

Czy niebarionowa ciemna materia jest potrzebna?

Sławomir Stachniewicz

1 XII 2009

1. Wstęp

Obecnie w kosmologii zdecydowanie najbardziej popularny jest tzw. Uzgodniony Model Kosmologiczny (Cosmological Concordance Model), w którym na zwykłą materię przypada zaledwie $1/25$ masy Wszechświata, ok. $1/5$ przypadają na niebarionową Zimną Ciemną Materię a reszta (czyli ok. $3/4$) byłaby w postaci stałej kosmologicznej lub tzw. Ciemnej Energii. Inaczej mówiąc jest to model zdominowany przez niewidoczne i bardzo trudne do wykrycia składniki. Wielu uczonych zadaje sobie pytanie, czy tak jest rzeczywiście i poszukują rozwiązań alternatywnych. Przez długi czas najpoważniejszym kontrkandydatem CDM był model MOND. Badania pary uczonych z IFJ wskazują na to, że zarówno Zimna Ciemna Materia jak i modele alternatywne mogą w ogóle nie być potrzebne.

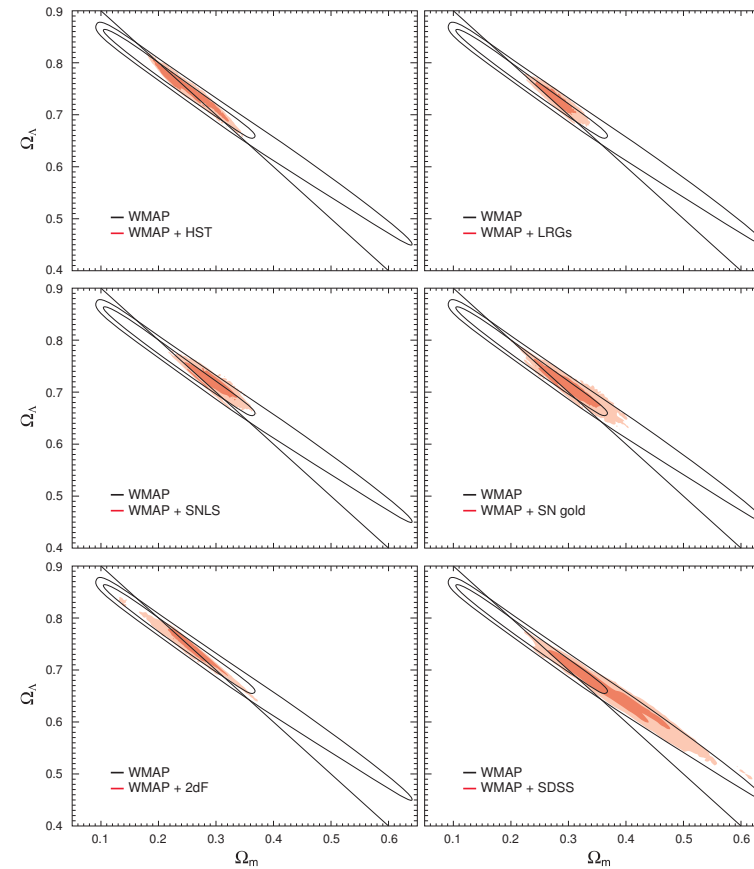
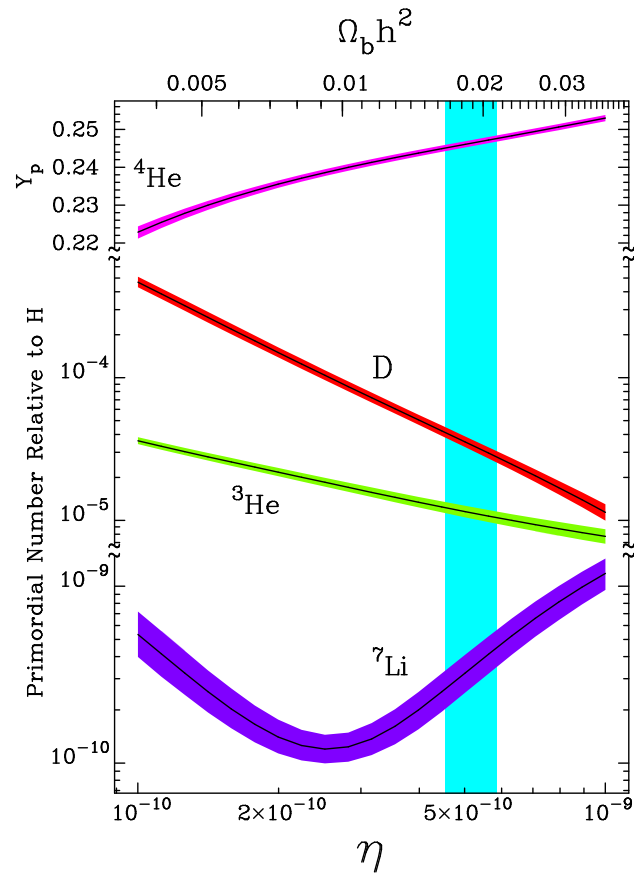
2. Deficyt masy

Początek problemu – późne lata 1930-e, gdy Shapley odkrył gromady galaktyk. Fakt, że gromadzą się w grupy, wydawał się trudny do zrozumienia. Rozkład wydawał się być bardzo anizotropowy i stwierdzono, że warunki początkowe ekspansji mogły być drastycznie zmienione przez oddziaływanie grawitacyjne.

W tym samym czasie Zwicky analizując rozkład prędkości w gromadach galaktyk wywnioskował, że w skali megaparseków struktury nie mogły osiągnąć stanu związanego bez istotnego udziału nieświecącej materii związanej z galaktykami. Oort w swojej analizie grawitacyjnego przyspieszenia prostopadłego do płaszczyzny galaktyki również stwierdził, że tylko ok. 1/2 masy całkowitej tworzy widzialne gwiazdy.

W miarę postępu wielkoskalowych pomiarów prędkości galaktyk w odległych gromadach problem ciemnej materii stawał się coraz bardziej poważny. Najbardziej znamienym przykładem są krzywe rotacji w galaktykach spiralnych – masa szacowana na ich podstawie jest kilkukrotnie większa niż masa materii świecącej.

Problem występuje również w kosmologii. Pomiar anizotropii mikrofalowego promieniowania tła, ograniczenia z wielkoskalowej struktury Wszechświata i obserwacje SN Ia wskazują, że gęstość materii powinna być rzędu **0.25 gęstości krytycznej Wszechświata**, zaś standardowy model pierwotnej syntezy ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$ oraz ${}^7\text{Li}$ w zestawieniu z obserwacjami wskazuje na to, że **$\Omega_b h^2 \simeq 0.02$** , co kilka lat temu zostało potwierdzone przez satelitę WMAP (0.022).



Ograniczenia z nukleosyntezy, WMAP, SN Ia i wielkoskalowej struktury Wszechświata

3. Ciemna materia

Najprostszym i zdecydowanie najbardziej popularnym rozwiązaniem problemu niewidocznej masy jest dodanie niewidocznego składnika, tzw. ciemnej materii. Ze względu na wspomniane ograniczenia na ilość materii barionowej (a co za tym idzie, również barionowej ciemnej materii), musiałaby to być materia niebarionowa. Ze względu na ograniczenia obserwacyjne wchodziłyby w grę głównie tzw. zimna ciemna materia (Cold Dark Matter, CDM). Najpopularniejsi kandydaci:

- ⇒ WIMP (Weak Interacting Massive Particles), zwłaszcza tzw. najlżejszy partner supersymetryczny (neutralino?)
- ⇒ aksjony
- ⇒ masywne neutrina

⇒ monopole.

Problem w tym, że to wszystko są cząstki hipotetyczne, nie wykryte nawet pośrednio, czyli poszukiwanie rozwiązań alternatywnych jest w pełni uprawnione.

4. Modyfikacja grawitacji

Najprostszą modyfikacją byłoby dodanie członu zależnego od $1/r$:

$$g(r) = \left(\frac{G}{r^2} + \frac{A}{r} \right) M(r)$$

Niestety, to nie rozwiązuje problemu gdyż nie da się znaleźć A , które pasowałyby do wszystkich galaktyk.

W 1983 r. izraelski fizyk M. Milgrom zaproponował prosty model fenomenologiczny, czyli właśnie MOND. Założył on istnienie stałej (parametru) a_0 , dla którego

$$\begin{aligned} a &= a_{Newton} & a &\gg a_0 \\ \frac{a^2}{a_0} &= a_{Newton} & a &\ll a_0 \end{aligned}$$

(modyfikacja dynamiki) albo

$$g = g_{Newton}$$

$$g \gg a_0$$

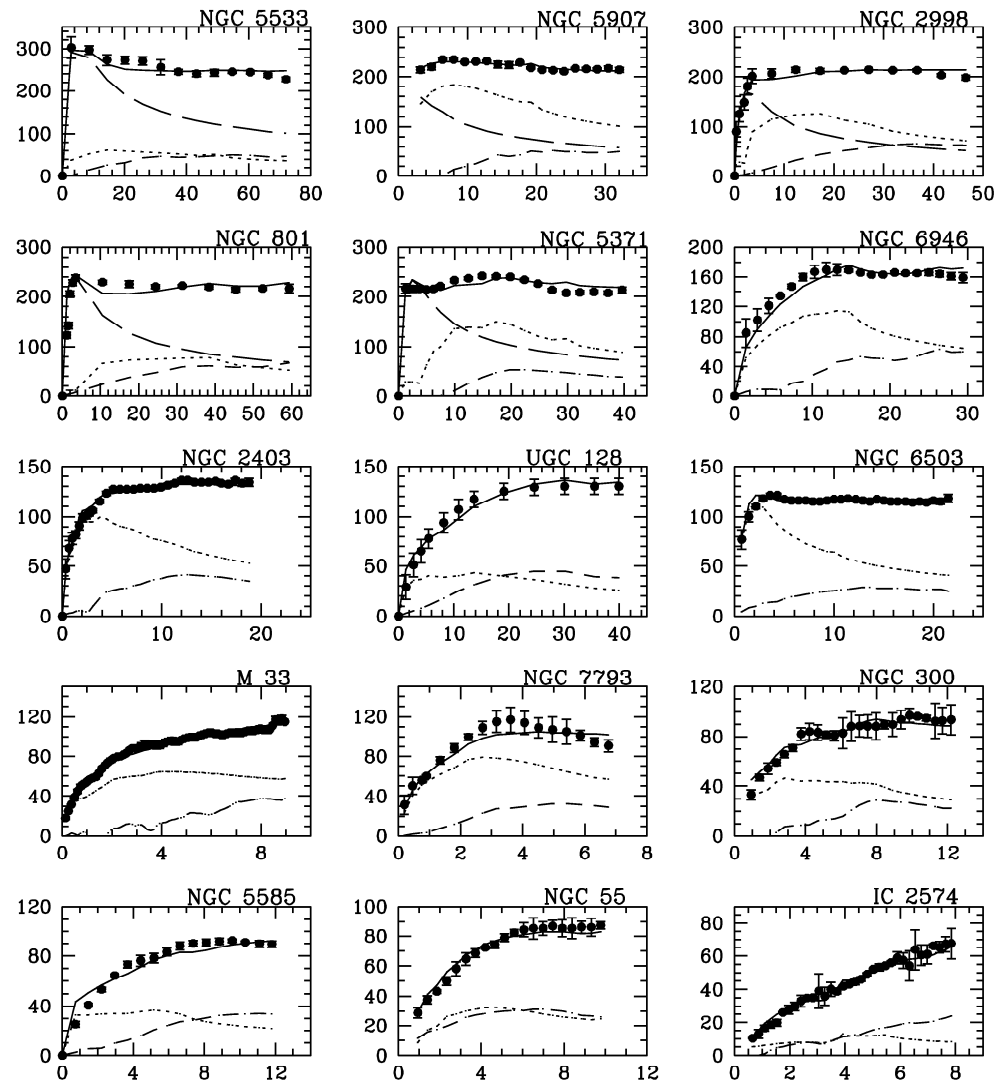
$$g = \sqrt{g_{Newton} a_0}$$

$$g \ll a_0$$

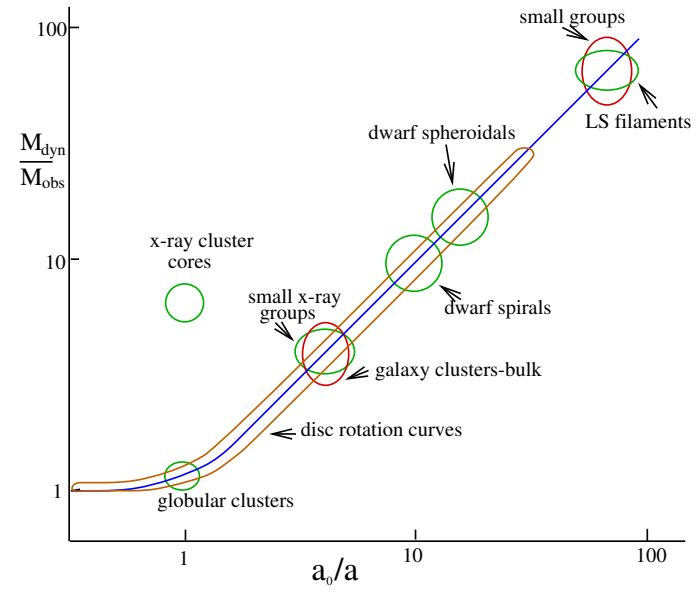
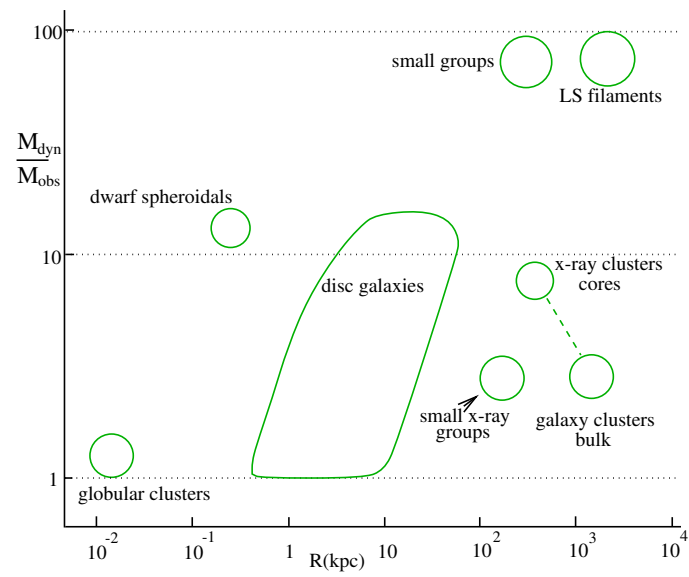
(modyfikacja grawitacji).

Okazuje się, że istnieje a_0 które pasuje do wielu klas obiektów (galaktyki spiralne, gromady kuliste...)

$$a_0 = (1.2 \pm 0.8) \times 10^{-8} \text{ cm/s}^2 \quad (\text{Sanders, Verheijen 1998})$$



Krzywe rotacji galaktyk spiralnych i przewidywania MOND



Milgrom, astro-ph/9810302

Główne problemy:

⇒ brak zadowalającej teorii wiążącej MOND z OTW czyli m.in. nieznaną wpływ na kosmologię

⇒ skąd się bierze a_0 ? Jest zadziwiająca koincydencja z cH_0 .

Sanders, 1998: dla $z > 3$ obszar MOND jest mniejszy niż horyzont zdarzeń czyli prawdopodobnie dla dużych z nie wpływa na ewolucję czynnika skali, do badania wczesnego Wszechświata wystarczy brać „zwykłe” modele Friedmanna.

Bekenstein w 2004 r. opublikował zgodną z OTW i dającą podobne co MOND przewidywania teorię, którą nazwał TeVeS (Tensor Vector Scalar) od trzech wprowadzonych pól (wcześniej wraz z Milgromem udowodnili, że jedno ani dwa nie wystarczą). Entuzjaści podkreślają, że to jest od dawna wyczekiwane

relatywistyczne rozszerzenie MOND. Zdaniem sceptyków jest to bardzo skomplikowana teoria mająca dawać bardzo prosty efekt a wspomniane pola są wprowadzone ad hoc i w ten sposób traci się prostotę i elegancję modelu MOND.

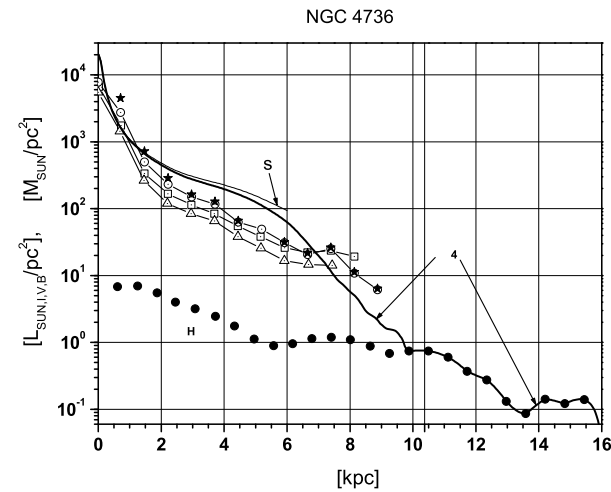
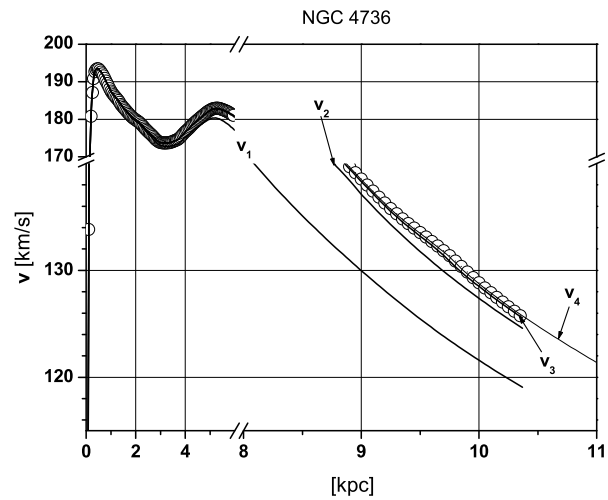
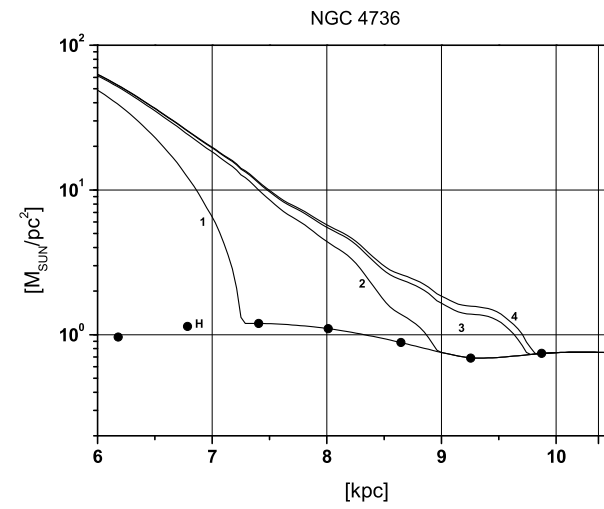
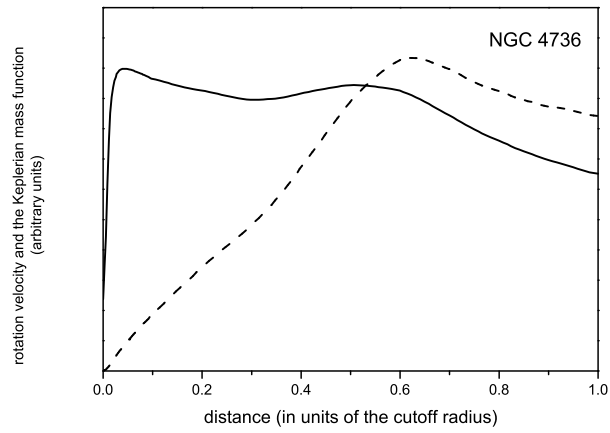
Od pewnego czasu uczeni zaczęli poważniej traktować MOND i wielokrotnie próbowali go weryfikować. Wyniki nie są jednoznaczne: wiele testów potwierdza MOND (co oznacza, że jest to przynajmniej bardzo dobry model fenomenologiczny) a niektóre są niezgodne z tym modelem, ale żaden z nich nie mógł go ostatecznie wykluczyć.

5. Czy galaktyki spiralne potrzebują ciemnej materii?

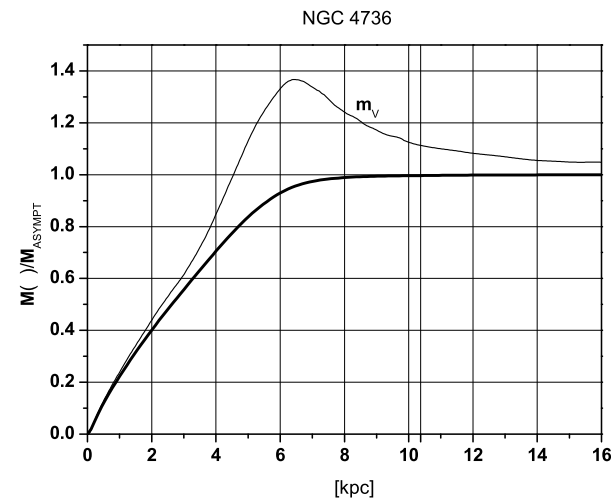
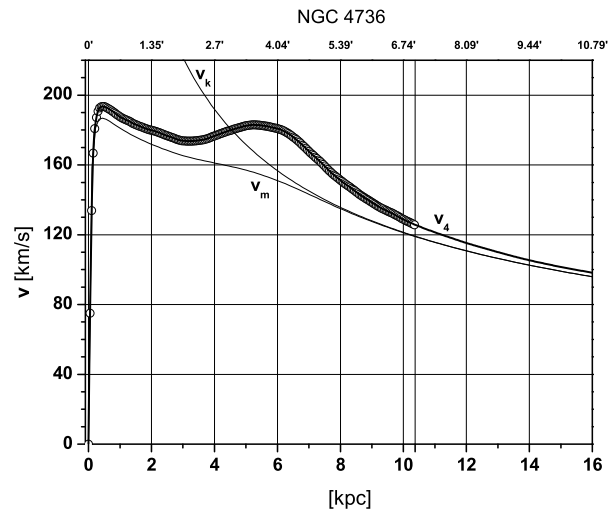
Kilka lat temu tym problemem zajęła się para krakowskich astrofizyków, Joanna Jałocha (był to temat jej pracy doktorskiej) i Łukasz Bratek. Napisali na ten temat (wspólnie z prof. Markiem Kutschera) kilka publikacji a jedna z nich została rozpropagowana na stronie czasopisma New Scientist i wzbudziła sensację wśród uczonych. Ich zdaniem jeśli się zastosuje odpowiedni model to w wielu galaktykach spiralnych **nie ma potrzeby wprowadzania niebarionowej ciemnej materii ani dodatkowej grawitacji, gdyż materia zawarta w gwiazdach w zupełności wystarczy.**

Nowatorstwo ich podejścia polegało na tym, że zakwestionowali powszechnie stosowany model oparty na sferycznej symetrii

(dysk materii widzialnej zanurzony w sferycznym halo ciemnej materii) i zastosowali model cienkiego dysku. Model ten nie był z powodzeniem stosowany ze względu na to, że jest dość niewygodny w użyciu (jest oparty na funkcjach Bessel'a). Opracowali test sferyczności galaktyki (sprawdzający, czy dla danej galaktyki w ogóle można stosować założenie o sferycznej symetrii, przy czym przejście tego testu wcale nie musi oznaczać, że galaktyka jest sferycznie symetryczna) oraz oryginalną metodę iteracyjnego obliczania rozkładu gęstości powierzchniowej na podstawie krzywej rotacji. Temu pierwszemu testowi poddali 100 galaktyk spiralnych o bardzo dobrze zmierzonych krzywych rotacji, z których ok. 20 tego testu nie przeszło i właśnie te galaktyki zbadali dokładniej. Najlepsze wyniki otrzymali dla galaktyki NGC 4736.



Test sferyczności, gęstość powierzchniowa, krzywe rotacji i porównanie z innymi pracami.



Krzywa rotacji NGC 4736 wraz z asymptotą keplerowską oraz funkcja masy porównana z krzywą keplerowską otrzymaną przy założeniu sferycznej symetrii.

Otrzymany przez nich stosunek masy do jasności nie jest wielkością stałą, ale oscyluje w „rozsądnych” granicach (dla NGC 4736 w zależności od filtru i rejonu galaktyki otrzymywali wartości od 0.3 do 4.3 a średnio ok. 1.2, co uważa się za typowe

dla gwiazd o masach niższych niż masa Słońca). Wprowadzenie ciemnej materii lub modyfikacja grawitacji znacząco popsułyby ich model. Wspomniane wyniki wskazują na to, że istnieje przynajmniej jakaś klasa galaktyk spiralnych, które nie są zdominowane przez ciemną materię (o ile w ogóle ją zawierają).

6. Podsumowanie

Model Zimnej Ciemnej Materii jest jednym z fundamentów obecnie obowiązującego Standardowego Modelu Kosmologicznego, a zwłaszcza modelu formowania struktur we Wszechświecie. To właśnie ciemna materia miała umożliwić powstawanie struktur po Wielkim Wybuchu. Brak ciemnej materii w galaktykach spiralnych oraz eliptycznych (na to drugie zdaje się wskazywać praca Romanovsky'ego i innych z 2003 roku) oznaczałby spore problemy dla tego modelu, a w konsekwencji konieczność poważnej rewizji naszych poglądów na naturę lub przynajmniej historię Wszechświata.