

Postępy kosmologii po roku 1974

Andrzej KRASIŃSKI*

1. Stan początkowy. W momencie ukazania się pierwszego numeru *Delty* kosmologia opierała się na następujących obserwacjach (o), konkluzjach (k) i postulatach (p):

- (I) (o) Inne galaktyki, poczynając od pewnej minimalnej odległości, oddalają się od naszej. Kierunek ruchu jest radialny, a prędkość v w przybliżeniu proporcjonalna do odległości d (prawo Hubble'a).
- (II) (k) W przeszłości średnia gęstość (a więc również temperatura) materii we wszechświecie musiała być większa niż obecnie, tym większa, im dalej w przeszłość patrzymy. Był taki okres w historii wszechświata, w którym temperatura i gęstość były zbyt wysokie, aby mogły istnieć atomy i cała materia była zjonizowana. Gdy temperatura spadła poniżej wartości potrzebnej do jonizacji atomów, musiało zostać wyemitowane promieniowanie, które powinno dotrzeć do naszych czasów.
- (III) (o) Kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła zostało zaobserwowane w roku 1965. Ma ono widmo charakterystyczne dla ciała doskonale czarnego o średniej temperaturze 2,73 K i dochodzi do Ziemi ze wszystkich kierunków. Odchylenia od średniej w poszczególnych kierunkach podzielone przez średnią temperaturę, $\Delta T/T$, były wówczas niewykrywalne przy błędzie pomiaru 0,01.
- (IV) (p) Wszechświat wydaje się w przybliżeniu izotropowy wokół nas. *Założono* więc, że wszechświat jest izotropowy wokół każdego obserwatora. Postulat ten, pod nazwą *zasady kosmologicznej*, jest do dziś dogmatem astronomii.

Punkt (III) wymaga komentarza. Izotropię promieniowania tła na poziomie 10^{-2} uznano za „zdumiewająco dokładny” dowód izotropii wszechświata. Okazało się potem, że oddziaływanie promieniowania tła z materią jest bardzo słabe i fluktuacje mogły ujawnić się dopiero na poziomie $\Delta T/T \approx 10^{-5}$. Takie właśnie fluktuacje zaobserwowano.

2. Odkrycie pustek w rozkładzie galaktyk (1978). Pierwszą poprawkę do opisanego wyżej stanu wniosło odkrycie „dziur” w przestrzennym rozkładzie galaktyk (S.A. Gregory i L.A. Thompson 1978). Do tamtego momentu zakładano, że elementarną „komórką” wszechświata jest pojedyncza galaktyka i że galaktyki są równomiernie rozłożone w przestrzeni, zgodnie z zasadą kosmologiczną. Okazało się, że przestrzenny rozkład galaktyk bardziej przypomina pianę na powierzchni wody w wannie, z galaktykami rozmieszczonymi na powierzchniach pęcherzyków o typowym promieniu około 60 Mpc. Wnętrza pęcherzyków są *prawie* puste – średnia gęstość materii w pustce wynosi od kilku do kilkunastu procent średniej gęstości w całym wszechświecie. Ogłoszono to jako wielkie odkrycie, chociaż z pewnych prac, opublikowanych 44 lata wcześniej, wynikało, że powszechnie używane w astronomii jednorodne i izotropowe modele kosmologiczne są niestabilne ze względu na powstawanie zagęszczeń i rozrzedzeń (R.C. Tolman 1934, N.R. Sen 1934). Gdyby prace te zostały w porę zrozumiane, odkrycie pustek nie byłoby niespodzianką.

Skąd wzięła się sprzeczność pomiędzy wcześniejszą wiarą a nowym odkryciem? Przed pracą Gregory'ego i Thompsona obserwacje sięgały tylko do niezbyt dalekich galaktyk i *w przybliżeniu* potwierdzały zasadę kosmologiczną.

Astronomowie wierzyli, że ta nieduża objętość jest reprezentatywną próbką całego wszechświata, a swoją wiarę głosili jako rzeczywistą wiedzę.

Odkrycie to wymaga jeszcze jednego komentarza. Nie istnieje metoda bezpośredniego pomiaru odległości do najdalszych galaktyk. Przy *oceniu* odległości do nich *zakłada się*, że prawo Hubble'a jest spełnione i *oblicza* z niego odległość. Występuje więc paradoks: gdy zakładamy, że wszechświat jest przestrzennie jednorodny (bo tylko w takim prawo Hubble'a obowiązuje), to z analizy obserwacji wychodzi nam, że materia w nim jest rozłożona niejednorodnie. Jeśli dopuścimy, że prawo Hubble'a nie obowiązuje, to jesteśmy bezradni (przynajmniej tymczasowo) wobec problemu wyznaczenia odległości, ale przyznajemy na starcie, że wszechświat nie jest jednorodny. Tak czy inaczej,



Rozwiązanie zadania F 895.

(a) Liczba elektronów równa jest, oczywiście, liczbie protonów w atomach naszego ciała. Każdy gramoatom pierwiastka to $N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23}$ atomów. Gramoatom to liczba gramów pierwiastka równa (z bardzo dobrym przybliżeniem sumie liczb protonów i neutronów jądra atomu). Ciało człowieka zbudowane jest głównie z atomów tlenu, węgla, wodoru, azotu. Poza wodorem wymienione pierwiastki występują niemal wyłącznie w postaci izotopów o równej liczbie protonów i neutronów, a więc w każdym ich gramoatomie mamy $N_A/2$ protonów. Wodór to niemal wyłącznie izotop ^1H najczęściej związany w cząsteczkach wody (stanowiącej składnik żywych komórek). W cząsteczce wody mamy 10 protonów i 8 neutronów, co oznacza, że jeśli pominiemy niewielką różnicę mas protonu i neutronu, to $5/9 = 0,55 \dots$ masy wody przypada na protony. Z dokładnością do 10% możemy więc przyjąć, że średnio 1 g naszego ciała zawiera około 0,5 g protonów, a więc około $N_A/2 \approx 3 \cdot 10^{23}$ protonów i tyle samo elektronów.

Poza wymienionymi w rozwiązaniu inne pierwiastki stanowią łącznie mniej niż 4% masy człowieka.

(b) Stosunek liczby protonów do liczby wszystkich nukleonów w jądrze jest dla większości naturalnie występujących izotopów bliski 0,5 i nieznacznie maleje ze wzrostem liczby atomowej do około 0,39 dla ^{238}U . Wyjątek (patrz (a)) stanowi wodór, który niemal wyłącznie występuje jako izotop ^1H , ale stanowi on niewielką część masy otaczających nas substancji (np. tylko 10% masy wody). Zatem dla otaczającej nas materii wynik jest taki sam, jak dla naszego ciała.

*Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika

zasada kosmologiczna jest w kłopotcie. Oficjalne stanowisko kosmologów jest następujące: zasada kosmologiczna obowiązuje, ale w większej skali. Elementarna komórka wszechświata jest większa niż pojedyncza galaktyka. Jaki jest jej rozmiar? Tu zapada kłopotliwe milczenie. Tak daleko, jak sięgają obserwacje rozkładu galaktyk, widać rozmaite struktury i nie widać powtarzalności w ich przestrzennym rozkładzie.

Gęstość krytyczna to taka, przy której przestrzeń stałego czasu jest zawsze płaska (tak astronomowie nazywają przestrzenie euklidesowe, czyli o zerowej krzywiznie).

3. Modele inflacyjne (1981). Niektórzy kosmologowie zauważyli pozorne paradoksy, wynikające z używanych wcześniej modeli wszechświata. Jednym z nich był „problem płaskości”: nawet jeśli uśredniona po przestrzeni gęstość masy ρ różni się od tzw. gęstości krytycznej ρ_{kr} o czynnik 100 w obecnej chwili, to w chwili $t_i = 10^{-34}$ sekund po Wielkim Wybuchu ułamek $(\rho - \rho_{kr})/\rho$ musiał być mniejszy niż 10^{-55} . Stan początkowy wszechświata musiał więc być niezwykle dokładnie dopasowany do krzywizny przestrzennej bliskiej zera. Drugim był „problem horyzontu”: wskutek skończonej prędkości światła w tej samej chwili t_i pojedyncza cząstka materii mogła otrzymać sygnał od ograniczonej liczby innych cząstek, nazwijmy tę liczbę n_i . Obecny obserwator, kilkanaście miliardów lat po Wielkim Wybuchu, mógł otrzymać sygnał od większej liczby cząstek, N_0 , przy czym $n_i/N_0 = 10^{-83}$. Jak to się stało, że obecnie promieniowanie tła jest tak dokładnie izotropowe, skoro przed jego emisją tylko niewielkie podzbiory cząstek mogły oddziaływać między sobą? Przecież oddziaływanie było konieczne dla wyrównania temperatur.

Modele inflacyjne (Alan Guth, 1981) proponują rozwiązanie tych problemów, postulując, że w okresie między mniej więcej 10^{-34} a 10^{-32} sekund po Wielkim Wybuchu wszechświat rozszerzał się w tempie wykładniczym i w tym czasie każda początkowa odległość powiększyła się około 10^{26} razy. Umożliwiło to kontakt, przed emisją promieniowania tła, pomiędzy wszystkimi widocznymi dziś na niebie obiektami.

Jeśli Czytelnikom podane wyżej rozumowania wydają się naciągane, proszę nie wątpić w siłę własnego rozumu. W chwili t_i średnia gęstość materii musiała być większa niż 10^{68} g/cm^3 , czyli 10^{54} razy większa niż w jądrze atomowym. Takich gęstości nie osiągnięto do dzisiaj w żadnym akceleratorze. Jeśli więc trzymamy się tradycji, że fizyka jest nauką empiryczną, to modele inflacyjne nie są teoriami fizycznymi. Do podobnego wniosku doszedł niedawno jeden z twórców idei inflacji, Paul Steinhardt, używając innego argumentu: modele inflacyjne mają tyle wolnych parametrów, że można je przystosować do każdego danych eksperymentalnych, a wobec tego nie są falsyfikowalne.

Modele te zdobyły ogromną popularność dzięki nieustającej kampanii reklamowej, prowadzonej przez autorów i entuzjastów, i z tego powodu musiały być wspomniane w niniejszym artykule. Ostrzegam jednak Czytelników, że jest to „odkrycie” z zakresu metafizyki. Wcześniejsze twierdzenia kosmologii (np. przepowiednia istnienia promieniowania tła) były oparte na wynikach doświadczeń laboratoryjnych. Twierdzenia modeli inflacyjnych można byłoby sprawdzić *wyłącznie* poprzez obserwacje kosmologiczne interpretowane przy użyciu spekulacji niemożliwych do sprawdzenia w laboratorium.

4. Odkrycie fluktuacji temperatury w promieniowaniu tła (1992).

Na przełomie lat 80. i 90. ubiegłego wieku dwa zespoły astronomów (ich kierownikami byli John Mather i George Smoot) przeprowadziły dokładne pomiary temperatury promieniowania tła dla różnych kierunków. Ich wynikiem ubocznym było precyzyjne potwierdzenie, że promieniowanie to ma widmo ciała doskonale czarnego. Wynikiem głównym było wykrycie kierunkowych fluktuacji temperatury o maksymalnej amplitudzie około $70 \mu\text{K}$, co odpowiada $\Delta T/T \approx 2,5 \cdot 10^{-5}$. Odkrycie to umożliwiło dalsze badania własności materii wszechświata w momencie emisji promieniowania tła, między innymi rozchodzących się w niej fal akustycznych. Smoot i Mather otrzymali za nie Nagrodę Nobla w roku 2006.

5. Przyspieszająca ekspansja wszechświata? (1998, 1999). Gwiazda, która wyczerpała zapasy swojego „paliwa” termojądrowego, zaczyna się zapadać – ciśnienie słabnącego promieniowania nie może zrównoważyć siły grawitacji. Jeżeli



Energia uwalniana w wybuchu supernowej jest w przybliżeniu równa energii, jaką wypromieniuje Słońce w ciągu całego swojego „życia”.



Rozwiązanie zadania F 896.

W obu przypadkach (kondensatora i przewodnika) przebieg linii sił pola elektrycznego jest taki sam: wektor natężenia pola elektrycznego \vec{E} w każdym punkcie powierzchni każdej z elektrod jest do tej powierzchni prostopadły, a jego wartość jest proporcjonalna do napięcia U między elektrodami. Powierzchniowa gęstość ładunku w każdym punkcie elektrody kondensatora jest równa $\epsilon_0 E$, gdyż przenikalność elektryczna powietrza jest praktycznie równa przenikalności próżni. Normalna składowa gęstości prądu jest także proporcjonalna do wartości pola E i jest równa E/ρ . W związku z tym, przy tym samym napięciu U , całkowity ładunek zgromadzony na powierzchni elektrod $Q = CU$ jest proporcjonalny do całkowitego prądu $I = U/R$, który popłynie po wypełnieniu kondensatora roztworem soli. Otrzymujemy więc:

$$R = \frac{\epsilon_0 \rho}{C}$$

Po podstawieniu danych liczbowych $R \approx 0,0133 \Omega$.

jakiś inny mechanizm nie powstrzyma zapadania się gwiazdy, to wśród różnych możliwych wariantów dalszego jej losu jest gwałtowny wybuch, uwalniający wielką energię, która jest wyswiecana w ciągu kilku tygodni lub kilku miesięcy. Wybuch taki, nazywany gwiazdą supernową, jest zjawiskiem bardzo rzadkim. Ostatnią supernową w naszej Galaktyce zaobserwowano bezpośrednio w roku 1604, a potem wykryto ślady po dwóch innych. Z obserwacji supernowych w innych galaktykach wynika, że w naszej Galaktyce średnio powinny zachodzić trzy takie wybuchy w ciągu stu lat.

Ewolucja gwiazdy prowadząca do wybuchu supernowej może przebiegać inaczej. W pierwszym stadium powstaje biały karzeł w układzie podwójnym. Jeśli gwiazda-towarzysz wyrzuca materię, to jej część opada na powierzchnię białego karła, doprowadzając w końcu do wybuchu. Ten rodzaj supernowych nazwano typem Ia. Ponieważ powstają one zawsze w takich samych warunkach, przyjmuje się, że ich maksymalna jasność absolutna jest zawsze taka sama. Mierząc strumień promieniowania supernowej docierający do Ziemi, można więc wyznaczyć odległość jasnościową d_L do niej. Można też zmierzyć przesunięcie ku czerwieni w jej widmie, przeliczyć je na prędkość ucieczki gwiazdy od nas, i obliczyć odległość d drugim sposobem, z prawa Hubble'a.

Wyniki takich pomiarów dla dużej liczby supernowych typu Ia opublikowały w latach 1998 i 1999 dwa zespoły astronomów, kierowane przez Adama Riessa i Saula Perlmuttera. Wyszło im, że $d_L > d$ we wszystkich przypadkach: supernowe były „pociemnione” względem tego, czego oczekiwano na podstawie używanego przedtem modelu ewolucji wszechświata. Przymierzając do swoich wyników różne nowe modele (ale tylko takie, w których gęstość materii jest stała w przestrzeni i może się zmieniać jedynie z upływem czasu), doszli oni do wniosku, że najlepsze dopasowanie daje model, w którym obecnie przestrzeń rozszerza się ruchem przyspieszonym. Jest to możliwe tylko wtedy, gdy istnieje oddziaływanie odpychające, przeważające nad przyciąganiem grawitacyjnym. Źródło tego oddziaływania nazwano „ciemną energią” i ogłoszono, że jest to „największa zagadka współczesnej astronomii”.

Wprowadzanie nowego bytu nie jest jednak konieczne. Wystarczy dopuścić do konkurencji ogólniejsze modele wszechświata, w których gęstość materii nie jest stała w przestrzeni. Najprostszy z nich, nazywany modelem Lemaitre'a–Tolmana, pozwala wyjaśnić wyniki obserwacji supernowych Ia na dwa sposoby. W pierwszym wybuch początkowy nie zachodzi równocześnie dla wszystkich cząstek wszechświata. Cząstki bliższe obserwatora są z Wielkiego Wybuchu wyrzucane później niż dalsze, wobec tego w momencie obserwacji są „młodsze” i oddalają się od obserwatora z większą prędkością. W drugim sposobie cząstki bliższe obserwatora „rodzą się” z większą prędkością początkową, dając ten sam efekt w obserwacjach. W obydwu przypadkach złudzenie rosnącej z czasem prędkości ekspansji powstaje wskutek zmniejszania się tej prędkości z odległością od obserwatora. Przy takim opisie „ciemna energia” jest niepotrzebna – wszechświat rozszerza się ruchem opóźnionym. Jedyne odstępstwo od tradycyjnej kosmologii w tym modelu jest takie, że prędkość ucieczki galaktyk nie jest dokładnie proporcjonalna do ich odległości od nas. Większość astronomów wierzy jednak w ciemną energię, a odkrycie z lat 1998/99 zostało wyróżnione Nagrodą Nobla dla Riessa, Perlmuttera i Briana Schmidta w roku 2011.

6. Wiedza a przekonanie. Przez wszystkie etapy historii kosmologii przewija się jeden wspólny motyw: ubieranie niewiedzy w pozory wiedzy. Następujące potem zdemaskowanie niewiedzy jest przedstawiane jako zaskakujące odkrycie. Tak było w roku 1928, gdy z obserwacji Hubble'a wynikło, że wszechświat się rozszerza. Przedtem astronomowie *wiedzieli*, że jest niezmienny w czasie. Tak było w roku 1978, gdy odkryto pustki. Przedtem astronomowie *wiedzieli*, że przestrzeń jest równomiernie wypełniona galaktykami. Tak było w roku 1992, gdy odkryto fluktuacje temperatury promieniowania tła. Przedtem astronomowie *wiedzieli*, że promieniowanie to jest izotropowe ze zdumiewającą dokładnością. Teraz astronomowie *wiedzą*, że wszechświat rozszerza się ruchem przyspieszonym i nie chcą słuchać, że obserwacje supernowych typu Ia można wyjaśnić inaczej. Pewnie czeka nas kolejne zaskoczenie. . .