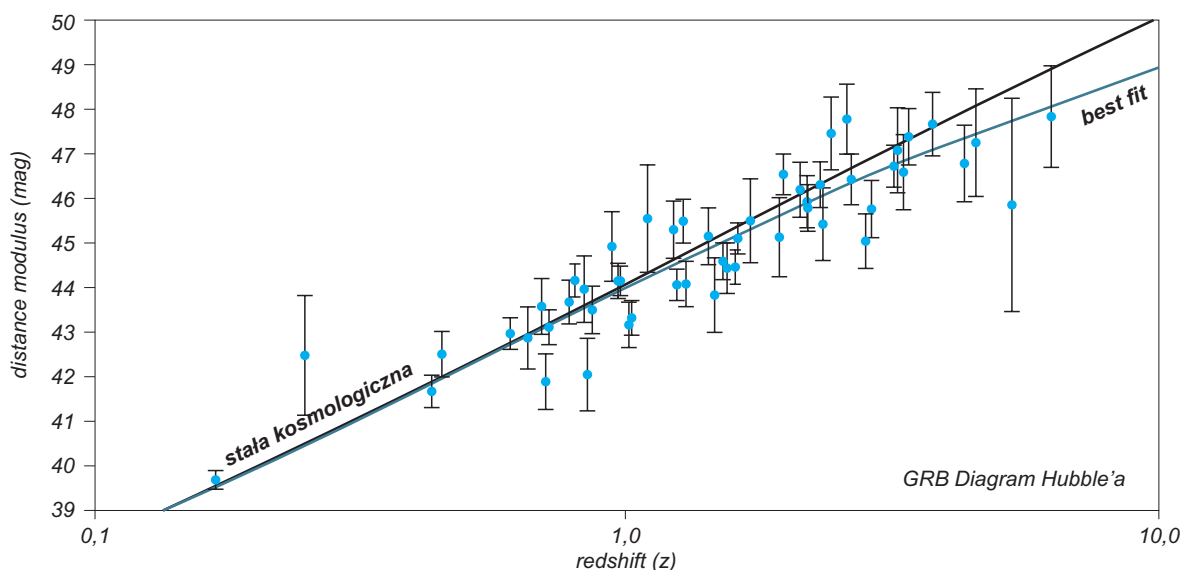
Wydawało się, że wiemy wreszcie, w jakim wszechświecie żyjemy — ma płaską (euklidesową) geometrię, jest nieskończony i będzie ekspandował nieskończenie. Dalsze badania, jak sądzono, zawężą jedynie granice niepewności tych parametrów. Tymczasem w 2006 roku ukazała się praca z diagramem Hubble'a sięgającym do o wiele większych odległości, niż ten otrzymany za po-



Rysunek 3. Amplituda fluktuacji temperatury mikrofalowego promieniowania tła w funkcji jej rozmiaru kąowego (dane z NASA/WMAP). Wielkość i położenie kolejnych maksimów zależy od parametrów wszechświata. Linia ciągła odpowiada modelowi opisanemu w tekście artykułu

mocą supernowych. Jej autor wykorzystał źródła rozbłysków promieniowania gamma jako świece standardowe (rys. 4). Wyniki wskazują, że stała kosmologiczna nie jest stała. Gdyby to była prawda, zamiast stałej należałoby wprowadzić do równań zmienną zależną od czasu, opisującą tzw. kwintesencję, a wynikający stąd model

wszechświata różniłby się od obecnie akceptowanego. Praca została przyjęta krytycznie, gdyż kalibracja źródeł rozbłysków jako świec standardowych jest kontrowersyjna i wymaga weryfikacji. Tym niemniej praca spowodowała, że aktualnie pozostaje nadal pytanie — w jakim wszechświecie żyjemy?



Rysunek 4. Opublikowany przez B. Schaefera w styczniu 2006 roku diagram Hubble'a. Zdaniem autora, model ze stałą kosmologiczną źle opisuje obserwacje

Abstract

Cosmology, as an exact science, was developed first in the XXth century. Discovery of the redshift-distance relation for galaxies by Edwin Hubble and General Relativity Theory by Albert Einstein resulted in a model of expanding Universe with Big Bang at the beginning. The recent observations and models consistently point towards the Universe which went through the inflation

phase early in its history, has a flat geometry with average density equal (within uncertainties) to the critical value and consists of dark energy, dark matter and the baryon matter in proportions 0.74 : 0.22 : 0.04. The dark energy, described by the cosmological constant, makes the expansion accelerate. Very recently there appeared a paper arguing that the cosmological constant may actually not be constant.