

Jerzy Kuczyński
Nobel z astronomii

W tym roku nagrodę Nobla otrzymali astronomowie. Saul Perlmutter otrzymał połowę, a drugą połowę podzielili się Brian Schmidt i Adam Riess. Nagrodę otrzymali za odkrycie, jak na Nobla bardzo nowe, bo sprzed 13 lat. Dokładniej praca Perlmuttera (i 21 współautorów; jak na pracę „przewracającą” obraz świata 22 autorów, to nie za wiele!!) ukazała się 1 stycznia 1998 roku w Nature. Może więc warto trochę refleksji sprawie poświęcić (pozostali Nobliści byli „równoległymi” odkrywcami). Otóż kilkanaście lat temu w kosmologii, czyli nauce o Wszechświecie jako całości, był pewien kłopot. Astronomowie mierzyli prędkość oddalania się galaktyk czyli tzw. stałą Hubble’a.

Aby zrozumieć, o co chodziło trzeba chwilę uwagi tej stałej poświęcić. Zwłaszcza, że związane jest z nią sporo nieporozumień (uwaga!!! ostatnie zdanie oznacza, że w literaturze, zwłaszcza starszej znajdziemy mało zbliżone do prawdy stwierdzenia; dla dociekliwych J. Kuczyński Urania 2/2004 str 58). Otóż stała Hubble’a określa, jaka jest szybkość narastania przestrzeni. Konkretnie, jeżeli mamy dwa punkty w pustej przestrzeni, to stałą Hubble’a jest stosunek przyrostu odległości do tej odległości, czyli

$$H = \frac{\dot{R}}{R} \quad (1)$$

gdzie R oznacza odległość a \dot{R} pochodną czasową (choć niezupełnie to to co w fizyce zwykle nazywamy prędkością!!) tej odległości.

Kluczowe słowo w powyższych stwierdzeniach to „pusta przestrzeń”, czyli „próżnia”. W rzeczywistości próżnia to raczej skomplikowane pojęcie i dlatego astronomowie, by owe skomplikowości ominąć, po prostu biorą dużą odległość - jak odległość jest rzeczywiście duża, to to co jest między tymi punktami jest w pewien sposób „uśrednione” i można to uznać za próżnię. Jak się przekonamy w przypadku ostatniego Nobla niestety takie podejście nie wystarczy i cokolwiek bardziej precyzyjnie o próżni trzeba będzie powiedzieć! Na razie jednak starczy to, co powiedzieliśmy. Otóż jeżeli definicję stałej Hubble’a potraktować poważnie (to znaczy że jest istotnie stała), to równanie (1) jest bardzo prostym równaniem różniczkowym, którego rozwiązanie ma postać

$$R = e^{Ht} \quad (2)$$

Z równania (2) widać że Wszechświat opisany „stałą” stałą Hubble’a trwa nieskończenie, bo wszystko się rozszerza proporcjonalnie do odległości. Nazywamy to stanem stacjonarnym i rzecz, oczywiście, prowadzi do wiecznej kreacji materii - objętość narasta, i jeżeli próżnia coś zawiera, to to coś przyrasta w ilości proporcjonalnej do objętości, bo

sama próżnia w trakcie narastania objętości się nie zmienia! Zapamiętajmy tę własność bo wróci to jeszcze parę razy!!

Oczywiście opisany „stała” stała Hubble’a Wszechświat niekoniecznie musi być zbliżony do naszego naprawdę istniejącego Wszechświata, a fakt nie spełniania prawa zachowania energii nie przysparza mu popularności. Wracajmy jednak do sytuacji sprzed kilkunastu lat. Otóż stała Hubble’a mierzono i uzyskiwano, jak to na „krańcach wiedzy” powszechnie, różne wartości. Część badaczy otrzymywała około $70 \frac{km}{s \cdot Mpc}$, a część około $50 \frac{km}{s \cdot Mpc}$.

Wydawaloby się, że różnica niewielka, a jednak (dla ciekawych J. Kuczyński, I. Włodarczyk: Wiedza i Życie 11/1991 str 16) rzecz była dość drastyczna. Po prostu jeżeli dwa punktu się od siebie oddalają, to znając obecną prędkość można, zakładając, że prędkość ta nie ulega zmianie obliczyć, kiedy te dwa punkty były blisko siebie. Jak prędkość jest spora, to były blisko niedawno, jak mała, to było to dawniej. A dla stałej Hubble’a około 70 było to krócej niż wiek sporej części obiektów astronomicznych. Inaczej mówiąc, wiek wielu ciał byłby dłuższy od wieku Wszechświata. Dlatego spora część teoretyków opowiadała się za mniejszą wartością, a dla 50 „od biedy” jakoś dawało się to pogodzić z rzeczywistością.

Jednak ludzie rzeczywiście mierzący twierdzili, że wychodzi im około 70 (Kuczyński i Włodarczyk w cytowanej powyżej pracy sugerowali, że trzeba by znaleźć jakąś odpowiedzialną za to siłę (co nota bene zirytowało Recenzenta i spowodowało, że artykuł ukazał się dobre pół roku później, niż miał i wraz polemiką Recenzeta; no cóż przyznanie Nobla wskazuje, że nie miał racji!)). I o takiej sile się „po cichu” mówiło. Po cichu, bo prowadziła do nieprzyjemnych własności, a konkretnie, do złamania prawa zachowania energii, co jest oczywiste z rozważań o stałej Hubble’a. Trzeba tu dodać, że teorią opisującą Wszechświat jest Ogólna Teoria Względności.

W najprostszym, (ale powszechnie uznawanym za poprawny), przypadku równania Einsteina sprowadzają się tu do równania Friedmanna (tu podane przy założeniu Wszechświata płaskiego; jednak to założenie jest powszechnie przyjmowane)

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \quad (3)$$

Jak widać równanie niewiele różni się od rozważanego poprzednio równania dla stałej stałej Hubble’a. Jednak teraz już prędkość oddalania się (napiszmy konkretnie „odległych”, a więc nie związanych ze sobą siłami grawitacji, galaktyk) niekoniecznie jest stała. Zależy to od funkcji ρ , a ta ostatnia ma sens gęstości energii, mierzonej w jednostkach masy

na jednostkę objętości (G jest oczywiście stałą grawitacji; korzystając ze wzoru $E = mc^2$, moglibyśmy po prawej stronie wprowadzić prędość światła i liczyć ρ w dżulach na metr sześcienny).

Chwila zastanowienia i już wiemy jak rozwiązać problem obiektów starszych niż Wszechświat. Stałą Hubble'a mierzymy współcześnie, ale co było wcześniej nie wiemy. Jeżeli więc obecnie Wszechświat rozszerza się szybko, a dawniej działo się to wolniej, to oczywiście mogą istnieć obiekty znacznie starsze, niż ich odległość podzielona przez **obecną** prędość ich oddalania się. Po prostu dawniej oddalały się wolniej. Problem by móc zobaczyć, jak to się działo dawniej. Z pomocą przychodzi stałość prędości światła. Jeżeli patrzymy na dalsze obiekty, to widzimy je takimi, jakimi były wcześniej. Tym samym mierząc stałą Hubble'a dla dalekich obiektów mierzymy ją dla dawnych czasów. Inaczej mówiąc, formalnie mamy możliwość zmierzenia rozwiązania równania (3) ! A jak zmierzemy rozwiązanie to wstawiając zmierzone rozwiązanie do równania możemy **wyliczyć** funkcję ρ !

Pozostaje tylko jeden problem, znaleźć jakiś rodzaj obiektów, których jasność można by zmierzyć z bardzo wielkiej odległości. To ostatnie jest rozwiązaniem problemu i wynika z prostej własności (hmm, trochę tu sobie życie uproszczono dla ciekawych np. M. Jaroszyński „Galaktyki i budowa Wszechświata”) znanej z życia codziennego - im coś jest dalej tym światło od niego jest słabsze. Dlatego, gdy wiemy, jak to coś jest naprawdę jasne (astronomowie nazwą to jasnością absolutną), to mierząc jak jasne się wydaje (astronomowie nazwą to jasnością widomą) możemy obliczyć odległość. Prędość zaś zmierzyć nietrudno, określa ją przesunięcie ku czerwieni (znowu uproszczenie; dla ciekawych zachęcam do zajrzenia do wspomnianego już artykułu w Uranii).

Jeżeli zmierzone obiekty wydadzą się nieco zbyt słabe, oznaczać to będzie, że w chwili wysłania światła były dalej niż myśleliśmy. Na odwrót gdyby okazały się jaśniejsze od spodziewanych oznacza, że były bliżej. Tłumacząc to na zmiany prędości - bledsze (słabsze) będą, gdy dawniej prędość oddalania się była mniejsza, jaśniejsze w przeciwnym wypadku. Bledsze lub jaśniejsze w stosunku do czego ? W stosunku do spodziewanego sposobu ekspansji Wszechświata. A czego się spodziewano. A tego, że Wszechświat będzie rozszerzał się coraz wolniej. Konkretnie, że gęstość ρ będzie maleć odwrotnie proporcjonalnie do narastania objętości (czyli odwrotnie proporcjonalnie do trzeciej potęgi narastania odległości).

Warto się nad tym zastanowić. Otóż jeżeli w pewnej objętości jest n galaktyk (gwiazd, atomów lub innych obiektów) to, gdy ta objętość wzrośnie, to owych galaktyk powinno w tej „wyrośniętej” (teoretyk powie „współporuszającej się”) objętości być tyle samo. Logiczne, prawda.

Gdyby zapisać to formalnie to równanie (3) łatwo rozwiązać i dostaniemy, że odległość zmienia się (znowu pewne uproszczenie; tak naprawdę „czynnik skali” R , ten sam co w równaniu (1)) proporcjonalnie do czasu w potęgze dwie trzecie. A co by było gdyby wziąć promieniowanie?

Trochę to trudniejsze do wyobrażenia, ale wyobraźmy sobie objętość n fotonami. Oczywiście, jak objętość wzrośnie to fotonów będzie dalej n . Ale każdy z nich ulegnie „przesunięciu ku czerwieni” (znający się na fizyce Cytelnik zauważy, że znowu mamy jakiś problem z zachowaniem energii; prawda ale ... grawitacja Einsteinska tak już ma; temat bardzo klasyczny, tyleż ciekawy, co słabo spopularyzowany, może kiedyś warto by na ten temat coś napisać), a więc gęstość energii zmaleje bardziej, niż w poprzednim przypadku. W sumie po wstawieniu tego do równania Friedmanna dostaniemy proporcjonalność czynnika skali do pierwiastka kwadratowego z czasu. Oczywiście tak naprawdę „wszechświat promieniowania” i „wszechświat pyłu”* nie są to osobnie wszechświaty. Tak naprawdę mamy różne rodzaje materii w naszym Wszechświecie a gęstość całkowita jest równa $\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \dots$. Gdzie indeksy odróżniają rodzaje materii różnie się zachowujące w trakcie ewolucji Wszechświata.

Gdyby ograniczyć się do pyłu i promieniowania to widać, że w trakcie ekspansji Wszechświata gęstość promieniowania maleje szybciej niż gęstość pyłu (bo „sztuk” jest wprawdzie tyle samo ale energia każdej „sztuki” promieniowania maleje a pyłu nie). Dlatego „na początku dominuje promieniowanie”. Potem dominuje pył.

A co by było gdyby we Wszechświecie była jakaś materia w ogóle nieczuła na zmiany objętości. Taką materię nazywamy stałą kosmologiczną i jej równanie jest skrajnie proste. Po prostu jej gęstość się nie zmienia (a prawo zachowania energii ... !!!) Oczywiście taka materia wcześniej czy później zdominuje Wszechświat i wrócimy do równania (1) - Wszechświat się nie będzie zmieniał, ekspandując eksponencjalnie. I w tym momencie możemy wrócić do Perlmuttera i ostatniego Nobla.

Otóż Perlmutter zauważył (może nie tyle zauważył, co z ich istnienia skorzystał), że istnieją w naszym Wszechświecie błyski, które powinny być identyczne niezależnie od tego kiedy błysnęły. Znowu krótka dygresja. Jeżeli mamy dwie gwiazdy o umiarkowanych (kilka mas Słońca) masach w układzie podwójnym, to ponieważ tempo ewolucji zależy od masy (im większa tym szybsza) jedna z nich przeewoluuje szybciej przechodząc do stadium białego karła. Jakiegoś tam, mniejszego lub większego. Jednak druga z tych gwiazd wtedy jeszcze będzie zwykłą gwiazdą. Ewoluuując wejdzie w stadium czerwonego olbrzyma, czyli osiągnie ogromne rozmiary . Takie, że jej powierzchnia dotknie (znowu uproszczenie!) białego karła. I wtedy biały karzeł wyssie swego towarzysza - masa z towarzysza zacznie przepływać do białego karła. Jednak białe karły mają

pewne ograniczenie na masę. Jeżeli ograniczenie to zostanie przekroczone nastąpi wybuch. Ponieważ nastąpi zawsze dla tej samej wartości masy, wybuch będzie zawsze taki sam niezależnie od tego jakie gwiazdy były początkowo układem podwójnym (i jaki był pierwotny biały karzeł; oczywiście pod warunkiem że początkowo powstanie biały karzeł, a nie np. gwiazda neutronowa). Następujący w takim przypadku wybuch nazywamy supernową typu Ia.

Perlmutter mierząc ich jasność i przesunięcie ku czerwieni mógł określić, jak w przeszłości rozszerzał się Wszechświat, bo wszystkie SN Ia są w sensie absolutnym takie same. I to właśnie zostało opublikowane w *Nature* w styczniu 1998 roku. Okazało się, że supernowe są bledsze, niż wynikało by to z dotychczas używanych modeli.

Wszechświat rozszerzał się więc kiedyś wolniej i powoli rozszerzanie przyspiesza. Po użyciu równania Friedmanna teoretycy doszli do wniosków dotyczących zawartości naszego Wszechświata (w zasadzie może równanie zrobić każdy z Czytelników! Wystarczy znajomość równań różniczkowych na poziomie niewiele przekraczającym liceum z lat siedemdziesiątych!). A wyniki są takie. Promieniowanie obecnie nie ma żadnego znaczenia (co nie było niczym oryginalnym). Materia znana z Ziemi to około 3% materii Wszechświata (to już trochę zadziwiające!). Materia o zbliżonej do pyłu własnościach, ale inna niż ta znana z ziemskiej fizyki **, tzw. ciemna materia to około 27 %. I w końcu to, co wynika z pomiarów Perlmuttera - ciemna energia o równaniu stanu zbliżonemu do „gęstość jest stała” w ilości mniej więcej dwóch trzecich całej materii zawartej w naszym Wszechświecie.

Podsumowując można więc powiedzieć, że Perlmutter wykrył dwie trzecie zawartości Wszechświata. A więc Nobel rzeczywiście mu się należał! I na koniec, co z próżnią? Otóż wydaje się, że to co nazywamy próżnią jest dosyć masywne i zawiera masę $\rho = \frac{3H^2}{8\pi G}$ gdzie H i G to oczywiście stała Hubble'a i stała grawitacji. Wstawiając odpowiednie wartości otrzymamy, że metr sześcienny próżni ma energię rzędu 10^{-9} dżuła, co odpowiada masie atomu wodoru w kilkunastu metrach sześciennych. Całkiem masywna ta nasza próżnia.

* Dwie uwagi. Pierwsza ortograficzna. Wszechświat pisany z dużej litery, to nasz Wszechświat, w którym żyjemy. Wszechświat pisany z małej litery to słowo pospolite określające np. wszechświat opisany jakimś modelowym równaniem. Po drugie pył to materia o równaniu stanu „ciśnienie równe zero” czyli np. gwiazdy, galaktyki itp. Promieniowanie ma pewne ciśnienie i dlatego jego równanie stanu jest inne, co skutkuje innym zachowaniem wszechświata nim wypełnionego.

** To fakt wyciągnięty „z kapelusza” - dla skrócenia i tak dużego tekstu o tym nie było. Ale nie trudno to uzasadnić - ciemna materia

nie jest widoczna w teleskopach, choć wpływa grawitacyjnie na widoczne ciała. Tym samym nie reaguje ze światłem, więc nie może być zbudowana z naładowanych cząstek, bo te ze światłem muszą reagować. W końcu światło to fala elektromagnetyczna, więc musi z elektrycznością, czyli ładunkiem reagować.