

Na Zachodzie bez zmian

czyli ciemna materia czy MOND?

1. Wstęp.

Obecny model kosmologiczny cierpi na **problem krótkiej kołdry**: jeśli coś wystaje z jednej strony i się tę kołdrę w tamtą stronę naciągnie, to zaczyna wystawać z innej. Aby rozwiązać problemy bez naruszania całej konstrukcji, dodaje się do modelu różne elementy:

⇒ niebarionową ciemną materię

⇒ ciemną energię

⇒ modele inflacyjne lub cyklicznego Wszechświata

ale wszystkie z nich są dodawane **ad hoc** – „bo się da” i rozwiązują jakieś problemy – ale w zamian za to wprowadzają inne.

W obecnie dominującym tzw. Uzgodnionym Modelu Kosmologicznym (Cosmological Concordance Model) na zwykłą materię przypada zaledwie $1/25$ masy Wszechświata, ok. $1/4$ przypadają na niebarionową ciemną materię, zaś ok. $7/10$ na ciemną energię. Problem w tym, że obydwa składniki to wprawdzie popularne, ale wyłącznie hipotezy, więc można (i należy) szukać innych rozwiązań.

2. Problem brakującej masy

Pierwsze sygnały pojawiły się w późnych latach 1930-ych, gdy Shapley odkrył gromady galaktyk. Fakt, że gromadzą się w grupy, wydawał się trudny do zrozumienia. Ich masa wydawała się zbyt mała, żeby mogła doprowadzić do obserwowanego rozkładu przestrzennego. 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 niewidocznej 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 obserwacji problem brakującej masy stawał się coraz bardziej poważny. Przykładem mogą być krzywe rotacji w galaktykach spiralnych – masa szacowana na ich podstawie jest kilkakrotnie większa niż masa materii świecącej.

Problem występuje również w kosmologii. Według oszacowań z roku 2020 (uwzględniających pomiary anizotropii mikrofalowego promieniowania tła, ograniczenia z wielkoskalowej struktury Wszechświata i obserwacje SN Ia) wskazują, że gęstość materii jest równa ok. **0.311 gęstości krytycznej Wszechświata**, zaś analiza anizotropii mikrofalowania tła (która obecnie daje wyniki znacznie dokładniejsze niż model pierwotnej nukleosyntezy) wskazuje na to, że **$\Omega_b h^2 \simeq 0.02242$, $h \simeq 0.677$** (czyli na materię barionową przypada zaledwie ok. 0.049 gęstości krytycznej).

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. Najpopularniejsi kandydaci:

- ⇒ WIMP (Weak Interacting Massive Particles), zwłaszcza tzw. najlżejszy partner supersymetryczny (np. neutralino) albo cząstki, których istnienie przewidują teorie zakładające istnienie dodatkowych wymiarów
- ⇒ aksjony, mogące być rozwiązaniem problemów z łamaniem symetrii CP (postulowane masy od μeV do eV)

- ⇒ pierwotne czarne dziury
- ⇒ kandydaci „egzotyczni”, jak WIMPzille, grawitina, gluina, niestandardowe układy cząstek elementarnych
- ⇒ kandydaci dawniej popularni, ale już w zasadzie odrzuceni, jak gorąca ciemna materia, masywne neutrino, gwiazdy bozonowe, nuggety kwarków dziwnych albo bozony Kaluzy-Kleina.

Problem w tym, że to wszystko są rozwiązania 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, który nazwał Zmodyfikowaną Dynamiką Newtonowską (Modified Newtonian Dynamics, czyli MOND). Założył on istnienie stałej (parametru) a_0 , dla którego

$$a = a_{Newton}$$

$$a \gg a_0$$

$$\frac{a^2}{a_0} = a_{Newton} \quad a \ll a_0$$

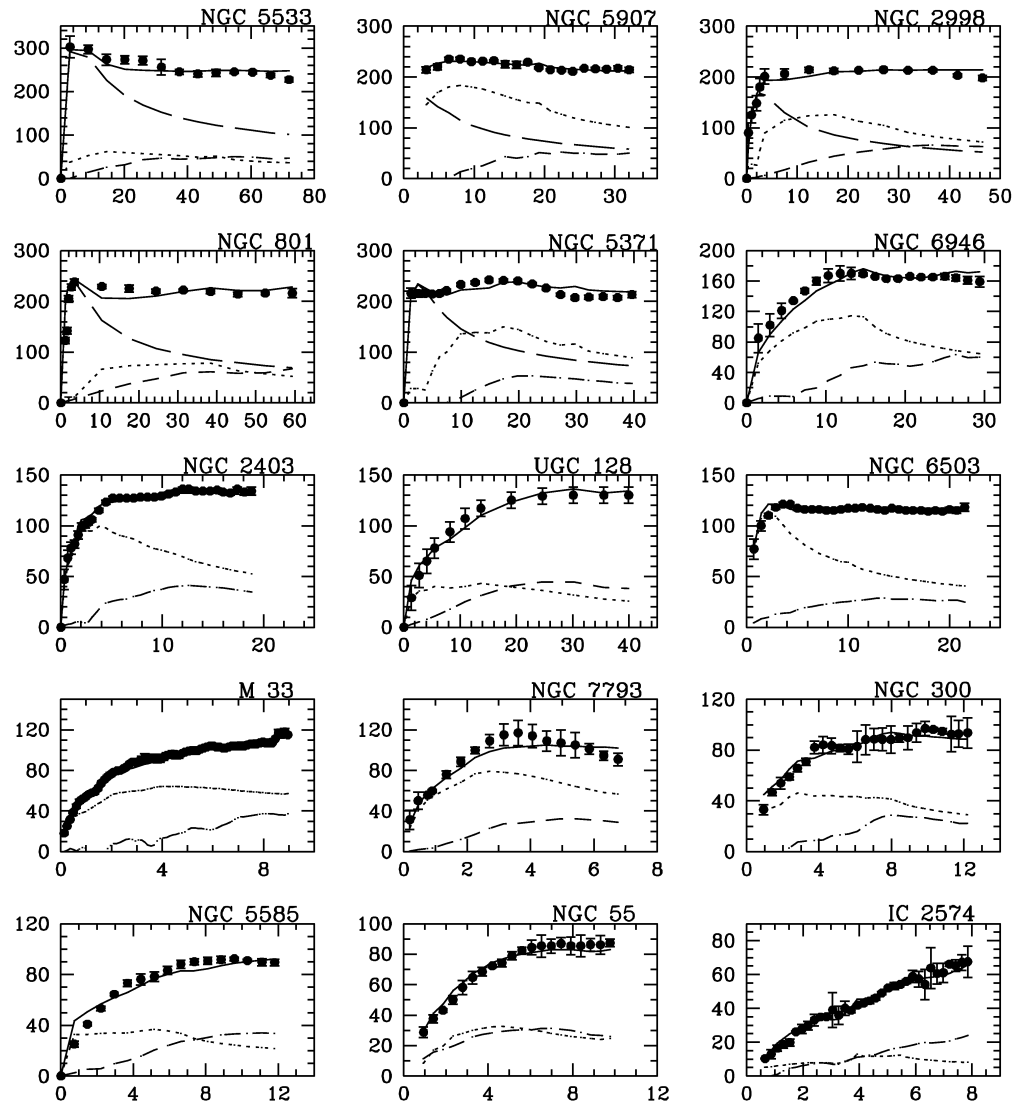
(modyfikacja dynamiki) albo

$$g = g_{Newton} \quad g \gg a_0$$
$$g = \sqrt{g_{Newton} a_0} \quad g \ll a_0$$

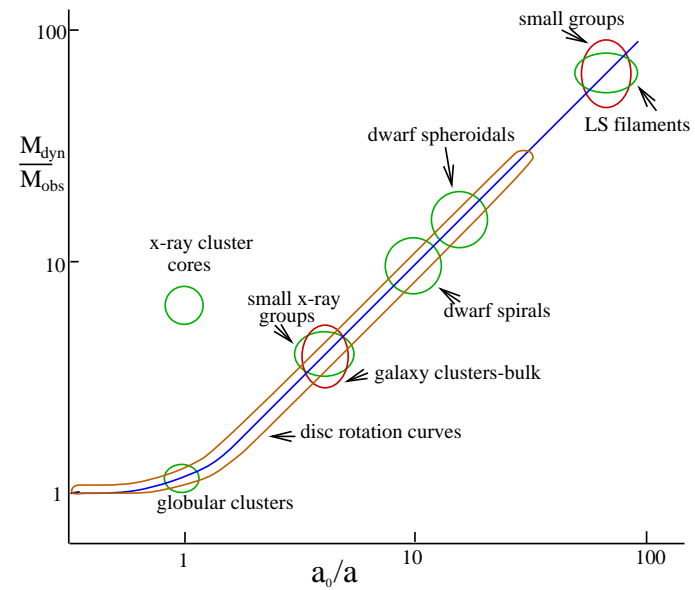
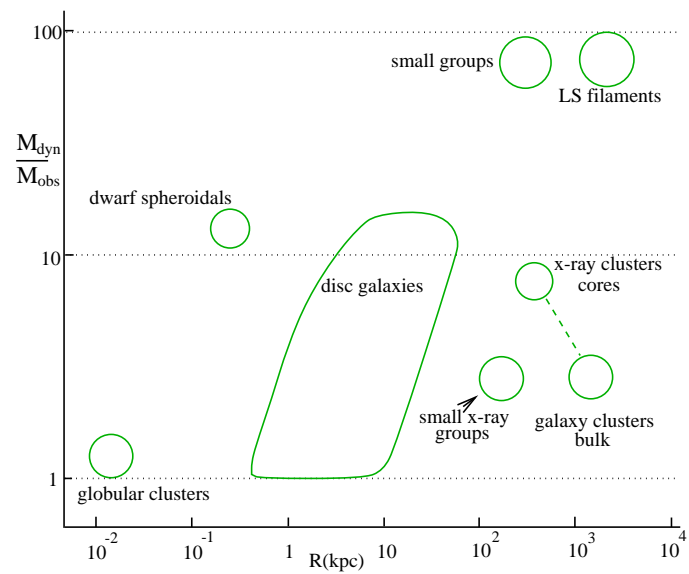
(modyfikacja grawitacji).

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



Problem brakującej masy w ujęciu tradycyjnym i MOND

Główne problemy:

- ⇒ jest to typowy model fenomenologiczny – działa ale nie wiadomo, dlaczego
- ⇒ skąd się bierze a_0 ? Jest zadziwiająca koincydencja z cH_0 .

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). 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. Doszło do tego, że niektórzy uczeni w swoich publikacjach stosują podejście hybrydowe: na małych skalach używają MOND a na wielkich ciemnej materii.

5. Czy tylko CDM i MOND?

Na początku obecnego stulecia para krakowskich astrofizyków, Joanna Jałocha-Bratek i Łukasz Bratek, zaproponowała opis galaktyk spiralnych przy pomocy **modelu cienkiego dysku**. Otrzymali zaskakująco dobre wyniki. Zaletą ich modelu jest to, że udało im się otrzymać poprawne wyniki bez wprowadzania niewidocznej masy i bez modyfikacji fizyki. Wady: rozwiązuje problem tylko dla jednego typu obiektów, poza tym bez dodatkowych założeń ich rozwiązanie byłoby niestabilne. Osobiście uważam, że ich podejście jest poprawne, ale najlepiej byłoby stosować je **razem z MOND** (a nie zamiast).

W 2007 r. John Moffat zaproponował modyfikację grawitacji, która (jego zdaniem) dobrze opisywała zachowanie naj-

bardziej problematycznej z punktu widzenia MOND **gromady Pocisk** i jednocześnie zachowywała zalety samego MOND. Hipoteza ta nie wywołała szerszego oddźwięku.

W tym samym roku M.E. McCulloch wystąpił ze swoją hipotezą „skwantowanej bezwładności” (**Quantised Inertia**). Główną zmianą (w porównaniu do MOND) jest zastąpienie parametru a_0 tzw. odległością współporuszającą się. Nie zagłębiałem się w tę hipotezę ale myślę, że w praktyce oznacza to zastąpienie stałej wprowadzanej przez MOND wyrazem proporcjonalnym do cH_0 .

W 2019 roku polski fizyk Marek Czachor (Politechnika Gdańska) zaproponował zastąpienie nienewtonowskiej fizyki nienewtonowską matematyką – zamiast zwykłego dodawania

wprowadzenie bardziej skomplikowanych działań (z użyciem odpowiednio dobranych funkcji i funkcji odwrotnych – coś w stylu relatywistycznego dodawania prędkości znanego ze Szczególnej Teorii Względności). Jego zdaniem, ta propozycja może również pomóc w rozwiązaniu wielu problemów modelu kosmologicznego.

Jakimś rozwiązaniem problemów MOND może być zastosowanie modeli hybrydowych (MOND plus nieco ciemnej materii). Problem w tym, że gdyby dodatkiem miała być materia niebarionowa, potrzeba wprowadzania MOND stałaby się problematyczna.

6. Podsumowanie

Mimo pracy wielu uczonych, problem brakującej masy ciągle nie został rozwiązany. W drugiej połowie lat 90. zainteresowałem się tym tematem i od tego czasu niewiele się zmieniło – „na placu boju” są głównie niebarionowa ciemna materia i jej najpoważniejszy kontrkandydat, jakim jest MOND. Wprawdzie pojawiły się również inne propozycje, ale nie wywołały szerszego oddźwięku. Uważam, że najlepszym komentarzem jest wygłoszone po którymś z moich wykładów na temat MOND stwierdzenie dr Waldemara Ogłózy z Uniwersytetu Pedagogicznego: [ciemna materia jest jak model Ptolemeusza, MOND jest jak model Tychona; czekamy na Keplera.](#)