

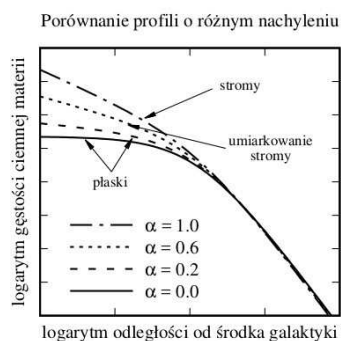
* Centrum Astronomiczne
im. M. Kopernika PAN

Krzywa rotacji to wykres prędkości kołowej gwiazd w dysku galaktyki jako funkcji odległości od jej środka. Przy wyznaczaniu krzywej rotacji z obserwacji prędkości gwiazd wzdłuż linii widzenia należy uwzględnić nachylenie dysku w stosunku do obserwatora.

Temperatura materii jest związana z prędkościami tworzących ją cząstek. Ciemna materia jest kinematycznie zimna – cząstki mają prędkości dużo mniejsze od prędkości światła. Przeciwnie zimnej ciemnej materii jest gorąca materia, której cząstki poruszają się z relatywistycznymi prędkościami.

Więcej o symulacjach kosmologicznych napiszemy w Δ_{18}^5 .

O innym z problemów pisał też niedawno Wojciech Hellwing w Δ_{17}^{11} .



Cztery profile gęstości ciemnej materii różniące się nachyleniem w centrum galaktyki. Jednostki na osiach są umowne, a znaczniki służą jedynie ogólnemu wyobrażeniu skali.

Tajemnica ciemnej materii fascynuje naukowców od dekad: w latach siedemdziesiątych Vera Rubin zaobserwowała odbiegające od przewidywań zachowanie się krzywej rotacji galaktyki w Andromedzie (M31). Nie da się jej wyjaśnić na gruncie dynamiki Newtona bez uwzględnienia, obok obserwowanych gwiazd, gazu i pyłu, dodatkowego masywnego składnika rozciągającego się daleko poza obszar zajmowany przez materię świecąca. Składnik ten nazywamy *halo ciemnej materii*.

Ciemna materia istnieje w powszechnej świadomości jako niestandardowe „niewidzialne cząstki”. Takie rozumienie jest poniekąd uzasadnione. Z definicji ciemna materia oddziałuje jedynie grawitacyjnie (oczywiście nie jest wykluczone, że podlega również jakimś innym, nieodkrytym do tej pory siłom), a tym samym różni się od zwykłej (barionowej) materii oddziałującej także elektromagnetycznie oraz jądrowo (słabo i silnie). Ciemnej materii nie da się zatem zobaczyć, można jedynie *poczuć* jej wpływ.

Aby formułować przewidywania dotyczące ciemnej materii w poszczególnych galaktykach, potrzebny jest model kosmologiczny i jego pełny opis matematyczny. Obecnie powszechnie stosuje się model Λ CDM (*Lambda Cold Dark Matter*), czyli model zimnej ciemnej materii ze stałą kosmologiczną Λ . Z danych satelity Planck badającego mikrofalową poświatę po Wielkim Wybuchu wynika, że Wszechświat składa się w 5% z materii barionowej, zaś ciemna materia stanowi aż 27%. Pozostała większość, czyli 68% to wspomniana już stała kosmologiczna, zwana także *ciemną energią*.

Uzbrojeni w model kosmologiczny możemy prześledzić wynikającą z niego ścieżkę ewolucyjną Wszechświata oraz porównać przewidywania z jego aktualnym stanem (13,8 miliardów lat po Wielkim Wybuchu). Rozwiązania analityczne tak złożonych problemów są, niestety, nieosiągalne. Z tego też powodu w badaniach formowania się struktur i ewolucji Wszechświata posilkujemy się symulacjami komputerowymi, w których cząstki reprezentujące różne składniki galaktyk poruszają się zgodnie z opisującymi je prawami fizycznymi, a odpowiednie równania rozwiązywane są numerycznie. Obecnie do największych symulacji wykorzystywane są superkomputery, ale symulacje zawierające kilkaset tysięcy cząstek można przeprowadzić w stosunkowo krótkim czasie nawet na domowym komputerze.

Wczesne symulacje Wszechświata w modelu Λ CDM wygenerowały szereg niezgodności z obserwacjami. Jedną z nich wiąże się z charakterem profilu (czyli wykresu gęstości $\rho(r)$ jako funkcji odległości od środka galaktyki) halo ciemnej materii (*cusp-core problem*).

Nachylenie profilu gęstości α w centrum galaktyki określa, asymptotycznie dla małych promieni, zachowanie funkcji $\rho(r)$ proporcjonalne do $r^{-\alpha}$. Rysunek przedstawia porównanie profili o różnych wartościach α , zarówno „stromych”, jak i „płaskich”.

Symulacje z lat 90. sugerowały, że istnieje uniwersalny dla wszystkich galaktyk, stromy w centrum ($\alpha = 1$) profil, zazwyczaj oznaczany NFW od nazwisk odkrywców: Navarro, Frenka i White’a, jednakże dopasowania teoretycznych krzywych rotacji do danych obserwacyjnych nie zgadzały się z tymi obliczeniami. Wręcz przeciwnie, pokazywały one, że w niektórych galaktykach rozkład ciemnej materii jest wręcz płaski. Dotyczy to głównie galaktyk karłowatych, które krążą wokół dużych galaktyk, np. Drogi Mlecznej. Galaktyki satelitarne są co prawda o rzędy wielkości mniejsze i mniej masywne od galaktyki głównej, ale odsetek zawartej w nich ciemnej materii sięga nawet 99%. Dominacja ciemnej materii sprawia, że wpływ nachylenia profilu na krzywą rotacji jest w przypadku galaktyk karłowatych silniejszy, a wykrycie rozbieżności między teorią a obserwacjami łatwiejsze.

Czy zatem powinno się odrzucić model Λ CDM? Niekoniecznie. W przypadku profilu NFW problemem okazały się bowiem same symulacje. Ze względu na ograniczone możliwości ówczesnych komputerów uwzględniały one jedynie



Ogólnopolska Matematyczna Konferencja Studentów „OMatKo!!!” to największe matematyczne wydarzenie przeznaczone dla studentów i doktorantów z całego kraju. Obok młodych matematyków, prezentujących swoje wyniki badań, gościmy również wielu specjalistów. W tym roku wykład otwierający konferencję wygłosi dr hab. Krzysztof Burnecki. Zapewniamy także dobrą zabawę, organizując m.in. loterię lamigłówek czy wieczorną integrację. Na „OMatKo!!!” możesz zachwycić teoretycznym lub praktycznym obliczeniem matematyki, wygrywając przy tym atrakcyjne nagrody – wystarczy, że wygłosisz referat albo stworzysz matematyczny plakat. Jeśli masz głowę pełną matematycznych pomysłów albo chcesz spędzić niezapomniany weekend w towarzystwie „królowej nauk”, to zapraszamy do Centrum Kongresowego Politechniki Wrocławskiej w dniach 13–15 kwietnia 2018 r.

Więcej informacji znajdziesz na stronie <http://omatko.im.pwr.wroc.pl>



Serdecznie zapraszamy na 4. Szkołę Kosmologiczną, która odbędzie się w Krakowie w dniach 8–22 lipca 2018 r. Szkoła przeznaczona jest w zamierzeniu dla studentów i doktorantów, ale jej poprzednie edycje okazały się interesujące też dla starszych stażem naukowców. Wykładowcami będą wybitni polscy oraz zagraniczni specjaliści. Wykłady obejmą szeroki zakres zagadnień związanych z kosmologią obserwacyjną i teoretyczną. Organizatorzy kładą duży nacisk na warsztaty komputerowe z modelowania widm galaktyk, symulacji numerycznych oraz wykorzystania narzędzi Wirtualnego Obserwatorium. Więcej informacji wraz z formularzem rejestracyjnym można znaleźć na naszej stronie: cosmoschool2018.oa.uj.edu.pl Zapraszamy także na Facebooka: fb.me/CosmologySchool oraz Twittera: twitter.com/CosmologySchool

ciemną materię. Po dodaniu do symulacji materii barionowej zauważono, że procesy gwiazdotwórcze oraz wybuchy supernowych są źródłem dodatkowej energii, która wystarcza do spłaszczenia profilu ciemnej materii.

Problem kształtu profilu ciemnej materii nie jest jednak zamknięty.

Do „wypłaszczenia” profilu potrzebna jest dość duża, większa niż obserwowana w galaktykach karłowatych, masa zawarta w barionach. Obecnie nie potrafimy powiedzieć, jaki mechanizm mógłby być odpowiedzialny za powstawanie w tych galaktykach płaskiego rozkładu ciemnej materii. Co więcej, nie wiemy, jaki jest faktycznie profil ich halo.

Większość karłowatych galaktyk satelitarnych nie rotuje. Siła grawitacyjna jest w nich kompensowana chaotycznym ruchem gwiazd, mierzonym przez dyspersję prędkości, czyli średnie odchylenie od wartości średniej. Wyznaczenie nachylenia profilu ciemnej materii, a nawet masy halo z dopasowania profilu dyspersji prędkości jest znacznie trudniejsze niż z użyciem krzywej rotacji. Jest za to odpowiedzialna degeneracja profilu masy i anizotropii prędkości związanej z kształtem orbit, po jakich poruszają się gwiazdy w galaktyce. Degeneracja oznacza, że różne kombinacje parametrów profilu masy i anizotropii dają taki sam profil dyspersji.

Oczywiście, naukowcy nie dają tak łatwo za wygraną, ulepszając metody, które byłyby zdolne uporać się z degeneracją. Niestety, w tym miejscu pojawia się kolejna trudność: niewystarczająca jakość dostępnych danych obserwacyjnych. Płaski rozkład gęstości, o ile występuje, zajmuje tylko mały obszar w samym środku galaktyki (zauważmy, iż wykres na rysunku jest w skali logarytmicznej), mając silny wpływ na ruch gwiazd jedynie blisko centrum. Z powodu ograniczonej czułości instrumentów nie da się wykonać w tym obszarze spektroskopii, a tym samym pomiarów prędkości dla dużej liczby gwiazd, jaka byłaby konieczna do otrzymania wniosków statystycznie znaczących, czyli obciążonych małą niepewnością. Pozostaje nam zatem czekać na kolejne generacje przyrządów i dane, których mają dostarczyć.

Na zakończenie warto wspomnieć o niezwykle ciekawej, choć bardzo ograniczonej metodzie stwierdzenia obecności płaskiego rozkładu ciemnej materii. Metoda ta wykorzystywana jest od kilku lat, lecz pochylny się tutaj nad najnowszą (na chwilę redagowania niniejszego artykułu) pracą.

W Eridanus II, jednej z pobliskich galaktyk o bardzo małej jasności (tzw. galaktyk ultra-słabych), obserwuje się gromadę kulistą, która znajduje się na niebie w małej odległości od środka tejże galaktyki. Nie wiemy, jaka jest rzeczywista odległość gromady od centrum, ale... jeżeli gromada znajduje się na ciasnej orbicie, to byłaby obserwowana (po zrzutowaniu na płaszczyznę nieba) w małej odległości od środka w czasie całego okresu orbitalnego. Z drugiej strony, jeżeli orbita gromady jest szeroka, to ze względu na projekcję obserwowalibyśmy ją w pożądanym odległości tylko przez krótki czas jej orbitalnej wędrówki, a i to jedynie przy sprzyjającym nachyleniu płaszczyzny orbity względem obserwatora. Tym samym rozległa orbita nie jest wykluczona, ale jest mało prawdopodobna.

Jakie ma to znaczenie dla halo ciemnej materii? Po przeprowadzeniu symulacji astronomowie stwierdzili, że gromada mogłaby przetrwać na ciasnej orbicie jedynie w potencjale generowanym przez płaski rozkład ciemnej materii. Gdyby profil gęstości był stromy, gromada uległaby rozerwaniu w krótkim, w skali dynamiki galaktyk, czasie, co dodatkowo zmniejszałoby prawdopodobieństwo dokonanej obserwacji.

Opisane podejście bynajmniej nie wyklucza stromego profilu. Pokazuje jedynie, iż musiałyby zaistnieć wiele (zbyt wiele?) korzystnych dla obserwatora okoliczności, aby dane zgodziły się z teorią.

Λ CDM to, oczywiście, nie jedyny „poważny” model kosmologiczny. Pamiętajmy, że do tej pory nie udało się zarejestrować cząstek ciemnej materii. Rozwijane są modele, w których ten dodatkowy składnik Wszechświata nie występuje, ale wymagają one modyfikacji naszego rozumienia grawitacji... to jednak temat na inny artykuł.