

Zmieniający się Wszechświat

Marek DEMIAŃSKI

Wiek dwudziesty w zasadniczy sposób zmienił nasze wyobrażenia o otaczającym nas świecie. Gromadzone przez poprzednie milennia obserwacje astronomiczne oraz niezwykle szybki postęp technologiczny, jaki się dokonał w ostatnich kilkudziesięciu latach, doprowadziły do powstania zupełnie nowej koncepcji Wszechświata.

W starożytności wyobrażano sobie, że Ziemia z krążącymi wokół niej planetami i Słońcem znajduje się w centrum Wszechświata. Gwiazdy rozmieszczone są na sferze o średnicy znacznie większej od odległości między Ziemią i Słońcem i tworzą niezmiennie tło. Poza sferą gwiazd stałych jest pustka. Ten obraz Wszechświata został dokładnie skodyfikowany przez Ptolemeusza i przetrwał ponad tysiąc lat.

Pierwszego poważnego wyłomu w tym prostym obrazie Wszechświata dokonał Kopernik, który umieścił Słońce w centrum Wszechświata, a Ziemię sprowadził do roli jednej z planet.

Zbudowanie pierwszej lunety przez Galileusza w 1609 roku i zastosowanie jej do obserwacji astronomicznych spowodowało znacznie szybszy rozwój astronomii. Galileusz odkrył nie tylko kraterzy na Księżycu i księżycy Jowisza, ale wykazał, że Droga Mleczna składa się z gwiazd. W 1687 roku Izaak Newton publikuje swoje słynne *Principia*, zawierające trzy podstawowe prawa dynamiki oraz prawo powszechnego ciążenia. Okazuje się, że ciała niebieskie podlegają takim samym prawom fizyki jak, na przykład, piłka. Śledzenie ruchu ciał niebieskich nic jednak nie mówi o ich naturze. Opracowanie przez R.W. Bunsena i G. Kirchhoffa analizy widmowej i zastosowanie jej do badania widm gwiazd spowodowało szybki rozwój astrofizyki.

Coraz to doskonalsze teleskopy pozwoliły na penetrowanie coraz to dalszych obszarów nieba. Głównym problemem astronomii tamtych czasów była klasyfikacja gwiazd oraz poznanie rozmiarów i struktury Drogi Mlecznej. Problem ten nie był wcale trywialny, gdyż, po pierwsze, obserwujemy Galaktykę z jej wnętrza i nie możemy, niestety, popatrzeć na nią z góry lub z boku, a po drugie bardzo trudno jest zmierzyć odległości do gwiazd. Dzięki badaniom rozkładu gwiazd udało się stwierdzić, że Galaktyka ma kształt dysku. Średnica dysku Galaktyki wynosi około 160 tysięcy lat świetlnych, a jego grubość około 1000 lat świetlnych. Przypomnijmy, że rok świetlny to droga, jaką sygnał świetlny, poruszający się z prędkością 300 000 km/s, przebywa w ciągu roku. Jeszcze 70 lat temu wyobrażano sobie, że cały Wszechświat to Droga Mleczna, a poza nią jest już tylko pusta przestrzeń.

Do obiektów należących do Galaktyki zaliczano też mgławice, które wyglądają jak obłoki świecącego gazu, niektóre o spłaszczonych kształtach wskazujących na ich obrót (tzw. mgławice spiralne) oraz, szczególnie w płaszczyźnie Galaktyki, gaz i pył. Na początku dwudziestego wieku astronomowie zainteresowali się mgławicami spiralnymi. V. Slipher rozpoczął systematyczne badania widm tych mgławic. Wkrótce stwierdził, że widma mgławic spiralnych nie są typowe – wszystkie dające się zaobserwować linie widmowe tych mgławic są przesunięte ku czerwieni, a znacznie rzadziej ku niebieskiej stronie widma. Astronomowie znali już gwiazdy o nietypowych widmach – linie widmowe tych gwiazd periodycznie zmieniały swoje położenie. Przesuwanie się linii to wynik ruchu gwiazdy w układzie podwójnym. Typowe prędkości takich gwiazd to kilkadziesiąt kilometrów na sekundę. Ziemia w swoim rocznym ruchu wokół Słońca porusza się z prędkością ≈ 30 km/s. Z przesunięcia prążków widmowych mgławic spiralnych wynika, że poruszają się one z bardzo dużymi prędkościami, znacznie większymi od typowych prędkości gwiazd. Problem mgławic spiralnych stawał się coraz bardziej intrygujący.

Kiedy w 1917 roku uruchomiono na Mount Wilson w Kalifornii największy wówczas teleskop o średnicy zwierciadła 2,5 m, został on wykorzystany



Rozwiązanie zadania M 907.

Rozważmy drużynę A , która wygrała co najmniej tyle meczów, ile przegrała (taka zawsze istnieje). Niech S będzie zbiorem wszystkich drużyn, które wygrały z A . Oczywiście $S \neq \emptyset$. Z warunków zadania wynika, że dla dowolnej drużyny $B \in S$ istnieje drużyna z tegoż zbioru, która wygrała z B . Tak więc zbiór S musi mieć co najmniej 3 elementy. Drużyn pokonanych przez A jest więc też co najmniej 3. Wszystkich drużyn jest co najmniej $3 + 3 + 1 = 7$.

Uwaga: Proponuję Czytelnikom udowodnienie następującego uogólnienia:

Jeśli dla dowolnych k drużyn ($k \geq 2$) istnieje drużyna, która wygrała z każdą z nich, to liczba drużyn w turnieju jest równa co najmniej $2^{k+1} - 1$.

W innych jednostkach
 $H \approx 75 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$



Rozwiązanie zadania M 908.

Średnia liczba wygranych przypadająca na drużynę wynosi $3,5$, a więc istnieje drużyna A , która wygrała co najmniej 4 mecze. Na każdą spośród (pewnych) czterech drużyn, które przegrały z A , przypada średnio $1,5$ wygranych w meczach pomiędzy nimi. Tak więc znajdzie się wśród nich taka (B), która wygrała z co najmniej dwiema z tych drużyn, które oznaczymy odpowiednio przez C i D .

Uwaga: Zadanie można uogólnić:

Jeśli w turnieju uczestniczyło $2^n - 1$ drużyn, to można znaleźć taki ciąg różnych drużyn A_1, A_2, \dots, A_n , że dla dowolnych $i > j$ drużyna A_i wygrała z A_j .

do badania mgławic spiralnych. W 1923 roku Edwin Hubble odkrył, że mgławica Andromedy jest zbudowana z gwiazd, a następnie wypatrzył gwiazdy w kilku innych mgławicach spiralnych. Aby rozstrzygnąć, czy mgławice spiralne należą do Drogi Mlecznej, czy też są to obiekty pozagalaktyczne, trzeba było znaleźć sposób wyznaczania odległości do nich. Rok później Hubble wypatrzył w Andromedzie cefeidy. Cefeidy to gwiazdy, których jasność ulega okresowym zmianom. Dla cefeid udało się empirycznie wyznaczyć zależność między okresem zmian jasności a jasnością maksymalną. Mierząc dla cefeidy okres zmian jasności, co nie jest trudne, z tej empirycznej zależności można wyznaczyć jej jasność absolutną, a więc i odległość, gdyż jasność maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości. Okazało się, że Andromeda znajduje się w odległości około 2 milionów lat świetlnych, czyli daleko poza granicami Drogi Mlecznej. Wkrótce, korzystając z tej metody, Hubble wyznaczył odległości do kilkunastu innych mgławic, które też leżały poza Drogą Mleczną. W ten sposób Hubble odkrył świat galaktyk.

Korzystając z podstawowych danych o prędkości ruchu galaktyk i ich odległościach, w 1929 roku Hubble zauważył, że powiązane są one liniową zależnością. Prędkość oddalania się galaktyki jest proporcjonalna do jej odległości

$$v = H \cdot d,$$

a współczynnik proporcjonalności H nosi obecnie nazwę stałej Hubble'a. Z wielu różnych obserwacji wynika, że stała Hubble'a wynosi $H = (20 \pm 3) \text{ km/s}$ na milion lat świetlnych. Galaktyka, która znajduje się w odległości 100 milionów lat świetlnych, oddala się od nas z prędkością około 2000 km/s. Odkryte przez Hubble'a rozszerzanie się Wszechświata stanowi podstawę współczesnych rozważań kosmologicznych.

Aby poznawać Wszechświat, trzeba umieć wyznaczać podstawowe parametry galaktyk i dysponować modelem opisującym strukturę Wszechświata. W 1916 roku Albert Einstein sformułował ogólną teorię względności – relatywistyczną teorię grawitacji, która wiąże rozkład materii z geometrycznymi własnościami czasoprzestrzeni. Nawet wielki Einstein tak bardzo wierzył w to, że cały Wszechświat to Droga Mleczna zanurzona w pustej przestrzeni, iż jego model kosmologiczny opisywał statyczną przestrzeń.

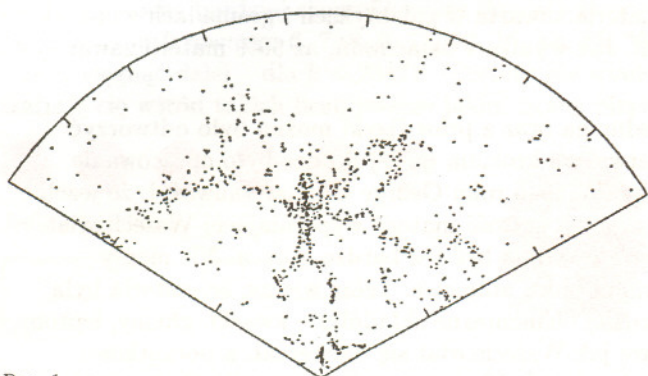
Jeszcze zanim Hubble odkrył fakt rozszerzania się Wszechświata, Aleksander Friedman w 1922 roku wykazał, że równania ogólnej teorii względności przewidują istnienie ewoluującego Wszechświata. Friedman założył, że Wszechświat jest w sposób jednorodny i izotropowy wypełniony materią, czyli żaden punkt i żaden kierunek we Wszechświecie nie są wyróżnione. Z równań Friedmana wynika, że Wszechświat musiał mieć początek! Dalsza ewolucja Wszechświata zależy od średniej gęstości materii we Wszechświecie. Jeżeli średnia gęstość materii we Wszechświecie jest większa od gęstości krytycznej, która jest wyznaczona z zależności $\rho_{\text{kryt}} = \frac{3H^2}{8\pi G}$, (tutaj G to stała grawitacyjna), to Wszechświat osiągnie pewne maksymalne rozmiary, po czym zacznie się kurczyć i w końcu materia zostanie ściśnięta do nieskończonej gęstości (powstanie stan osobliwy). Jeżeli średnia gęstość materii jest mniejsza lub równa gęstości krytycznej, to Wszechświat będzie się rozszerzał wiecznie, a gęstość materii będzie malała do zera.

Prawo Hubble'a pozwala w łatwy sposób wyznaczać odległość do galaktyk. Jeżeli znamy wartość stałej Hubble'a, to do wyznaczenia odległości potrzebna jest tylko znajomość widma, a dokładniej tzw. parametr z , czyli względne przesunięcie linii widmowych. Początkowo wydawało się, że wąskim gardłem w tej procedurze jest konieczność uzyskania widma. Na początku lat trzydziestych, aby uzyskać widmo galaktyki, trzeba było obserwować ją przez kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt godzin. Później okazało się, że problemem jest też wartość stałej Hubble'a. Nic więc dziwnego, że liczba galaktyk, do których znana była odległość, wzrastała bardzo powoli. Wśród astronomów

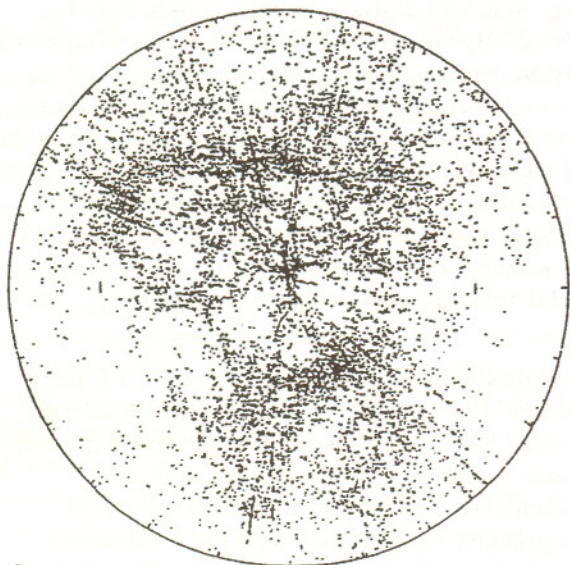
Nowszy wynik to $z = 6,68$.

zajmujących się obserwowaniem galaktyk trwała i trwa nadal rywalizacja w znajdowaniu jak najdalszych obiektów we Wszechświecie. W tej chwili najdalsza galaktyka ma $z = 5,64$, znajduje się w odległości 10 miliardów lat świetlnych i oddala się od nas z prędkością $0,95 c!$ Po dokładniejszym zbadaniu okazało się, że jest to normalna galaktyka.

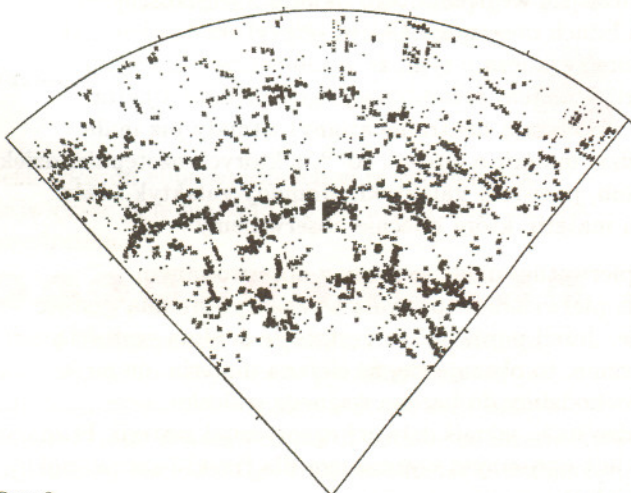
W ciągu ostatnich 30 lat dzięki nowym technologicznym możliwościom, a przede wszystkim wprowadzeniu elektronicznego sposobu zapisu obrazu (kamera CCD) oraz coraz większym teleskopom, dramatycznie zmieniły się możliwości obserwowania galaktyk. Na początku lat osiemdziesiątych grupa astronomów



Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3

z Harvard Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) postanowiła zrobić przestrzenną mapę rozkładu galaktyk w wybranym obszarze nieba. Już pierwsze wyniki były zaskakujące. Po naniesieniu położenia około 1000 galaktyk utworzyły one zgrupowanie przypominające swoim kształtem człowieka (tzw. patyczak z Harvard – rys. 1). Korpus tego kosmicznego ludka tworzą galaktyki z gromady galaktyk Coma. Przez kilka następnych lat rozszerzono ten przegląd i przebadano cały pasek na sferze niebieskiej. Wyniki tego przeglądu przedstawione są na rysunku 2. Galaktyki nie są w przestrzeni rozłożone przypadkowo. Istnieją wyraźnie widoczne płaskie ściano-podobne skupiska galaktyk ograniczające olbrzymie puste obszary, gdzie galaktyki nie występują prawie wcale. Tam, gdzie ściany się przecinają, występują gęste łańcuchy galaktyk, a w miejscach, gdzie przecinają się łańcuchy, widzimy bogate gromady galaktyk. Duże skupisko galaktyk (widoczne w górnej części rysunku 2) o długości sięgającej 500 milionów lat świetlnych, to tak zwana Wielka Ściana, której grubość wynosi około 20 milionów lat świetlnych. Pustki widoczne w przestrzennym rozkładzie galaktyk mają typowo średnice około 100 milionów lat świetlnych. Ściany skupiają około 60% galaktyk, natomiast zajmują jedynie około 10% objętości Wszechświata. W gęstych łańcuchach skupionych jest około 20% galaktyk, a pozostałe 20% galaktyk tworzy ubogie, słabo widoczne łańcuchy galaktyk. Ostatnio dokonano jeszcze głębszego przeglądu galaktyk we fragmencie południowego nieba. Wyniki tego przeglądu przedstawione są na rysunku 3.

Najdalsze galaktyki w tym przeglądzie są odległe od nas o około 1,5 miliarda lat świetlnych, są więc 3 razy dalej niż galaktyki z przeglądu CfA, ale nawet w tak dalekich obszarach galaktyki nie są rozłożone równomiernie i ich struktura rozkładu jest bardzo podobna do tej ujawnionej w przeglądzie CfA. Od dwóch lat zbierane są dane do najgłębszego z dotychczasowych przeglądów galaktyk, który ma skatalogować około 3 milionów galaktyk. Oczekuje się, że ten przegląd ujawni wreszcie rozmiary tzw. komórki jednorodności – obszaru, który będzie zawierał w przybliżeniu tyle samo galaktyk niezależnie od jego położenia.

Badanie galaktyk i gromad galaktyk doprowadziło do jeszcze jednego zaskakującego odkrycia. Jednym ze sposobów oceny masy galaktyki jest pomiar ilości światła emitowanego przez galaktykę. Nasze Słońce jest dość typową gwiazdą o znanej masie i znanej jasności (ilości energii emitowanej w ciągu sekundy), zatem dzieląc jasność galaktyki przez jasność Słońca, dowiadujemy się



Rozwiązanie zadania F 517.

Począs każdego rozpadu jądra atomu ${}_{92}\text{U}^{235}$ wydziela się energia $E_0 = 200 \text{ MeV}$. Podczas rozpadu porcji uranu o masie m na dobę wydziela się energia

$$E = \frac{mN_0}{M} E_0,$$

gdzie M – liczba masowa uranu ${}_{92}\text{U}^{235}$, N_0 – liczba Avogadra. Efektywna energia wyprodukowana przez elektronię w ciągu doby wynosi $E_1 = \eta E$. Z drugiej strony $E_1 = Pt$, gdzie P to moc elektronii, a t to czas pracy – czyli w tym przypadku 1 doba. Mamy zatem

$$Pt = \eta \frac{mN_0}{M} E_0$$

i stąd otrzymujemy

$$m = \frac{M Pt}{\eta N_0 E_0} \approx 0,031 \text{ kg} = 31 \text{ g}.$$



Rozwiązanie zadania F 518.

Energia fotonu $h\nu$ jest zużyta na wykonanie pracy A potrzebnej do wyjścia elektronu oraz na nadanie mu energii kinetycznej, zatem

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Aby zatrzymać elektrony, należy przyłożyć pole hamujące. Przy tym energia kinetyczna elektronu powinna być równa pracy pola elektrycznego eU . Wobec tego

$$h\nu_1 = A + eU_1 \quad \text{i} \quad h\nu_2 = A + eU_2,$$

skąd otrzymujemy

$$h = \frac{e(U_2 - U_1)}{\nu_2 - \nu_1} \approx 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

w przybliżeniu, z ilu gwiazd się ona składa, co daje nam informację o jej masie. Dla galaktyk spiralnych, które zawdzięczają swój kształt ruchowi obrotowemu, masę można oszacować metodami dynamicznymi (trzecie prawo Keplera), obserwując, z jaką prędkością gwiazdy obiegają centrum galaktyki. Masa galaktyki oszacowana dynamicznie jest od kilku do kilkudziesięciu razy większa od masy galaktyki oszacowanej na podstawie jej jasności. Znacznie trudniej jest oszacować masę gromady galaktyk, ale i w tym przypadku można zastosować dwie metody – ocenić masę gromady na podstawie jej sumarycznej jasności lub śledząc ruch galaktyk w gromadzie. Okazuje się, że typowa gromada galaktyk zawiera kilkaset razy więcej masy, niż wynikałoby to z ilości światła, które emituje. Ta nieświecząca materia zawarta w galaktykach i gromadach galaktyk nosi nazwę ciemnej materii. Jak wynika z oszacowań, aż 90% materii zawartej we Wszechświecie nie świeci.

Korzystając z modelu Friedmana oraz z praw fizyki można było odtworzyć historię Wszechświata. Pierwszym krokiem na tej drodze było opracowanie modelu Wielkiego Wybuchu. W 1946 roku George Gamow zauważył, że jeżeli w początkowych etapach ewolucji gęstość materii wypełniającej Wszechświat była bardzo duża, to materia powinna być też bardzo gorąca. Nie mogły wówczas istnieć ani atomy, ani jądra atomowe. Teraz wiemy, że materia była wówczas rozbita na najbardziej elementarne składniki – kwarki, gluony, leptoni, fotony i grawitony. W miarę jak Wszechświat się rozszerzał, a początkowo Wszechświat rozszerzał się bardzo szybko, zmniejszała się gęstość materii i temperatura. Po upływie około 10^{-5} s od Wielkiego Wybuchu gęstość materii i jej temperatura spadły na tyle, że mogła nastąpić zmiana składu materii (nastąpiło przejście fazowe) i pojawiły się protony i neutrony. Gdy temperatura spadła do około 10^9 K, czas życia deuteru, który powstawał dzięki ciągłym zderzeniom między protonami i neutronami, wzrósł na tyle, że mogły zacząć zachodzić kolejne reakcje jądrowe prowadzące w końcu do powstania trytu, helu i litu. Inne cięższe pierwiastki nie mogły powstawać, gdyż temperatura i gęstość zbyt szybko malały. Dokładna analiza procesu pierwotnej nukleosyntezy prowadzi do wniosku, że materia, z której powstały galaktyki i gwiazdy, była złożona w 25% z helu i 75% z wodoru. Po tym wczesnym okresie powinien pozostać ślad w postaci mikrofalowego promieniowania wypełniającego cały Wszechświat.

W 1965 roku dwaj radioastronomowie amerykańscy, Arno Penzias i Robert Wilson, odkryli to promieniowanie. Był to wielki tryumf modelu Wielkiego Wybuchu. Kilka lat temu satelita COBE (od COsmic Background Explorer) dokładnie zbadał promieniowanie reliktowe i potwierdził, że ma ono termiczny charakter, a jego obecna temperatura wynosi $2,726 \pm 0,005$ K. Tak jak oczekiwano, dokładne pomiary temperatury tego promieniowania w różnych obszarach nieba pozwoliły zmierzyć prędkość, z jaką Ziemia porusza się względem układu, w którym promieniowanie reliktowe jest izotropowe. Galaktyka porusza się względem tego układu z prędkością około 600 km/s. Po dwóch latach obserwacji COBE odkrył też bardzo małe fluktuacje temperatury, które świadczą o tym, że w momencie odprężania się promieniowania i materii (moment rekombinacji, gdy protony i jądra helu przyłączają elektrony i powstają neutralne atomy) istniały już małe niejednorodności w rozkładzie materii o $\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$, z których następnie, dzięki przyciąganiu grawitacyjnemu, powstały galaktyki, gromady galaktyk i cała złożona struktura rozkładu materii, którą obecnie obserwujemy.

Porównanie przewidywań pierwotnej nukleosyntezy z obserwowanym rozpowszechnieniem lekkich pierwiastków pozwala wyznaczyć średnią gęstość barionów we Wszechświecie. Jeżeli porównać tę gęstość ze średnią gęstością materii szacowaną dynamicznie, to okazuje się, że ciemna materia nie może być złożona z barionów! Dochodzimy do bardzo ważnego wniosku – we Wszechświecie istnieje bardzo dużo jakiejś dziwnej egzotycznej materii. Poznanie natury tej ciemnej materii jest ogromnym wyzwaniem dla fizyki i astronomii dwudziestego pierwszego wieku.