



Niektórzy twierdzą, że świat skończy się w lodzie – Nagroda Nobla z fizyki 2011

Sebastian J. Szybka

Obserwatorium Astronomiczne UJ

Wybitny relatywista, John Wheeler, powiedział kiedyś: „znajdź najdziwniejszą rzecz w jakiegokolwiek dziedzinie, a potem poddaj ją badaniu”. W latach 1998–1999 dwa niezależne zespoły naukowe opublikowały swoje wyniki, z których wynikało, że Wszechświat zawiera cztery razy więcej materii¹ niż przypuszczaliśmy. Ta dodatkowa materia o nieznanym nam naturze, odmiennej od natury zwykłej materii, miała powodować przyspieszanie ekspansji Wszechświata, objawiające się pociemnieniem odległych supernowych szczególnego typu. Chociaż od tego czasu minęło już 13 lat, jest to wynik, który ciągle zadziwia. Od dawna wiedzieliśmy, że Wszechświat ekspanduje. Teraz okazało się, iż tempo ekspansji wzrasta.

W tym roku Nagrodę Nobla z fizyki przyznano właśnie za to odkrycie. Jak napisano w uzasadnieniu, za „odkrycie przyspieszonej ekspansji Wszechświata poprzez obserwacje odległych supernowych”. Nagrodę podzielono pomiędzy trzy osoby: Saul Perlmutter otrzymał połowę, a pozostała połowa przypadła Brianowi P. Schmidtowi i Adamowi G. Riessowi. W osobach tych trzech naukowców zostały nagrodzone dwa zespoły badawcze liczące po kilkadziesiąt osób: *Supernova Cosmology Project* (Saul Perlmutter) oraz *High-z Supernova Search Team* (Brian Schmidt, Adam Riess).



SAUL PERLMUTTER



BRIAN P. SCHMIDT



ADAM G. RIESS

W latach dziewięćdziesiątych oba zespoły konkurowały ze sobą w „polowaniu” na odległe supernowe. Jest kilka typów supernowych. Badaczy interesowa-

¹ Kosmologowie wprowadzają rozróżnienie na promieniowanie, materię i tzw. stałą kosmologiczną („energię próżni”). Dla uproszczenia te dwie ostatnie formy energii określiłem wspólnym mianem materii.

ły supernowe typu Ia, gdyż są one ważne dla kosmologii. Ich analiza umożliwia oszacowanie parametrów pojawiających się w modelu kosmologicznym, a tym samym określenie dynamiki Wszechświata. Pod koniec XX stulecia obydwie grupy niezależnie doszły do tego samego zaskakującego wniosku: odległe supernowe typu Ia są ciemniejsze niż przewidywano. Obserwacja ta zinterpretowana w ramach standardowego modelu kosmologicznego implikuje, iż ekspansja Wszechświata ulega przyspieszeniu, i że Wszechświat w około 73% jest wypełniony nieobserwowaną wcześniej na Ziemi tajemniczą formą egzotycznej materii o ujemnym ciśnieniu (zwaną obecnie ciemną energią). Dzisiaj ciemna energia pozostaje równie ciemna i tajemnicza jak 13 lat temu. Jej istnienie jest pośrednio potwierdzone przez inne obserwacje kosmologiczne, ale najważniejszym argumentem pozostają obserwacje odległych supernowych typu Ia.

Tegoroczny werdykt Królewskiej Szwedzkiej Akademii Nauk nie był nieoczekiwany, bo i pytanie, które motywowało do pracy nagrodzonych naukowców było niebagatelne: „Jaki będzie ostateczny los Wszechświata?”. Nie chodziło więc tutaj o odkrycie umożliwiające zbudowanie szybszych komputerów, czy też bardziej pojemnych twardych dysków, ale o odpowiedź na pytanie fundamentalne. Czy Wszechświat będzie się wiecznie rozszerzał, a jego temperatura będzie zawsze maleć? Cytując fragment wiersza amerykańskiego poety Roberta Frosta: „niektórzy twierdzą, że świat skończy się w ogniu, a niektórzy, że w lodzie”. Jeśli prędkość ekspansji Wszechświata będzie zawsze wzrastać to czeka nas ta druga ewentualność.

W praktyce droga od nagrodzonych obserwacji do wniosku co do losów Wszechświata jest dosyć daleka. Nie chodzi mi tutaj o możliwe błędy systematyczne, bo za ich brak Akademia zaręczyła swoim autorytetem. Jak wiadomo, każdy wynik obserwacyjny ma sens tylko w ramach pewnej teorii. Jest oczywiście jak zmierzyć długość stołu, ale tylko wtedy, jeśli stół i precyzja pomiaru są typowe dla skal, z którymi nasz mózg miał do czynienia w trakcie ewolucji. Poza tymi skalami „zdroworozsądkowe” procedury zawodzą. Heisenberg napisał kiedyś o mikroświecie mechaniki kwantowej: chcemy opisać zjawiska, dla których „nasz język nie ma słów”. Na drugim końcu skali wielkości, również bardzo odległym od naszego codziennego doświadczenia, znajduje się kosmologia. Tradycyjny sposób pojmowania odległości traci w niej sens. Na przestrzeni stuleci nauka wypracowała sobie sposób radzenia z tego typu problemami. Przewodnikiem po obcych nam obszarach okazała się być matematyka. Nikt nie wie, dlaczego Wszechświat okazał się być matematyczny, choć to pytanie jest najważniejszym pytaniem nauki.

Zastanówmy się więc na czym polegały nagrodzone obserwacje i jak na ich podstawie można próbować wyciągać wnioski co do materii wypełniającej Wszechświat oraz jego ostatecznego losu. Rozglądnijmy się dookoła. Z dużą dozą pewności mogę stwierdzić, że gdzieś w zasięgu naszego wzroku znajduje się żarówka. Jak zmierzyć odległość do niej nie ruszając się z miejsca? Dla

prostopły założmy, że żarówka świeci izotropowo (tak samo we wszystkie strony) oraz, że znajdujemy się w zaciemnionym pokoju bez dodatkowych źródeł światła. Jeśli znamy moc żarówki (moc oznaczmy przez P) to wiemy, ile energii wysyła ona w czasie Δt ($\Delta E_0 = P\Delta t$). Z lekcji anatomii wiadomo, z jakiej powierzchni oko „zbiera” światło docierające do naszej siatkówki (to pole powierzchni oznaczmy przez A). Jeśli znaleźlibyśmy sposób na zmierzenie ilości energii (ΔE_1) docierającej do naszej siatkówki w czasie Δt , to łatwo moglibyśmy obliczyć odległość d oka od żarówki. Zauważmy, że w odległości d od żarówki energia ΔE_0 jest rozłożona na powierzchni sfery $4\pi d^2$. Oznacza to, że w czasie Δt do naszej siatkówki powinna dotrzeć energia $\Delta E_1 = \frac{A \Delta E_0}{4\pi d^2}$. Obliczając z tego równania wielkość d otrzymujemy

$$d = \left(\frac{\Delta E_0}{\Delta E_1} \frac{A}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{P\Delta t}{\Delta E_1} \frac{A}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Wzór ten można zapisać w bardziej elegancki sposób $d = \left(\frac{A}{\Delta\delta} \right)^{\frac{1}{2}}$, gdzie $\Delta\delta$ oznacza kąt bryłowy, w który zostały wypromieniowane fotony zarejestrowane przez nasze oko i $\Delta\delta = \frac{4\pi \Delta E_1}{\Delta E_0}$. Jeszcze inny sposób zapisu to $d = \left(\frac{P}{4\pi S} \right)^{\frac{1}{2}}$,

gdzie $S = \frac{\Delta E_1}{A\Delta t}$ oznacza gęstość strumienia energii padającego na naszą siatkówkę. Jakkolwiek nasz sposób pomiaru odległości może wydawać się bardziej skomplikowany niż pomiar za pomocą sznurka, to proszę zauważyć, że w opisany przeze mnie sposób można próbować zmierzyć odległość do obiektów, do których nie możemy bezpośrednio dotrzeć, np. do gwiazd.

Przy przejściu od obserwacji żarówek do obserwacji obiektów astronomicznych pojawiają się nowe problemy. Nasze naturalne rozumienie odległości do danego obiektu nie może być ekstrapolowane na skale astronomiczne. Jeśli znamy moc P danego obiektu, to ciągle możemy obliczać odległość ze wzoru

$$d = \left(\frac{P}{4\pi S} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

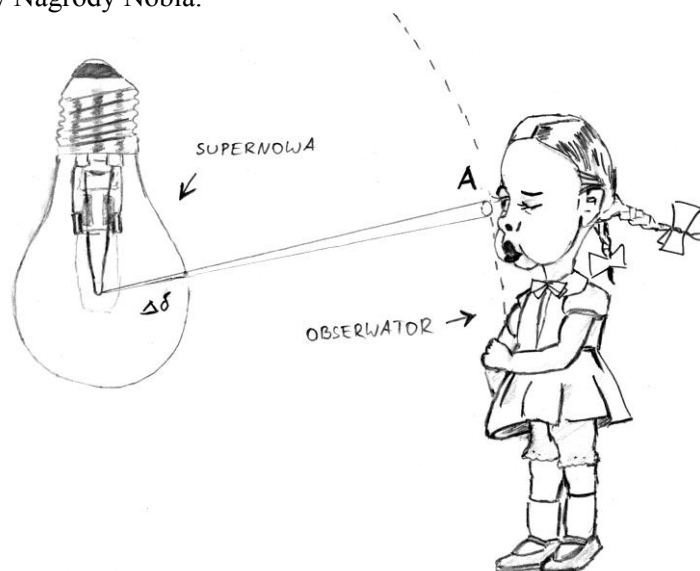
Okazuje się, że tak obliczona wielkość ma niewiele wspólnego

z tym, co powszechnie uznaje się za odległość. Ze względu na rozszerzanie się Wszechświata, rozumowanie, które przeprowadziliśmy dla żarówek należałoby uściślić i uzupełnić o nowe elementy. W przypadku dużych odległości wielkość

$$d = \left(\frac{P}{4\pi S} \right)^{\frac{1}{2}}$$

nie musi nawet być monotoniczną funkcją czasu potrzebnego na dotarcie do danego obiektu, więc aby uniknąć zamieszania, tak obliczoną odle-

głość d oznacza się symbolem d_L i określa się mianem *odległości jasnościowej*. Pomimo tych niedogodności odległość jasnościowa stała się ważnym narzędziem współczesnej kosmologii, skutecznie wykorzystanym przez tegorocznych laureatów Nagrody Nobla.



Warunkiem koniecznym do dokonania pomiaru odległości jasnościowej d_L danego obiektu jest znajomość wartości mocy P . Gęstość strumienia energii S mierzy się lokalnie i jego pomiar nie nastręcza trudności. Oba zespoły badawcze, których przedstawiciele zostali nagrodzeni, prześcigały się w wyszukiwaniu supernowych typu Ia. Ilość energii uwalniana w tych wybuchach jest zawsze podobna, dlatego można je traktować jak żarówki o ustalonej i tej samej mocy. Z tego powodu nazywa się je *świecami standardowymi*.

W dużej skali dominują oddziaływania grawitacyjne. Wśród większości ludzi intuicyjne rozumienie grawitacji pokrywa się z jej newtonowską interpretacją. Niestety, próbując opisać cały Wszechświat za pomocą tej teorii, napotyka się na problemy, których nie sposób rozwiązać. Żeby pokonać trudności trzeba sięgnąć po teorię dającą lepsze zrozumienie tego czym jest grawitacja. Opisując obiekty oddziałujące grawitacyjnie w teorii Newtona wykorzystuje się dwa pojęciowo niezależne parametry: masę bezwładną ciała (będącą miarą tego, jak trudno zatrzymać dane ciało, jeśli porusza się ono z ustaloną prędkością względem obserwatora) oraz masę ciężką, która jest ładunkiem grawitacyjnym analogicznym do elektrycznego, czyli określa siłę oddziaływania grawitacyjnego pomiędzy dwoma ciałami. Koncepcyjnie są to dwa różne pojęcia. Okazuje się jednak, że pomiar eksperymentalny tych dwóch różnych mas daje te same wyniki z bardzo dużą dokładnością. Należy więc sądzić, że masa bezwładna i cięż-

ka to jedno i to samo, a odmienność definicyjna tych wielkości jest niepożądaną cechą teorii Newtona. Obierając ten prosty fakt za przewodnią latarnię można dojść do teorii, w ramach której staje się możliwy opis Wszechświata „jako całości”. Opis ten jest pierwszym modelem kosmologicznym w historii ludzkości, który spełnia warunki nowożytnej nauki, tzn. w jego ramach można formułować przewidywania, które z dużą dokładnością są potwierdzane obserwacyjnie. Teoria, o której mowa, to ogólna teoria względności Einsteina.

Przy założeniu, że materia we Wszechświecie jest rozłożona jednorodnie, oraz, że Wszechświat jest izotropowy, a my nie zajmujemy w nim wyróżnionego miejsca, teoria Einsteina implikuje, że Wszechświat w chwili obecnej rozszerza się lub kurczy. Obserwacje astronomiczne odległych galaktyk, które zostały przeprowadzone w pierwszej połowie XX wieku, pokazały, że odległe galaktyki oddalają się od nas. Wysyłane przez nie światło jest przesunięte ku czerwieni tym bardziej, im dalej znajdują się one od nas. Przesunięcie ku czerwieni oznacza się literą z i definiuje się jako $1 + z = \lambda_o / \lambda_e$, gdzie λ_o , λ_e oznaczają długość fali obserwowanego i emitowanego światła. Efekt ten jest w pewnym stopniu podobny do zmiany częstotliwości dźwięku oddalającego się pociągu.

Dla galaktyk, które nie są zbyt daleko ani zbyt blisko, odległość można oszacować ze wzoru $d = zc/H_0$, gdzie H_0 jest tzw. stałą Hubble’a, a c to prędkość światła. Oprócz H_0 w modelu kosmologicznym pojawiają się jeszcze inne parametry. W szczególności można obliczyć teoretyczną krzywą zależną od tych parametrów: odległość jasnościową $d_L(z)$ w funkcji przesunięcia ku czerwieni z . Laureaci tegorocznej Nagrody Nobla dopasowali krzywą teoretyczną do danych obserwacyjnych opartych na obserwacjach supernowych typu Ia. Na tej podstawie oszacowano parametry kosmologiczne. Jeden z tych parametrów to tzw. *stała kosmologiczna*. Jest ona fizycznie interpretowana jako niezmienna w czasie i przestrzeni gęstość pewnej specyficznej formy materii mającej ujemne ciśnienie. Dodatnia wartość tej stałej (wyznaczona przez obie grupy badawcze), implikuje przyspieszanie ekspansji Wszechświata. Po prostu supernowe typu Ia dla danej wartości przesunięcia ku czerwieni są ciemniejsze, niż gdyby stała kosmologiczna była równa zero.

Stała kosmologiczna jest wolnym parametrem w równaniach Einsteina i jej wartość zastanawiała kosmologów od wielu lat. Obserwacje odległych supernowych typu Ia mogą być wytłumaczone za jej pomocą bez wprowadzania innych egzotycznych form materii. Dlaczego więc stałą kosmologiczną wrzuca się do jednego worka z innymi, o wiele bardziej hipotetycznymi formami tzw. ciemnej energii, albo rozważa się alternatywne modele kosmologiczne, w których pociemnienie odległych supernowych nie implikuje przyspieszonej ekspansji? Otóż, wartość stałej kosmologicznej wyznaczona z obserwacji kosmologicznych jest 10^{120} razy mniejsza niż się spodziewano na podstawie innych teorii. Co więcej obecna gęstość zwykłej materii jest zbliżona do gęstości egzotycznej materii związanej ze stałą kosmologiczną. Skoro pierwsza z tych gęsto-

ści zmienia się w czasie, a druga pozostaje stała, ich równość implikuje, że żyjemy w bardzo szczególnym momencie istnienia Wszechświata. Fizycy nie lubią takich tajemniczych koincydencji, więc poszukują mechanizmu, który mógłby wytłumaczyć ten zbieg okoliczności.

Tegoroczna Nagroda Nobla jest w pewien sposób nietypowa. Została przyznana za obserwacje, których implikacje nie są jeszcze w pełni zrozumiane. Nazwa „ciemna energia” najlepiej oddaje naszą niewiedzę. Tym razem nie nagrodzono odpowiedzi, lecz sformułowanie pytania. Co powoduje pociemnienie odległych supernowych typu Ia? Czy Wszechświat naprawdę „skończy się w lodzie”? Warto szukać rozwiązania tej zagadki. Niewątpliwie zostanie ono nagrodzone kolejną Nagrodą Nobla.



Supernowa 1994D położona na obrzeżach galaktyki soczewkowatej NGC 4526