

Wielkoskalowe pola prędkości we Wszechświecie

Michał CHODOROWSKI

Swoje słynne prawo liniowej zależności prędkości ucieczki galaktyk od odległości do nich Edwin Hubble sformułował w 1929 roku. Od tamtego czasu w kosmologii królują (poza krótkim okresem popularności tzw. Modelu Stanu Stacjonarnego) modele Friedmana ekspandującego Wszechświata. Według nich powstał on około 10–20 miliardów lat temu w Wielkim Wybuchu i rozszerza się. Jednakże przyciąganie grawitacyjne spowalnia ekspansję: jeśli średnia gęstość materii we Wszechświecie ρ przekracza pewną wartość krytyczną ρ_{kr} , wówczas grawitacja ostatecznie zwycięży i po fazie ekspansji nastąpi faza kontrakcji (Wszechświat zacznie się kurczyć). W przypadku $\rho < \rho_{kr}$ Wszechświat będzie się rozszerzać wiecznie, natomiast gdy $\rho = \rho_{kr}$, prędkość ekspansji Wszechświata maleć będzie asymptotycznie do zera.

Do dziś nie jesteśmy pewni, który z powyższych scenariuszy realizuje nasz Wszechświat...

Jedną z konsekwencji jego gęstego i gorącego początku jest kosmiczna nukleosynteza pewnych lekkich pierwiastków podczas kilku pierwszych, najgorętszych minut istnienia Wszechświata. Te lekkie izotopy, powstałe z wodoru, do hel-4, deuter, hel-3 i lit-7. Porównanie przewidywań teoretycznych obfitości ich występowania z obserwacjami wypada bardzo korzystnie dla modelu Wielkiego Wybuchu – przewiduje on prawidłowo obfitości *wszystkich* lekkich pierwiastków, pomimo olbrzymiego zakresu liczbowego tych obfitości: od jednej czwartej dla helu-4 do 10^{-10} dla litu-7. Jedyne dopasowywany parametr w tych rachunkach to obecna tzw. średnia gęstość materii *barionowej* we Wszechświecie ρ_b . Bariony to „normalna” materia, z której jesteśmy zbudowani, np. protony i neutrony (elektrony są na tyle lekkie, że mogą tu być pominięte). Z dopasowania wynika, że $\rho_b \approx 0,06\rho_{kr}$.

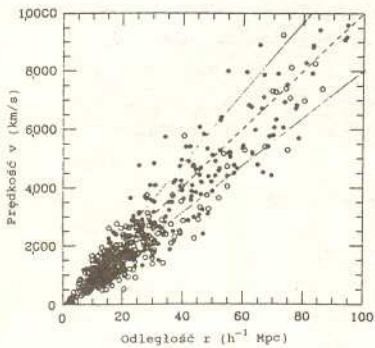
Drugą konsekwencją gorącego początku Wszechświata jest istnienie tzw. relikowego promieniowania tła, czyli „światła” Wielkiego Wybuchu, obecnie bardzo niskoenergetycznego – mikrofalowego – z powodu ekspansji Wszechświata. Promieniowanie to ma – znów zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi! – rozkład widmowy ciała doskonale czarnego i okazuje się być bardzo jednorodne: jego natężenie z dużą dokładnością nie zależy od kierunku, z którego ono dociera. W pierwotnym, gorącym Wszechświecie materia barionowa była zjonizowana i jej niejednorodności nie mogły narastać ze względu na silne oddziaływanie z promieniowaniem poprzez bardzo efektywne rozpraszanie fotonów na swobodnych elektronach. Dopiero, gdy z powodu rozszerzania się Wszechświata jego temperatura spadła na tyle, że zrekombinował wodór (tzn. protony połączyły się z elektronami tworząc atomy wodoru), Wszechświat stał się „przezroczysty” dla promieniowania i niejednorodności w rozkładzie materii zaczęły narastać. Zatem mierzone obserwacyjnie niejednorodności w rozkładzie natężenia promieniowania tła informują nas pośrednio o niejednorodnościach rozkładu materii w erze rekombinacji wodoru. Otóż, okazują się być one o wiele za małe, by zdążyć narosnąć odpowiednio tak, by utworzyć struktury obserwowane obecnie, takie jak galaktyki, gromady galaktyk itp.! Jedyne sensowną próbą uniknięcia sprzeczności modelu z obserwacjami wydaje się być zapostulowanie istnienia we Wszechświecie znaczących ilości materii niebarionowej – w szczególności nie oddziałującej elektromagnetycznie. Taka materia byłaby, oczywiście, niewidoczna („ciemna”), natomiast jej niejednorodności, nie będąc „rozmywane” przez promieniowanie mogłyby narastać znacznie wcześniej, przed erą rekombinacji wodoru. Po rekombinacji materia zwykła (tzn. barionowa) szybko spadałaby do już utworzonych przez ciemną materię dołów potencjału grawitacyjnego. Czy aby jednak ciemna materia to nie przysłowiowa brzytwa, której chwytają się obrońcy modelu standardowego tonąc w morzu obserwacji sprzecznych z teorią?

Ziemi układem gwiazdnym położonym w odległości 4,3 lat świetlnych od nas. Jeden rok świetlny to odległość, jaką przebywa światło w ciągu jednego roku. Z punktu widzenia brata na Ziemi brat astronauta pokona drogę tam i z powrotem przy założonej prędkości 0,745 c w czasie $8,6/0,745 = 11,54$ lat. W układzie rakiety przy podanej prędkości czas płynie wolniej półtora raza. Czyli na zegarze rakiety upływa $11,54/1,5 = 7,7$ lat, gdy ląduje ona z powrotem na Ziemi. Brat bliźniak będzie więc młodszy o ponad trzy lata. Stąd paradoks – brat bliźniak młodszy o kilka lat. Doświadczenie z wożeniem samolotem zegarów potwierdza właśnie ten nieprawdopodobny wniosek. Może być dwóch braci bliźniaków różniących się wiekiem o kilka lat, a w przypadku większych prędkości podróżowania nawet i o więcej.

Może się ktoś zastanawiać, czy w pędzącej rakiecie coś się czuje, że czas upływa wolniej. Mogę odpowiedzieć z własnego doświadczenia, a i każdy z Państwa ma podobne. Oczywiście, nie mamy poczucia ogromnej prędkości i nie czujemy, że czas upływa wolniej. Skąd ta pewność? Otóż w bardzo prosty sposób możemy wykonać rzeczyste doświadczenie.

Wiemy, że Wszechświat się rozszerza. Ciała niebieskie oddalają się od siebie z prędkościami proporcjonalnymi do odległości. W 1960 roku odkryto nowy typ ciał nazwanych kwazarami, których znamy już dziś około półtora tysiąca, a które charakteryzują się niezwykłą prędkością ucieczki względem Ziemi. Te najszybsze mogą nawet osiągać 93% prędkości światła. A to oznacza, że my w tej właśnie chwili pędzimy w przestworzach z prędkością równą 0,93 prędkości światła, względem wybranego kwazara! I co? I nic! Nie odczuwamy tej prędkości. Ale obserwator tam gdzieś daleko widzi pędzącą Ziemię (jeżeli takie małe coś może zobaczyć) i myśli sobie (jeżeli tam jest i myśli): „Ale pędzą! Tym to dobrze, wolniej się starzeją”. I prawda. Przekroczyłem już jakiś czas temu pół wieku życia. A tamten obserwator może mi zazdrości „Temu to dobrze, przekroczył 140 lat życia i jakoś się trzyma”. Kto ze słuchaczy ukończył 35 lat, ma prawo pogratulować sobie ukończenia stu lat życia, tyle że w oczach obserwatora z odległego kwazara. Przy okazji dodam, że dla naszego odległego podglądacza waży ponad 224 kg. Ale o tym następnym razem.

Otóż nie, gdyż istnieją inne niezależne fakty obserwacyjne sugerujące istnienie ciemnej materii we Wszechświecie. Mianowicie, charakterystyczne prędkości gwiazd w galaktykach i galaktyk w gromadach galaktyk przewyższająby znaczne prędkości ucieczki z tych struktur, gdyby doły potencjału grawitacyjnego tychże były tworzone wyłącznie przez widzialną materię. Oczywiście, niewidoczna może być również materia barionowa: np. duże planety o masie rzędu masy Jowisza lub masywne czarne dziury. Okazuje się, że przeważająca jej część nawet *musi* być niewidoczna, ponieważ średnia gęstość widocznego składnika wynosi tylko około $0,007\rho_{kr}$, rząd wielkości mniej od całkowitej gęstości barionowej przewidywanej przez teorię pierwotnej nukleosyntezy. Jednakże do tego, by galaktyki się nie rozpadały, potrzeba „dodać im” taką ilość masy niebarionowej, żeby ρ wyniosło co najmniej $0,1\rho_{kr}$. W przypadku gromad galaktyk „dodać” trzeba więcej – wówczas $\rho \approx 0,3\rho_{kr}$. Wynika z tego, że domieszka składnika niebarionowego zmienia się wraz ze skalą struktury. Zatem aby uzyskać miarodajne oszacowanie całkowitej średniej gęstości materii we Wszechświecie, należy poddać analizie dynamikę nie pojedynczej gromady, lecz całego naszego „kosmicznego sąsiedztwa”.



Rys. 1

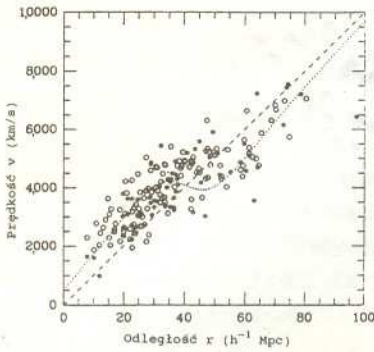
W przypadku galaktyk spiralnych jasność galaktyki zależy monotonicznie od jej prędkości obrotu. Zależność ta została ustalona przez badanie galaktyk należących do danej gromady, a więc znajdujących się z niezłym przybliżeniem w jednakowej od nas odległości. Zbadanie kilkudziesięciu gromad pozwoliło ustalić, że prędkość rotacji jest skorelowana z jasnością galaktyki ze średnio 40% rozrzutem. Jasność obserwowana danego obiektu jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu jego odległości, stąd 40% rozrzut w jasnościach oznacza 20% błąd wyznaczenia odległości. Innymi słowy, jeśli z dwóch galaktyk spiralnych o identycznej prędkości obrotu druga ma cztery razy mniejszą jasność obserwowaną, to możemy się spodziewać, że znajduje się ona $2(\pm 2 \times 20\%) = 2(\pm 0.4)$ razy dalej od pierwszej. Analogiczne związki znaleziono także dla galaktyk eliptycznych. Natomiast aby znaleźć odległość absolutną, a nie tylko względną, należałoby wykalibrować powyższe związki przez niezależne wyznaczenie odległości do pobliskich gromad. Pozostaje to wciąż problemem oczekującym na zadowalające rozwiązanie.

Dynamika tego obszaru, uśredniona po wszystkich kierunkach, jest bardzo prosta (rys. 1): opisuje ją wspomniane już prawo Hubble'a $v = Hr$, gdzie v to prędkość ucieczki galaktyki, r oznacza odległość do niej, a H jest stałą proporcjonalności, zwana – oczywiście – stałą Hubble'a. Skąd jednak bierze się tak duży rozrzut punktów wokół linii prostej? Wyznaczanie prędkości galaktyk, a przynajmniej ich składowych wzdłuż kierunku widzenia, jest nieskomplikowane. Prędkości te otrzymuje się z dobrą dokładnością mierząc przesunięcia dopplerowskie linii absorpcyjnych występujących w świetle danej galaktyki względem ich położenia w warunkach laboratoryjnych. Natomiast znane obecnie metody wyznaczania odległości do galaktyk są znacznie mniej dokładne. Wykorzystują one empiryczne związki między jasnościami galaktyk a charakterystycznymi prędkościami poruszających się w nich gwiazd. Obecnie odległości absolutne potrafimy wyznaczyć z dokładnością do czynnika 2! Implikuje to analogiczną niedokładność wyznaczenia stałej Hubble'a: $H = 100h \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$, gdzie

$h \in \left(\frac{1}{2}, 1\right)$. Z tego też powodu jednostką osi X na rysunku 1 jest $h^{-1}\text{Mpc}$. Rozrzut punktów na tym rysunku wynika nie z błędów odczytania tych empirycznych związków (co w tym przypadku jest nieistotne), lecz z rzeczywistego rozrzutu jasności galaktyk, który implikuje błąd odległości około 20%. Na rysunku 1 zostały naniesione dodatkowo proste $v = H(1 \pm 0,2)r$ i dane obserwacyjne nie przeczą możliwości, że istotnie galaktyki poruszają się z prędkościami czysto hubblewskimi, tzn. wynikającymi z ekspansji Wszechświata (nazywamy to przepływem hubblewskim) natomiast rozrzut bierze się *wyłącznie* z niedokładności wyznaczenia odległości.

A jakie mogłyby być inne przyczyny rozrzutu? Galaktyki nawet w skalach dużo większych od gromad galaktyk nie są ułożone idealnie równomiernie, muszą więc zaburzać przepływ hubblewski. Uprzednio opisaliśmy hipotezę, według której stanowiłyby one jedynie „wyspy” widzialnej materii w morzu ciemnej materii niebarionowej. Nie mamy zatem żadnej pewności, czy rozkład galaktyk odzwierciedla wiernie rozkład materii we Wszechświecie. Niemniej skoro występują niejednorodności rozkładu galaktyk, to zapewne występują również niejednorodności rozkładu masy. W skalach większych od kilku $h^{-1}\text{Mpc}$ względne kontrasty gęstości przestrzennej galaktyk δ_n ($\delta_n = (n(\bar{x}) - n)/n$, gdzie $n(\bar{x})$ oznacza gęstość przestrzenną rozkładu galaktyk, uśrednioną w danej skali, natomiast n oznacza globalną średnią) są mniejsze od jedności. Jeśli to samo jest prawdą dla kontrastu masy, δ_ρ , wówczas przepływ galaktyk będzie zaburzony nieznacznie. Grawitacyjne przyciąganie niewielkiej (względnie!) koncentracji masy spowodowałoby nadanie pobliskim galaktykom dodatkowych, niewielkich (względem czysto hubblewskich) prędkości, skierowanych ku centrum zaburzenia. Ponieważ potrafimy mierzyć jedynie składowe radialne prędkości, więc efekt występowania tych tzw. prędkości własnych galaktyk (tzn. względem ekspandującego jednorodnie tła) byłby najlepiej mierzalny dla galaktyk obserwowanych w dość wąskim stożku wokół kierunku łączącego centrum zaburzenia z obserwatorem.

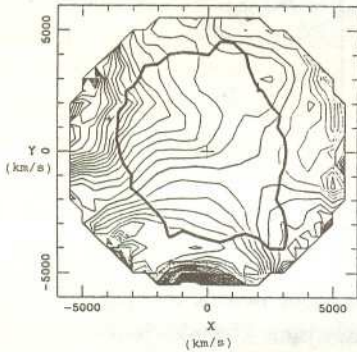
W 1987 roku grupa astronomów, przezwana żartobliwie przez kolegów Siedmioma Samurajami, ogłosiła odkrycie takiej koncentracji materii, oddalonej od nas o około $40 h^{-1}\text{Mpc}$ w gwiazdozbiórze Centaura. Diagram Hubble'a dla galaktyk obserwowanych w kierunku tego centrum przyciągania, nazwanego Wielkim



Rys. 2

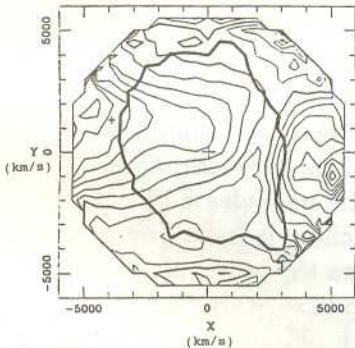
Atraktoorem, uzupełniony o nowe dane, uzyskane przez inną grupę badawczą dla galaktyk znajdujących się poza centrum przedstawia rysunek 2. Wydaje się, że istotnie punkty układają się mniej więcej wokół esowatej krzywej, będącej wynikiem teoretycznego obliczenia pola prędkości galaktyk w obecności koncentracji materii: znajdujące się między centrum przyciągania a obserwatorem galaktyki powinny być przyspieszane, znajdujące się zaś poza centrum powinny być spowalniane względem przepływu hubblowskiego. Niestety, parametry modelu są wciąż słabo wyznaczone przez dane obserwacyjne, jako że np. typowa prędkość własna galaktyki znajdującej się w odległości $50 h^{-1} \text{Mpc}$ wynosi $\sim 600 \text{ km/s}$, natomiast 20% błąd wyznaczenia odległości oznacza błąd 1000 km/s w określeniu prędkości hubblowskiej. Zatem dla pojedynczej galaktyki „szum jest silniejszy od sygnału”! Niemniej, można próbować pozbyć się go „wygładzając” pole prędkości radialnych przez uśrednienie ich po odpowiednio dużych obszarach. Ponadto okazuje się, że przy pewnych naturalnych założeniach dotyczących procesu grawitacyjnego narastania zaburzeń w ekspandującym Wszechświecie z pola prędkości radialnych można odtworzyć pole pełnej, trójwymiarowej prędkości.

Dla $\delta_\rho \ll 1$ można stosować tzw. liniową teorię narastania zaburzeń. W ramach tej teorii istnieje prosty związek między polami prędkości własnych i gęstości materii: strumień prędkości własnych przez dowolną powierzchnię zamkniętą do jej wnętrza jest proporcjonalny do względnej nadwyżki masy w tym obszarze. Czynniki proporcjonalności f zależy od średniej gęstości materii $f = f(\rho)$ i jest jej funkcją rosnącą. Jest tak, ponieważ w gęstym Wszechświecie już niewielkie względne kontrasty gęstości oznaczają duże nadwyżki masy, powodujące duże prędkości własne. Z obliczeń wynika, że $f(\rho) = \left(\frac{\rho}{\rho_{kr}}\right)^{0,6}$. Innymi słowy, pole prędkości własnych pozwala nam wyznaczyć, z dokładnością do stałego czynnika, pole gęstości masy, czyli $f(\rho) \cdot \delta_\rho(\vec{x})$. Tak wyznaczone pole gęstości masy możemy teraz porównać z polem gęstości przestrzennej galaktyk odtworzonym bezpośrednio z katalogów. Może się okazać, że pola te mają się nijak do siebie. Byłaby to sytuacja fatalna dla kosmologii, ponieważ możliwy do zaobserwowania rozkład galaktyk nie mówiłby nic o prawdziwym rozkładzie materii we Wszechświecie. Być może jest jednak tak, że oba rozkłady są skorelowane: gdzie góry (zagęszczenia) w rozkładzie materii, tam i góry w rozkładzie galaktyk, a gdzie doliny (pustki) – to doliny. Oczywiście, nie ma powodu, aby wysokość gór była koniecznym identyczna w obu przypadkach, zatem najprościej jest zapostulować, że $\delta_n = b \cdot \delta_\rho$, gdzie b jest stałą proporcjonalności. Ponieważ z pola prędkości wyznaczamy bezpośrednio $f(\rho)\delta_\rho$ zatem naszą hipotezą jest $\delta_n \stackrel{(?)}{=} \frac{b}{f(\rho)} (f(\rho)\delta_\rho)$.



Rys. 3a. Rozkład masy.

Rysunek 3a przedstawia mapę gęstości masy $f(\rho)\delta_\rho$ wyznaczoną w pewnej wybranej płaszczyźnie, w której leży nasza Galaktyka (jej położenie oznacza duży krzyż) i Wielki Atraktor, natomiast rysunek 3b przedstawia mapę rozkładu przestrzennego galaktyk w tej płaszczyźnie, skonstruowaną na podstawie obserwacji wykonanych przez Astronomicznego Satelitę Podczerwieni, IRAS-a. Wydaje się, że poziomicie pól gęstości (lekką pogrubioną kreską oznacza $\delta = 0$) są rzeczywiście skorelowane: na obu rysunkach widać wyraźnie Wielki Atraktor (mały krzyżyk). Na mapie gęstości galaktyk jest widoczne również ich zagęszczenie w kierunku dokładnie przeciwnym do Wielkiego Atraktora (w gwiazdozbiorze Perseusza i Ryb), natomiast na mapie gęstości masy występuje ono słabiej i w trochę innym miejscu. Jednakże w obszarach tych bardzo niewiele galaktyk ma wyznaczone prędkości własne – obszar, w którym jakość danych znacząco przewyższa szum jest ograniczony grubą linią. Tak więc, obecne dane nie są sprzeczne z hipotezą, że istotnie rozkład galaktyk dokładnie odzwierciedla rozkład (ciemnej) materii we Wszechświecie. Formalna analiza danych wykazuje, że $b \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{kr}}\right)^{-0,6} \approx 1$. Co więcej, wstępne próby uwzględnienia nieliniowych poprawek i dzięki temu niezależnego oszacowania b i ρ sugerują, że $b \approx \frac{\rho}{\rho_{kr}} \approx 1$. Tak więc oczekujemy na nowe dane, które, być może, pozwolą potwierdzić przypuszczenia wielu kosmologów, że Wszechświat ma średnią gęstość materii dokładnie równą krytycznej. Oznaczałoby to między innymi, że Jego Ostatecznym Przeznaczeniem jest rozwiązanie pośrednie między Wielkim Kolapsem a Ekspansją w Nicość...



Rys. 3b. Rozkład galaktyk według IRAS'a.