

# Zbyt wielkie, by zgasnąć, czyli kryzys w sferach niebieskich

Wojciech HELLWING\*

\*Instytut Kosmologii i Grawitacji,  
Uniwersytet w Portsmouth

Sam termin *too big to fail* jest sporo starszy: został spopularyzowany przez amerykańskiego kongresmena Stewarta McKinneya w 1984 roku podczas kongresowych przesłuchań w sprawie ubezpieczeń federalnych depozytów.

Model LCDM przewiduje, że Kosmos w około ćwierci swojej masy składa się z grawitującej, acz nieświecącej ciemnej materii, a 70% przypada na ciemną energię, czyli kosmiczny dziwoląg zapewniający paliwo do wciąż przyspieszającej ekspansji czasoprzestrzeni. W końcu, pozostałe 5% tego, co istnieje, to tzw. materia barionowa, czyli znane nam na co dzień atomy (głównie wodór i hel), fotony i cała menażeria standardowego modelu cząstek elementarnych.



Układ gromad galaktyk Pocisk  
(Copyright NASA, CFA).

Model LCDM głosi, że każda galaktyka – od niepozornych karłów po olbrzymie galaktyki eliptyczne – zanurzona jest w o wiele większym i masywniejszym niż ona sama halo ciemnej materii. Grawitacja tej niewidzialnej materii utrzymuje gwiazdy na orbitach i powstrzymuje gorący gaz przed ucieczką z galaktyk. Bez ciemnej materii ani gwiazdy, ani galaktyki nie mogłyby powstać.

Kiedy parę lat temu światową gospodarką wstrząsał kryzys finansowy, termin „zbyt wielkie, by upaść” (*too big to fail*) ponownie zyskał na popularności. Twierdzenie to powtarzało wielu światowych przywódców i szefów banków centralnych, a jego główne przesłanie sprowadza się do tezy, że niektóre instytucje finansowe są zbyt duże i mają zbyt wielki wpływ na rynek, by pozwolić im upaść (zbankrutować). Nikt oczywiście wtedy nie przypuszczał, że podobny termin zostanie użyty kilka lat później do opisanego poważnego kryzysu, który nastąpił w sferach raczej odległych od światowej finansjery, bo w sferach niebieskich.

Historia ta zatoczyła już kilka kręgów, a jej tematyka jest wciąż gorąco dyskutowana w międzynarodowym środowisku kosmologów. Rozpoczęła się ona od artykułu naukowego opublikowanego w 2011 roku przez Mike’a Boylan-Kolchina i współpracowników pt. *Too big to fail? The puzzling darkness of massive Milky Way subhaloes*, czyli *Zbyt wielkie, by zgasnąć? Zagadkowa ciemność masywnych subhalo Drogi Mlecznej*, w którym autorzy przekonywali, że trudno jest pogodzić liczbę i parametry obserwowanych galaktyk satelitarnych Drogi Mlecznej (DM) z przewidywaniami standardowego modelu kosmologicznego.

Standardowy model kosmologiczny, czyli model zimnej ciemnej materii ze stałą kosmologiczną  $\Lambda$  (*Lambda Cold Dark Matter*, LCDM) jest największym osiągnięciem kosmologii ostatnich trzech dekad: tłumaczy zaskakująco dużą liczbę obserwacji astronomicznych dotyczących struktury, historii i innych własności naszego Wszechświata za pomocą zaledwie sześciu parametrów. W naszej opowieści najistotniejszym elementem będzie ciemna materia, o której, co prawda, nie wiemy zbyt wiele, ale mamy wiele istotnych obserwacji potwierdzających jej istnienie pochodzących z obserwacji świecącego gazu, dynamiki zderzeń galaktyk (np. gromady galaktyk Pocisk), soczewkowania grawitacyjnego i promieniowania relikтового tła. Model LCDM postuluje, że ciemna materia jest zimna. Termin ten nie odnosi się tutaj do temperatury w zwyczajowym rozumieniu, a do tego, jak duże są prędkości resztkowe cząstek ciemnej materii pochodzące z czasów, kiedy Wszechświat był młody i gorący. Zimna ciemna materia charakteryzuje się małymi prędkościami resztkowymi, gromadzi się więc w skupiska (zgęstki) o rozmiarach i masach od planet począwszy aż na wielkich gromadach galaktyk skończywszy (różnica ponad 20 rzędów wielkości masy!). Standardowa kosmologia postuluje, że rosnące zgęstki ciemnej materii, które kosmologowie nazywają halami (od słowa *halo*, czyli aureola, nie mylić z wysokogórkimi łąkami!), utworzyły domeny, w których mogły z czasem powstać i urosnąć wszystkie obserwowane obecnie galaktyki.

LCDM postuluje, że fizyka CM jest prosta, co pozwala oszacować, ile galaktyk – i jakiej wielkości – powinno się znajdować we Wszechświecie. W szczególności wobec galaktyk tak sporych jak DM możemy przewidzieć, ile powinny one mieć satelitów, takich jak np. Obłoki Magellana, oraz jaki powinien być rozkład ich rozmiarów i mas.

Model LCDM przewiduje istnienie o wiele większej liczby satelitów Drogi Mlecznej, niż rzeczywiście obserwujemy. Deficyt ten jest znany jako problem brakujących satelitów. Jego rozwiązanie okazało się jednak dosyć proste. Otóż, o ile rzeczywiście model LCDM przewiduje, że w galaktyce o wielkości Drogi Mlecznej powinny się znajdować setki skupisk ciemnej materii w przedziale mas galaktyk karłowatych, to większość z nich jest zbyt mała, by mogły w nich kiedykolwiek powstać gwiazdy, a więc i widzialne galaktyki. W uproszczeniu jest tak dlatego, że w przeszłości Wszechświat przeszedł dosyć burzliwą fazę,

Pierwsze gwiazdy były o wiele masywniejsze niż populacja obecnie obserwowanych gwiazd, były jednocześnie bardzo gorące, i zgodnie z prawem Wiena świeciły mocno w energetycznym ultrafiolecie. Ponieważ były bardzo masywne, kończyły zazwyczaj swój żywot w potężnych eksplozjach supernowych, które dodatkowo zapelniały kosmos energetycznymi fotonami.

nazywaną epoką rejonizacji, kiedy neutralne od czasu rekombinacji wodór i hel zostały ponownie zjonizowane przez ogromną ilość fotonów UV wyemitowanych przez pierwsze pokolenie gwiazdowych pionierów. Duża energia wewnętrzna gorącego zjonizowanego gazu wymaga odpowiednio głębokiej studni potencjału grawitacyjnego, by zatrzymać go przed ucieczką. Okazuje się, że większość pierwotnych skupisk ciemnej materii była za mało masywna, by osiągnąć ten efekt. Na okładce przedstawiona jest wizualizacja symulacji z projektu APOSTOLE grupy dr Tilla Sawali. Przedstawiony obszar z grubsza obejmuje rozmiary naszej lokalnej Grupy Galaktyk. Prawa dolna połowa rysunku na okładce przedstawia gęstość ciemnej materii. Widzimy, że model LCDM przewiduje istnienie setek tysięcy małych i większych zgęstek CM. Dwa największe skupiska gwiazd i CM odpowiadają DM i galaktyce Andromedy. Widzimy też, że tylko największe zgęstki CM zawierają gwiazdy, bo tylko one były w stanie utrzymać w sobie wystarczająco dużo gazu, podstawowego budulca gwiazd. Bez gazu zaś nie można, oczywiście, utworzyć gwiazd. Co więcej, nawet jeżeli niektóre małe hala ciemnej materii utworzą galaktyki, to ich kariera nie trwa długo: potężne siły pływowe większych galaktyk są w stanie zaledwie podczas kilku okrążeń orbitalnych dosłownie rozszarpać je na strzępy. Ich resztki obserwujemy jako bardzo blade ogony i pierścienie pływowe gwiazd orbitujących wokół m.in. naszej Galaktyki.

Nie jest zatem łatwo zaistnieć jako mała galaktyka satelitarna. Jeżeli jednak już się przetrwa i epokę rozgrzewania gazu przez pierwsze pokolenie gwiazdowych olbrzymów, i grawitacyjne siły pływowe, to ma się kilka spokojnych miliardów lat na orbitowanie dookoła galaktyki centralnej. Tu dochodzimy do sedna problemu *Zbyt wielkie, by zgasnąć* (ZWBZ). Model LCDM przewiduje, że w okolicy DM powinno być sporo dużych i dosyć gęstych satelitów, bo przecież tylko tacy „twardziele” mogli przetrwać kosmiczne zapasy. Jednak jeżeli zestawimy przewidywania komputerowych symulacji LCDM z obserwowaną gromadką satelitów DM, to okaże się, że widzimy ich o wiele za mało. Wyjaśnijmy przy okazji termin gęstość satelitów. Ponieważ grawitacja ciemnej materii zdecydowanie dominuje w tych układach, to właśnie ona dyktuje zwykłej materii, po jakich orbitach się poruszać. Badając ruch gazu i gwiazd w różnych odległościach  $R$  od środka galaktyki, możemy oszacować głębokość studni potencjału grawitacyjnego oraz krzywą rotacji galaktyki, tzn. prędkość orbitalną w funkcji odległości  $V(R)$ . Niemalże wszystkie skupiska ciemnej materii bez względu na ich wielkość można opisać jednym uniwersalnym profilem gęstości  $\rho(R) = \frac{\rho_0}{\left(\frac{R}{R_s} + 1\right)^2}$  nazwanym NFW od nazwisk jego twórców Julio Navarro, Carlosa Frenka i Simona White'a. Parametr  $\rho_0$  oznacza gęstość centralną, zaś  $R_s$  jest promieniem skalowania. Całkując ten profil względem promienia i przyrównując do całkowitej masy halo ciemnej materii, można wykazać, że  $\rho_0$  nie jest niezależnym parametrem i zależy od  $R_s$ . Dla halo o zadanej masie całkowitej  $M$  profil NFW jest zatem określony przez tylko jeden parametr: promień  $R_s$ . Odpowiada on miejscu, w którym logarytmiczne nachylenie profilu gęstości,  $\frac{d \log \rho(R)}{d \log R}$  wynosi  $-2$ . To oznacza, że dla  $R > R_s$  masa rośnie już wolniej niż  $R$ , a zatem prędkość orbitalna  $V(R)$  maleje. Wartość  $R_{\max}$  maksimum krzywej rotacji galaktyki  $V_{\max}$  jest zatem bezpośrednio związana z profilem gęstości  $\rho(R)$  i głębokością studni potencjału skupiska ciemnej materii.

Przy założeniu sferycznej symetrii i orbit kołowych  $V(R) = \sqrt{GM(<R)/R}$ , gdzie  $G$  to stała grawitacji Newtona,  $R$  to odległość od środka galaktyki, a  $M(<R)$  to całkowita masa zawarta wewnątrz kuli o promieniu  $R$ . Kształt krzywej rotacji będzie zależał jedynie od tego, jak wygląda wewnętrzny rozkład masy w galaktyce  $M(R)$ , a zatem od profilu gęstości ciemnej materii.

Z uwagi na wymagania obserwacyjne – potrzeba wielu gwiazd, by móc rzetelnie wyznaczyć uśrednioną prędkość orbitalną – pomiaru dokonuje się dla promienia kuli, z wewnątrz której dochodzi połowa całego obserwowalnego światła galaktyki ( $R_{1/2}$  to *half light radius*).

Dla większości znanych nam galaktyk satelitarnych DM zmierzono wartości prędkości orbitalnej  $V(R_{1/2})$ . Symulacje komputerowe zazwyczaj nie dostarczają dokładnych wartości  $R_{1/2}$ , używa się ich jednak do porównania przewidywań modelu z obserwacjami. Wystarczy zauważyć, że jeżeli danemu z symulacji satelicie ma odpowiadać jakakolwiek rzeczywista obserwowana galaktyka, to krzywa rotacji  $V(R)$  symulowanego halo musi gdzieś się przecinać ze zmierzoną encją  $V_{1/2}(R_{1/2})$  danej galaktyki. To spostrzeżenie doprowadziło Boylan–Kolchina i współpracowników do konkluzji, że jest niezmiernie trudno uzyskać w LCDM halo o masie odpowiadającej masie Galaktyki, które zawierałoby populację satelitów o krzywych  $V(R)$  kompatybilną z obserwacjami.

Masywne halo są po prostu zbyt wielkie, by zgasnąć – powinny zachować wystarczająco wiele gwiazd, by ich blask zarejestrowały nasze teleskopy.

Oszacowania ustalają masę halo naszej Galaktyki w przedziale  $(1 \div 3) \cdot 10^{12} M_{\odot}$ . Gdyby masa halo była mniejsza,  $(8 \div 14) \cdot 10^{11} M_{\odot}$ , to przewidywania dotyczące populacji satelitów można by łatwo pogodzić z obserwacjami.

Model ciepły przewiduje powstawanie takiej samej jak LCDM liczby dużych i średnich galaktyk oraz mniej zgęstek o masach galaktyk karłowatych; powinny one być także mniej gęste.

W astronomii widmowej *las Lymana-alfa* to seria linii absorpcyjnych w widmach odległych galaktyk i kwazarów. Linie odpowiadają przejściu wzbudzonemu elektronu w atomie wodoru. Ponieważ obłoki neutralnego wodoru są rozmieszczone na różnych odległościach wzdłuż całej linii widzenia, powodują one powstanie całego lasu linii w widmie.

Symulacje komputerowe, z których Boylan-Kolchin i inni wysnuli przewidywania LCDM, zawierały tylko CM, więc siłą rzeczy nie mogły uwzględnić zmian jej profilu przez wybuchy supernowych.

Co gorsza, model przewidywał satelity masywne, z krzywymi rotacji o sporych wartościach maksymalnych, które nigdzie nie przecinały się z żadnym punktem pomiarowym. Gdyby sytuacja ta dotyczyła tylko przypadków małych wartości  $V_{\max}$ , można by było użyć argumentów podobnych jak w przypadku problemu brakujących satelitów. Jednak model przewidywał istnienie zbyt wielu dużych satelitów o profilach gęstości niepasujących do obserwacji systemu satelitów DM. Ujmując sprawę w liczby, w otoczeniu DM powinno znajdować się co najmniej kilka satelitów o parametrach z przedziału pomiędzy Obłokami Magellana a galaktyką karłowatą w Strzelcu, jednak nigdzie ich nie widać. Gdzie się podziały?

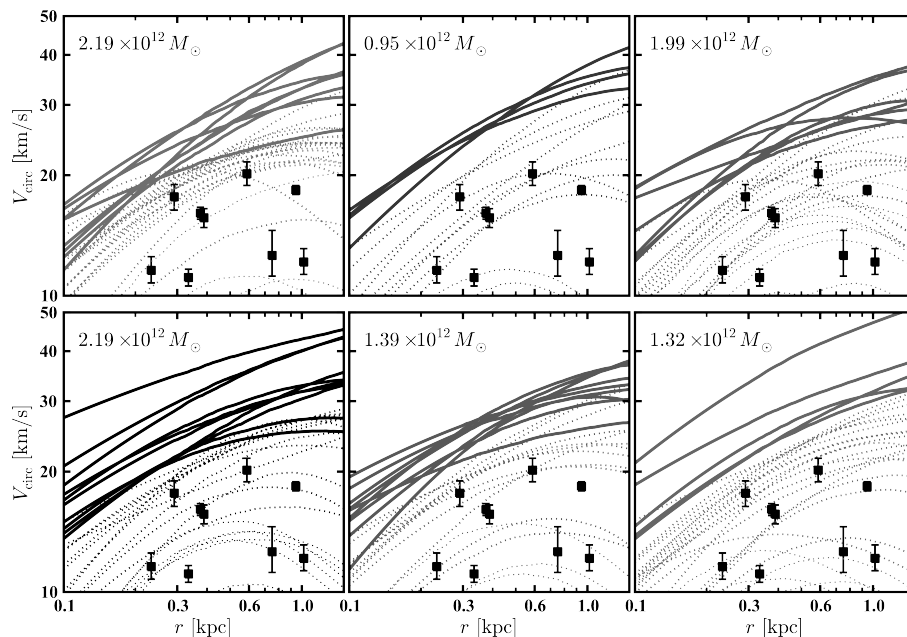
Wkrótce po publikacjach grupy Boylan-Kolchina z 2011 i 2012 roku pojawiła się cała seria artykułów dyskutująca możliwe sposoby rozwiązania zagadki. Po pierwsze, warto zauważyć, że problem ZWBZ pojawia się, gdy równocześnie próbujemy dopasować do obserwacji liczebność i gęstość satelitów. Różne fizyczne wielkości wpływają niezależnie na te dwie statystyki. Liczebność sporych satelitów silnie zależy od całkowitej masy halo centralnej galaktyki, można zatem uzgodnić model i obserwacje, postulując, że całkowita masa DM jest niższa, niż zakładaliśmy. Inne oszacowania oraz obecność Obłoków Magellana faworyzują natomiast dużą masę DM; sugerowałyby to niespotykaną wyjątkowość DM, bo bardzo trudno jest znaleźć w symulacjach halo centralne o małej masie, które równocześnie zawiera tak masywne satelity, jak oba Obłoki Magellana.

Problem ZWBZ zgłębia się również, poszukując alternatywnego mechanizmu fizycznego, który sprawiłby, że małe halo CM są mniej gęste. Popularna alternatywa modelu LCDM, w której taki efekt pojawia się naturalnie, to model ciepłej ciemnej materii (LWDM – *Lambda Warm Dark Matter*). W modelach „ciepłych” pierwotne prędkości cząstek ciemnej materii są znacząco większe, co oznacza, że ich masy spoczynkowe są odpowiednio mniejsze niż zimnej CM. Taka charakterystyka powoduje, że na skalach kiloparseków i mniejszych (czyli porównywalnych z rozmiarami galaktyk karłowatych) skupiska CM zostają niejako wygładzone. Jest tak dlatego, że większe prędkości cząstek CM pozwalają im wydostawać się spod grawitacji małych zaburzeń gęstości. Im cieplejszy model LWDM, tym mniejsze gęstości centralne i mniej małych halo. W ten sposób model LWDM w naturalny sposób rozwiązuje problem ZWBZ.

Czyżby to był więc koniec tej historii? Czy możemy uznać, że model LWDM lepiej pasuje do danych? Niestety, sprawy są bardziej skomplikowane. Istnieją mocne ograniczenia obserwacyjne na „ciepłotę” modelu LWDM. Obserwacje lasu linii Lymana- $\alpha$  informują nas dokładnie, ile w przestrzeni między galaktykami znajduje się małych obłoków neutralnego wodoru. Ponieważ takie obłoki powstają w niewielkich zagęszczeniach CM, obserwacje te dają nam wiedzę o minimalnej dopuszczalnej masie i liczbie małych zgęstek CM i sugerują, że CM może być co najwyżej letnia: dopuszczalne prędkości resztkowe są zbyt małe, by rozwiązać problem ZWBZ.

Trzecią popularną linią ataku na problem ZWBZ jest odwołanie się do fizyki galaktycznego gazu i gwiazd. Powstawaniu gwiazd towarzyszą bardzo energetyczne procesy, takie jak np. wybuchy supernowych. Gdyby w centrum małej galaktyki karłowatej wybuchło w stosunkowo krótkim czasie wiele supernowych, to rozgrzany i zjonizowany przez te wybuchy gaz uleciałby poza galaktykę. Zmniejszona w ten sposób energia potencjalna doprowadziłaby w efekcie do rozrzedzenia się profilu halo CM. Ilość energii, jaka jest potrzebna do znaczącego rozrzedzenia halo CM, jest jednak bardzo duża. Galaktyka, w której doszłoby do takiej niesłychanej kanonady, szybko utraciłaby cały gaz i nie mogąc wytworzyć nowych gwiazd, pozostałaby bardzo bleda. Tymczasem niektóre satelity DM mają jasności setek milionów słońc. Przystudiowanie innych procesów związanych z barionami, włączając w to aktywne supermasywne czarne dziury czy galaktyczne pola magnetyczne, dostarczyło dowodów, że nie

Reprodukcja rysunku 3 z pracy Boylan–Kolchin i in. 2012 (MNRAS 422, 1203–1218). Sześć paneli przedstawia krzywe rotacji  $V(r)$  satelitów zamieszkujących sześć różnych hal centralnych – analogów DM. U góry każdego panelu podana jest całkowita masa halo DM. Punkty ze słupkami błędów oznaczają pomiary dokonane dla 11 klasycznych satelitów DM. Na każdym rysunku grupa linii zaznaczona pogrubieniem odpowiada dużym i gęstym satelitom, które w żadnym punkcie swoich krzywych rotacji nie są zgodne z danymi.



są one w stanie zmniejszyć gęstości CM w galaktykach satelitarnych tak, by rozwiązać problem ZWBZ.

Wygląda więc na to, że żadne z proponowanych podejść nie oferuje w pełni satysfakcjonującego rozwiązania problemu brakujących gęstych satelitów w systemie Drogi Mlecznej. Na szczęście nie potrzebujemy wcale uciekać się do tak radykalnych postulatów, jak mała masa DM lub całkiem nowy model CM. Rozwiązanie zagadki kryje się w fizyce barionowej, a raczej w tym, że większość symulacji kosmologicznych jej nie uwzględnia. Grupa badaczy z Uniwersytetu w Durham pod kierownictwem Tilla Sawali użyła nowoczesnych kodów komputerowych projektu EAGLE do przeprowadzenia szeregu symulacji (projekt APOSTOLE) zaprojektowanych specjalnie do badania systemów, takich jak DM i Lokalna Grupa Galaktyk. Okazało się, że gdy poprawnie uwzględnimy procesy ogrzewające gaz galaktyczny, takie jak rejonizacja i supernowe, to nawet w sporych halach CM chwilowy ubytek masy na skutek „wywiania” gorącego gazu powoduje znaczące zmniejszenie się potencjału grawitacyjnego. Mimo że po jakimś czasie rozgrzany gaz ochładza się i powraca do galaktyk (co do tej pory uwzględniano teoretycznie w symulacjach bez barionów), to czasowe osłabienie grawitacji macierzystej galaktyki zauważalnie spowalnia tempo jej wzrostu. Ponieważ ostateczna masa skupiska CM równa się danemu tempu akrecji materii scałkowanemu względem kosmicznego czasu, to te same hala CM w symulacjach z pełną fizyką barionową ostatecznie odznaczały się całkowitą masą mniejszą o 10–20%. To zaś od razu przekładało się na zmianę krzywych  $V(R)$ , a zwłaszcza maksimum  $V_{\max}$ . Rysunek pokazuje, że obniżenie o 10–20% grupy krzywych niepasujących do danych w naturalny sposób sprawia, że większość z nich staje się zgodna z obserwacjami.

W ten oto sposób okazało się, że to nie model LCDM miał problemy z wyjaśnieniem obserwacji, tylko kosmologowie zmagali się z uzyskaniem rozsądnych przewidywań z założeń teoretycznych modelu. Mimo że ostatecznie wcale nie ma galaktyk zbyt wielkich, by zgasnąć, to nie jest to jeszcze koniec tej historii. Standardowy model kosmologiczny odnosi swoje główne sukcesy na największych kosmologicznych skalach rzędu setek milionów parseków. Skale znacznie mniejsze (rozmiarów galaktyk) wciąż ukrywają wiele tajemnic i nie jest pewne, czy LCDM sobie z nimi poradzi. Ciemna materia pozostaje ulotna: dotąd nie udało się zidentyfikować w naziemnych laboratoriach cząstki elementarnej za nią odpowiedzialnej. Nie wiemy zatem, czy CM jest zimna czy ciepła. Ostatnia dekada przyniosła wiele ciekawych obserwacji, które świadczą raczej na korzyść hipotezy ciepłej ciemnej materii, ale to już opowieść na inną okazję.

Projekt EAGLE (*Evolution and Assembly of Galaxies and their Environments*), czyli ewolucja i montaż galaktyk i ich środowisk, to seria nowoczesnych i dokładnych symulacji komputerowych, których celem jest zrozumienie, jak powstają i ewoluują galaktyki. Symulacje wyróżniają się implementacją (w uproszczeniu rzecz jasna) niemal wszystkich istotnych procesów fizycznych związanych z galaktykami i obejmują m.in. hydrodynamikę i ewolucję chemiczną ośrodka międzygwiazdowego, rejonizację i chłodzenie promieniste, cząsteczkowe i atomowe gazu, powstawanie gwiazd, galaktyczne wiatry powodowane przez supernowe, powstawanie oraz akrecja na supermasywne czarne dziury.

