

# Kosmiczna depresja czy akceleracja, czyli o interpretacji danych obserwacyjnych

Krzysztof BOLEJKO\*



## Rozwiązanie zadania F 716.

Gwiazdy okrążają środek masy, znajdujący się w połowie odległości między nimi. Powtarzając rachunki z zadania 715, otrzymujemy, że ich prędkość kątowna wynosi

$$\omega_1 = \sqrt{2GM/r^3}.$$

Prędkość kątowna planety wynosi natomiast

$$\omega_2 = \sqrt{2GM/x^3},$$

przy czym przyjęliśmy, że planeta okrąża jednocześnie każdą z gwiazd i przyrównaliśmy wartości wynikającej z tego ruchu siły odśrodkowej oraz siły przyciągania grawitacyjnego między planetą i każdą z gwiazd. Z powyższych dwóch wzorów otrzymujemy  $x = r$ . Części warunków zadania odpowiada jeszcze przypadek  $x = r/2$ , zachodzący, gdy planeta znajduje się w punkcie, wokół którego obracają się dwie gwiazdy. Jednak układ nie tworzy wtedy trójkąta.

Z lekcji fizyki w szkole lub z wykładów na studiach można odnieść wrażenie, że proces poznawczy w nauce odbywa się w sposób bardzo zorganizowany. Mianowicie, od prostych uogólnień danych doświadczalnych przechodzimy do rozbudowanych teorii, sama zaś interpretacja danych empirycznych jest zawsze jednoznaczna i bezwzględnie kształtuje ramy teorii naukowych. W praktyce jednak badania naukowe rządzą się innymi prawami. To prawda, że dane empiryczne kształtują teorie, ale należy mieć świadomość, że interpretacja doświadczeń także zależy od teorii, w ramach których te doświadczenia się analizuje.

Łatwo bowiem zauważyć, że te same obserwacje można interpretować na wiele sposobów. Jest to szczególnie widoczne w astronomii, gdzie nie sposób zaprojektować od początku do końca eksperymentu, a tylko i wyłącznie ma się do czynienia z interpretacją danych obserwacyjnych. Przykładowo, obiektem niebieskim o zmiennej jasności może być zarówno gwiazda zmienna, jak i zaćmieniowy układ podwójny. Dopiero dokładniejsza analiza umożliwia rozróżnienie tych dwóch przypadków. Ale i obecnie trudno jest czasem odróżnić gwiazdy typu W UMa (układ podwójny) od gwiazd typu RRc Lyrae (gwiazdy zmienne). Gdy danych jest zbyt mało lub ich analiza jest szczególnie skomplikowana, różnych interpretacji może być bardzo wiele. Przykładowo, przy analizie obserwacji obiektów rentgenowskich, gdzie należy także uwzględnić zmienną (w zależności od charakteru zjawiska) czułość detektorów, może istnieć bardzo wiele różnych hipotez, które równie dobrze potrafią odtworzyć dane obserwacyjne.

Problem ambiwalentnych interpretacji jest szczególnie wyraźny w kosmologii, gdzie do opisu Wszechświata stosować należy ogólną teorię względności. Teoria Einsteina opisuje związek między geometrią czasoprzestrzeni a zjawiskami fizycznymi w niej zachodzącymi. W ogólnym przypadku równania Einsteina stanowią układ 10 równań różniczkowych cząstkowych, bardzo trudnych do rozwiązania. Z reguły więc przyjmuje się pewne założenia dotyczące geometrii czasoprzestrzeni (np. jednorodność, albo sferyczną lub osiową symetrię) lub własności materii (np. nierotujący pył lub płyn doskonały) albo jedno i drugie. Takie wstępne założenia bardzo upraszczają równania i w niektórych przypadkach prowadzą do otrzymania analitycznych rozwiązań opisujących ewolucję materii. Tak więc zależnie od przyjętych wstępnych założeń rozwiązania równań nie tylko przybierają różną postać, ale zarazem prowadzą do różnych interpretacji tych samych danych obserwacyjnych. Prześledźmy to na przykładzie obserwacji supernowych typu Ia.

Supernowe typu Ia są to wybuchy węglowo-tlenowych białych karłów, których masa na skutek akrecji materii z sąsiadującej gwiazdy przekracza graniczną masę Chandrasekhara. Materia białego karła przestaje wtedy tworzyć stabilną konfigurację, co prowadzi w szybkim tempie do eksplozji całego białego karła. Ponieważ warunki, jakie panują tuż przed wybuchem takich gwiazd, są zbliżone – węglowo-tlenowy biały karzeł o masie Chandrasekhara – obiekty te można traktować jak świece standardowe, a więc obiekty o znanej jasności. Dodatkowo, śledząc przebieg krzywej blasku supernowej Ia, można jeszcze dokładniej oszacować jasność obiektu w chwili wybuchu. Z kolei z tej oszacowanej jasności podczas wybuchu i obserwowanego strumienia można obliczyć odległość supernowej. Podczas obserwacji mierzy się także przesunięcie ku czerwieni. Porównując zależność mierzonej odległości od przesunięcia ku czerwieni z przewidywaną przez model Wszechświata teoretyczną zależnością między tymi wielkościami, można wyznaczyć wolne parametry modelu. I tak, dokonując takiej analizy w ramach jednorodnych modeli Friedmana (są to rozwiązania równań

\* Centrum Astronomiczne Mikołaja Kopernika, PAN



#### Rozwiązanie zadania M 1204.

Rozpatrzmy pięciokąt foremny wpisany w dany okrąg. Wówczas pewne trzy wierzchołki tego pięciokąta mają ten sam kolor. Pozostaje zauważyć, że każde trzy wierzchołki pięciokąta foremnego są wierzchołkami trójkąta równoramiennego.

Einsteina oparte na założeniu, że materia we Wszechświecie nie rotuje oraz że jest rozłożona równomiernie i wszędzie ma takie same własności), otrzymuje się, że stała kosmologiczna musi mieć dodatnie wartości, co z kolei implikuje, iż ekspansja Wszechświata przyspiesza.

Jeśli jednak przeprowadzić analizę supernowych w innym modelu niż jednorodny, można otrzymać zupełnie inne wnioski. I tak, rezygnując z założenia o jednorodności, ale utrzymując założenie o izotropowości (co dalej prowadzi do uzyskania ścisłych rozwiązań równań Einsteina), dostaje się sferycznie symetryczny model Lemaitre'a zwany także modelem Lemaitre'a–Tolmana lub Lemaitre'a–Tolmana–Bondiego. Przeprowadzając w nim analizę obserwacji supernowych, można uzgodnić je bez odwoływania się do stałej kosmologicznej. W takim przypadku rozkład materii musi być jednak specyficzny. Mianowicie, gęstość materii musi rosnać wraz z odległością, co sugeruje, jakobyśmy żyli w centrum wielkiej kosmicznej depresji czy w kosmicznym dole.

Skąd te różnice w interpretacji obserwacji supernowych? Najogólniej rzecz biorąc, pochodzą one stąd, że światło propaguje się w przestrzeni ze skończoną prędkością. Zatem światło wysłane z odległego obiektu, który obserwujemy teraz, musiało zostać wyemitowane odpowiednio dawno. Prowadzi to do dwóch możliwości dopasowania się do obserwacji – możemy manipulować zmiennymi zależnymi od czasu albo zależnymi od położenia. Aby dopasować się do obserwacji supernowych, należy więc albo przyjąć, że ekspansja przestrzeni była wolniejsza w przeszłości, albo że tempo ekspansji przestrzeni maleje wraz z odległością. Obie możliwości prowadzą do tej samej mierzonej zależności między odległością a przesunięciem ku czerwieni, a więc obie odtwarzają obserwacje supernowych z tą samą dokładnością.

W ramach jednorodnych modeli Friedmana, w danej chwili własności przestrzeni są w każdym punkcie takie same. A zatem tylko pierwsza powyżej przedstawiona możliwość może zostać zrealizowana. Druga możliwość wymaga bowiem, aby Wszechświat w różnych miejscach miał różne własności. W ramach realistycznych, ewolucyjnych i niejednorodnych modeli warunek malejącej wraz z odległością ekspansji implikuje, aby gęstość materii wzrastała wraz z odległością. Wynika to stąd, że rejony o podwyższonej gęstości ekspandują wolniej niż rejony o obniżonej gęstości. Przykładowo, w wielkich kosmicznych pustkach tempo ekspansji mierzone stałą Hubble'a jest około 20% większe niż średnie tempo ekspansji całego Wszechświata. A zatem tempo ekspansji przestrzeni malejące ze wzrostem odległości wymaga, aby gęstość materii Wszechświata także wzrastała wraz z odległością.

Która interpretacja jest więc prawdziwa? Czy ta, z której wynika, że ekspansja Wszechświata przyspiesza z czasem, czy ta, z której wynika, że żyjemy w pobliżu centrum wielkiej kosmicznej depresji? Jeśli zapytać kosmologów, okaże się, że większość z nich przychyliła się do pierwszego wyjaśnienia – akcelerującego Wszechświata. Natomiast druga możliwość albo traktowana jest jako ciekawostka, albo w ogóle nie jest znana. Dlaczego tak się dzieje? Dlatego, że badania naukowe zawsze odbywają się w ramach przyjętego paradygmatu.

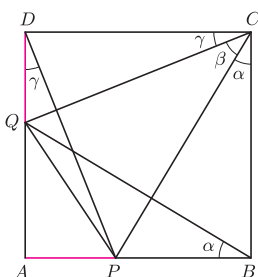
Paradygmat to zbiór teorii i modeli służących do opisu zjawisk zachodzących w przyrodzie. Paradygmat określa też, jakie zjawiska w ramach danego paradygmatu można badać i jak należy dokonywać analizy danych empirycznych. Obecny paradygmat kosmologiczny oparty jest na dwóch zasadach filozoficznych: na zasadzie kopernikańskiej i wynikającej z niej zasadzie kosmologicznej. Zasada kopernikańska mówi, że człowiek nie zajmuje uprzywilejowanego miejsca we Wszechświecie, zasada kosmologiczna zaś, że Wszechświat wszędzie wygląda tak samo, czyli jest jednorodny. Zasady te prowadzą do stosowania jednorodnych modeli do opisu Wszechświata.

Czujny Czytelnik powinien teraz zaprotestować, co mają bowiem zasady filozoficzne (jak np. zasada kopernikańska) do badań empirycznych? Naukowiec





**Rozwiązanie zadania M 1205.**  
 Ponieważ  $AP = DQ$ ,  $AD = DC$  oraz  $\sphericalangle PAD = 90^\circ = \sphericalangle QDC$ , więc trójkąty  $APD$  i  $DQC$  są przystające.



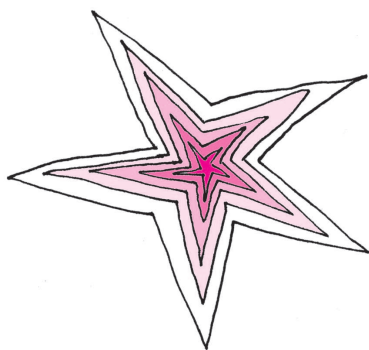
Zatem  $\sphericalangle PDQ = \sphericalangle QCD$ . Analogicznie dowodzimy, że  $\sphericalangle PBQ = \sphericalangle BCP$ . Wobec tego

$$\begin{aligned} \sphericalangle PBQ + \sphericalangle PCQ + \sphericalangle PDQ &= \\ &= \sphericalangle BCP + \sphericalangle PCQ + \sphericalangle QCD = 90^\circ. \end{aligned}$$

nie powinien przecież uprawiać filozofii, a tylko trzeźwo analizować dane doświadczalne i na ich podstawie budować teorie. Nie jest to jednak takie proste. Dane obserwacyjne, jak wiemy, można interpretować na wiele sposobów, tak więc ich analiza zawsze odbywa się przez pryzmat jakiejś teorii. Jak mawiał Poincaré, „nie ma nagich faktów”, nie jest bowiem możliwe oddzielenie *czystych faktów* obserwacyjnych od wpływu teorii, w której się je analizuje. Same zaś *prawa fizyczne*, jak pisze ks. prof. Heller w jednej ze swoich książek, są tylko wygodnymi umowami między uczonymi, które pozwalają uzgodnić interpretacje danych empirycznych. Dlatego badania naukowe zawsze odbywają się w ramach przyjętego paradygmatu. I dobrze. Jeśli za każdym razem, gdy dokonuje się obserwacji, należałoby ją interpretować w ramach wszystkich znanych teorii, wówczas nie można by normalnie prowadzić badań. Dopiero gdy analiza danych obserwacyjnych w ramach paradygmatu napotyka poważne problemy, wówczas zmienia się paradygmat.

Obecny paradygmat, jak na razie, świetnie sobie radzi z odtworzeniem obserwacji kosmologicznych i dlatego wszelkie inne próby wyjaśnienia zjawisk astronomicznych, wychodzące poza jego ramy, traktowane są z rezerwą. Co prawda, obecność stałej kosmologicznej jest problemem, gdyż, jak dotąd, nie udało się stwierdzić, czemu tak naprawdę ona odpowiada. Ostatnio pojawiło się wiele różnych teorii próbujących wytłumaczyć, czym jest stała kosmologiczna. Większość nowych propozycji jest jednak wciąż oparta o zasadę kopernikańską leżącą w centrum obecnego paradygmatu.

Niektórzy Czytelnicy, podobnie jak i autor tego tekstu, mogą być niezadowoleni z takiego podejścia do badań naukowych. Bo przecież powinniśmy zawsze wybierać teorię lepszą, taką, która najprościej tłumaczy dane obserwacyjne, a nie oglądać się i odwoływać do jakiegoś tam paradygmatu. Problem w tym, że takie pojęcia, jak „lepszość” czy „prostota teorii” także zależą od przyjętego paradygmatu. Z punktu widzenia obecnego paradygmatu modele jednorodne są prostsze i opisują świat bez dodatkowych komplikacji (jeśli odwołać się do brzytwy Ockhama). Z drugiej jednak strony dla przeciwników nieznannej ciemnej energii, do której wyjaśnienia pretenduje już ponad kilkadziesiąt teorii (przegląd najbardziej popularnych propozycji co do natury stałej kosmologicznej znaleźć można w *Delcie* 10/2006 – „Czy kosmiczna zupa jest za słona?”), dużo prostszym wytłumaczeniem jest to, że nie ma stałej kosmologicznej, tylko że nasze miejsce we Wszechświecie jest takie, że żyjemy w pobliżu centrum wielkiej kosmicznej depresji. Wcale nie musi to od razu oznaczać wyróżnionej pozycji człowieka w Kosmosie – po prostu takich wielkoskalowych, gigaparsekowych struktur we Wszechświecie może być więcej.



W chwili obecnej problem „kosmiczna depresja czy akceleracja” nie został definitywnie rozwiązany. Ponieważ jednak model standardowy (oparty na jednorodnym modelu Friedmana ze stałą kosmologiczną) ma charakter paradygmatu akceptowanego przez większość kosmologów i który to paradygmat z powodzeniem tłumaczy obserwacje kosmologiczne, dlatego wyjaśnienie „akcelerującego” Wszechświata jest powszechnie uznawane. Nawet jeśli ten obraz jest nieprawdziwy, nie ma się co martwić. W przyszłości nauka skoryguje swój tor. Tak było wiele razy w przeszłości i będzie nie raz w przyszłości. Wszak jeszcze w XIX wieku zjawiska ciepłe tłumaczono, odwołując się do teorii ciepłika, czyli substancji przenoszącej ciepło. Sam Carnot, twórca m.in. cyklu Carnota, o którym uczymy się na lekcjach fizyki, swoje rozważania oparł właśnie na teorii ciepłika. Podobnie jest i w kosmologii – obecnie model standardowy coraz powszechniej jest traktowany jako teoria efektywna, która świetnie dopasowuje się do obserwacji, ale nie daje w pełni zrozumienia własności naszego Wszechświata (np. natury stałej kosmologicznej). Dopiero w przyszłości bardziej fundamentalna teoria, oparta na innym paradygmacie, takiego wyjaśnienia nam udzieli.