

Inflacja, ciemna materia

i ciemna energia

1. Wstęp

Współczesna kosmologia bazuje na Ogólnej Teorii Względności, do której dodano dwa proste założenia:

- ⇒ Wszechświat jest **jednorodny** (tzn. z każdego punktu wygląda z grubsza tak samo) i **izotropowy** (tzn. wygląda z grubsza tak samo w każdym kierunku)
- ⇒ Zasada Kopernikańska: brak wyróżnionych punktów.

Te proste założenia poważnie ograniczają ilość możliwych rozwiązań – wszystkie muszą dać się opisać przy użyciu tzw. **Metryki Friedmanna-Lemaitre'a-Robertsona-Walkera**

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta d\varphi^2) \right]$$

gdzie t to czas, R to czynnik skali (zależny wyłącznie od czasu), r to odległość, k to krzywizna a ostatni człon to tzw. człon kątowny. Do tego jeszcze dodaje się założenie, że wszystkie rodzaje materii występujące we Wszechświecie dają się przybliżyć za pomocą tzw. **cieczy doskonałej** czyli że ciśnienie zależy wyłącznie od gęstości: $p = p(\rho)$. W efekcie otrzymujemy trzy równania:

Równanie Friedmanna

$$\dot{R}^2 + k = \frac{8\pi G}{3}\rho R^2 + \frac{\Lambda}{3}R^2$$

Równanie Raychaudhuri

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)R + \frac{\Lambda}{3}R$$

Równanie ruchu cieczy

$$R^3\dot{p} = \frac{d}{dt} [R^3(\rho + p)]$$

gdzie Λ to tzw. stała kosmologiczna, którą zresztą można wyeliminować przez wprowadzenie dość osobliwego składnika materii, tzw. ciemnej energii.

Obecnie najczęściej są brane pod uwagę trzy składniki materii:

⇒ materia („pył”): $p = 0$

⇒ promieniowanie: $p = \frac{1}{3}\rho$

⇒ ciemna energia: $p = -w\rho$

Stała kosmologiczna odpowiadałaby ciemnej energii o $w = 1$, pozostałe wartości występują w modelach typu quintessence ($w < 1$) i superquintessence ($w > 1$).

Po podstawieniu powyższych wartości do równań otrzymujemy różny typ zależności gęstości od czynnika skali i różne tempo ekspansji Wszechświata. Ogólnie rzecz biorąc

$$\rho \sim R^{-3(1+\alpha)}$$

a w szczególności

$$\Rightarrow \text{pył: } \rho \sim R^{-3}, R \sim t^{2/3}$$

$$\Rightarrow \text{promieniowanie: } \rho \sim R^{-4}, R \sim \sqrt{t}$$

$$\Rightarrow \text{stała kosmologiczna: } \rho = \text{const}, R \sim e^{t\sqrt{\Lambda/3}}$$

Widać, że gęstość maleje najszybciej dla promieniowania – a to oznacza, że wprowadzenie tego czynnika odgrywa coraz mniejszą

rolę, lecz w przeszłości było wprost przeciwnie – dla dostatecznie małego czynnika skali dominował. To oznacza, że ewolucja **wczesnego** Wszechświata była zdominowana przez promienowanie.

2. Standardowy Model Kosmologiczny

Wszechświat mniejszy był równocześnie gorętszy (iloczyn temperatury i czynnika jest stały) i to właśnie temperatura wyznacza zachowanie materii, przy czym im wyższa temperatura tym mniej potrafimy powiedzieć, co się wtedy działo. Na temat pierwszych 10^{-43}s (tą erę nazywa się erą Plancka) nie wiemy **nic** – przypuszcza się, iż wtedy obowiązywała tzw. kwantowa grawitacja, nad którą ciągle głowią się teoretycy i niewiele z tego wynika. Potem nastąpiło oddzielenie grawitacji od pozostałych oddziaływań i w związku z tym łamanie pierwotnej symetrii. Na czym by to miało polegać w przypadku grawitacji – nie wiadomo. Jedynie można przypuszczać, że był wtedy tylko jeden rodzaj cząstek: *fermio-bozony*.

Kiedy Wszechświat miał ok. 10^{-35}s , prawdopodobnie nastąpiło złamanie tzw. Wielkiej Unifikacji i oddziaływania silne oddzieliły się od elektroślabych, zaś istniejące wówczas *kwarko-leptony* i *bozony X* ustąpiły miejsca badanym dziś w eksperymentach wysokich energii *kwarkom*, *leptonom* i *bozonom W*. Wtedy też prawdopodobnie miała miejsce tzw. *bariogeneza* czyli ukształtowanie się przewagi materii nad antymaterią: zostało wyprodukowanych więcej barionów niż antybarionów.

Jak się sądzi, okres między 10^{-35}s a 10^{-10}s był stosunkowo mało ciekawy – temperatura spadała o wiele rzędów wielkości ale nie działo się nic ciekawego, jest często nazywany *pustynią energetyczną*. Pod jego koniec nastąpił podział oddziaływań elektroślabych na elektromagnetyczne i słabe, kolejne złamanie symetrii i w związku z tym przez jakiś czas

główną rolę odgrywały **bozony pośredniczące** (mówi się o **plazmie kwarkowo-gluonowej**) a ok. 10^{-5} s temperatura spadła na tyle, że mogły pojawić się **hadrony** czyli stany związane kwarków i antykwarków. Z początku było bardzo wiele różnych rodzajów cząstek elementarnych ale w miarę spadku temperatury ich ubywało a zostały tylko najbardziej trwałe czyli protony i neutrony (zwane również **nukleonami**).

Kiedy Wszechświat liczył sobie **3 minuty**, została naruszona równowaga między protonami i neutronami i w związku z tym część neutronów weszła w stany związane z protonami tworząc lekkie jądra a reszta (czyli większość) uległa rozpadowi na protony, elektrony i antyneutrino. Ten okres nazywamy **pierwotną nukleosyntezą** – właśnie wtedy powstała większość helu oraz znacząca część innych lekkich pierwiastków oraz izotopów

(np. deuteru), które można znaleźć w obecnym Wszechświecie, ten pierwotny skład chemiczny mają pierwsze obserwowane obiekty. Później materia była w stanie plazmy, na którą składały się lekkie jądra, elektrony i fotony.

Po ok. **100 tysiącach lat** nastąpił ostatni akt dramatu wczesnego Wszechświata: zrobiło się na tyle chłodno, że jądra mogły wychwycić elektrony, Wszechświat z całkowicie zjonizowanego bardzo szybko zrobił się niezjonizowany (jonizacja na poziomie 10^{-4}) a przez to przezroczysty dla promieniowania. Ten proces jest nazywany **rekombinacją**. Właśnie z tego okresu pochodzi **Mikrofalowe Promieniowanie Tła** – stanowi ono swego rodzaju „fotografię” Wszechświata z tamtego okresu. Później nastąpiła era materii, z początku rozłożonej niemal jednorodnie

ale w końcu formującej się w coraz większe i bardziej skomplikowane obiekty.

3. Problemy modelu standardowego

„Jeśli jest tak dobrze, to dlaczego jest tak źle?”. Zwykle wymienia się trzy główne problemy Standardowego Modelu Kosmologicznego:

⇒ problem płaskości lub naturalności

⇒ problem horyzontu

⇒ problem monopoli i innych defektów topologicznych.

Problem płaskości jest następujący: jeśli pominąć stałą kosmologiczną to Wszechświat otwarty powinien się rozszerzać w nieskończoność, zamknięty skolapsować a prawdopodobieństwo Wszechświata płaskiego (przypadek graniczny) jest nieskończenie małe, zaś wszelkie odstępstwa od płaskości gwałtownie rosną. Aby Wszechświat mógł mieć takie parametry jak obecnie

(czyli być płaski lub niezbyt odległy od płaskiego), jego parametry w epoce Plancka musiałyby być zadane z niesłychanie wielką dokładnością, mniej-więcej 1 ± 10^{-60} . Wszelkie inne wartości dałyby w efekcie błyskawiczny kolaps (zbyt szybki, żeby mogłyby się uformować jakiegokolwiek obiekty) lub szaloną ekspansję (i wtedy też nie moglibyśmy istnieć, z podobnych powodów). Innymi słowy, warunki początkowe musiałyby być bardzo szczególne a takich założeń fizycy starają się unikać.

Problem horyzontu bierze się stąd, że według Teorii Względności obszary mogą być związane przyczynowo tylko wtedy jeśli „mogły się kontaktować”, czyli jeśli mogły się wymieniać fotonami, cząstkami itd. – innymi słowy, jeden musiał być w obrębie [horyzontu zdarzeń](#) drugiego. Wielkość horyzontu na początku była mała, gdyż liczy się czas od Wielkiego Wybuchu,

na przykład rozmiary horyzontu w czasie epoki rekombinacji (z której pochodzi mikrofalowe promieniowanie tła) były na tyle małe, że obecnie na niebie powinno się zmieścić obok siebie ok. 40 takich obszarów. Każdy taki obszar powinien mieć własną temperaturę, niezależną od temperatury w innych obszarach, tymczasem widmo promieniowania tła jest niesłychanie jednorodne (odstępstwa na poziomie 10^{-5}).

Problem monopoli bierze się z łamania symetrii we wczesnym Wszechświecie. Żaden ośrodek nie jest idealnie jednorodny i w związku z tym każde przejście fazowe pozostawia tzw. defekty topologiczne – monopole, struny, ściany itp. Przykładem mogą być domeny ferromagnetyczne. Obliczenia pokazują, że tego typu pozostałości po złamaniu Wielkiej Unifikacji powinny zdominować Wszechświat, w szczególności gęstość masy

monopoli powinna być ok. miliard razy większa od obecnej gęstości krytycznej Wszechświata!

4. Model inflacyjny

Najbardziej popularnym modelem usuwającym wspomniane problemy jest model inflacyjny. Korzysta z pojęcia tzw. energii próżni – my w praktyce obserwujemy tylko **różnice** energii ale nie znamy energii **stanu podstawowego** czyli próżni. Jeśli spróbować określić właściwości próżni o niezerowej energii to okazuje się, że tej energii towarzyszy równocześnie bardzo silne, ujemne ciśnienie a ponieważ ciśnienie ma w Ogólnej Teorii Względności właściwości przyciągające silniejsze niż energia, więc w efekcie daje to odpychanie – efekt identyczny z efektem stałej kosmologicznej:

$$\rho_{\Phi} = \frac{1}{2}\dot{\Phi}^2 + V(\Phi)$$

$$p_{\Phi} = \frac{1}{2}\dot{\Phi}^2 - V(\Phi)$$

$$\dot{\Phi}^2 \ll V(\Phi) \Rightarrow p_{\Phi} \simeq -\rho_{\Phi}$$

Problem w tym, że obecnie efekty energii próżni czy też stałej kosmologicznej wprawdzie są zauważalne (choć nie jest to całkowicie pewne) ale aby to dawało żądany efekt, musiałyby być dramatyczne. W związku z tym zapostulowano istnienie we wczesnym Wszechświecie dość szczególnego pola, które w momencie złamania Wielkiej Unifikacji podlegałoby przejściu fazowemu i w niższych temperaturach energia jego

stanu podstawowego z jakiejś dużej wartości malałaby do zera. Dawałoby to efekt niesłychanie szybkiej ekspansji przed przejściem fazowym i normalnej po przejściu, co według obliczeń rozwiązywałoby wymienione problemy modelu standardowego (według modeli, w epoce inflacji rozmiary Wszechświata miałyby wzrosnąć o czynnik rzędu 10^{30} lub większy) a nie byłoby zbyt widoczne dziś. Jakiegokolwiek byłyby warunki na początku, po inflacji Wszechświat byłby płaski. Pierwsze tego typu pomysły były w latach 60., potem wróciły pod koniec lat 70. (Aleksiej Starobinski) i zyskały dużą popularność na początku lat 80. (Alan Guth, Andriej Linde i inni).

Złośliwi twierdzą, że inflacja rozwiązała pewne problemy ale wprowadziła jeszcze więcej – i częściowo jest to prawda. O ile dość łatwo wyobrazić sobie odpowiednie pole, to znacznie

trudniej wymodelować wyjście z epoki inflacyjnej. W związku z tym pojawiła się olbrzymia ilość różnych wersji modelu inflacyjnego:

stara, nowa, chaotyczna, ergodyczna, egzotyczna, wewnętrzna, naturalna, nadnaturalna, potęgowa, bezpotęgowa, jednopolowa, dwupolowa, samoodtwarzająca, samopromująca, hybrydowa, pierwszego rzędu, drugiego rzędu, supersymetryczna, superstrunowa, rozszerzona, hiperrozszerzona, ponadrozszerzona, dylatonowa...

Niektórzy uczeni krzywią się na dźwięk słowa „inflacja”, gdyż jest to model typu wańka-wstańka – na tyle elastyczny, że w praktyce bardzo trudno go sfalsyfikować (Griszczuk: *„Inflacja to jest piękne słowo, nie można jej ubić...”*). Na przy-

kład kiedy dane obserwacyjne wskazywały na to, że Wszechświat musi być otwarty, powstały wersje modelu nie wymagające Wszechświata płaskiego. Mimo to, modele inflacyjne mają bardzo wielu zwolenników. Co ciekawe, inflacja stwarza mechanizmy pozwalające na wygenerowanie pierwotnych zaburzeń gęstości (których istnienie było niezbędne dla późniejszego uformowania się struktur, a w związku z tym powstania życia na Ziemi i człowieka), na dodatek ich widmo przewidywane przez inflację jest zgodne z dotychczasowymi oszacowaniami wykonanymi na podstawie widma anizotropii mikrofalowego promieniowania tła.

5. Deficyt masy

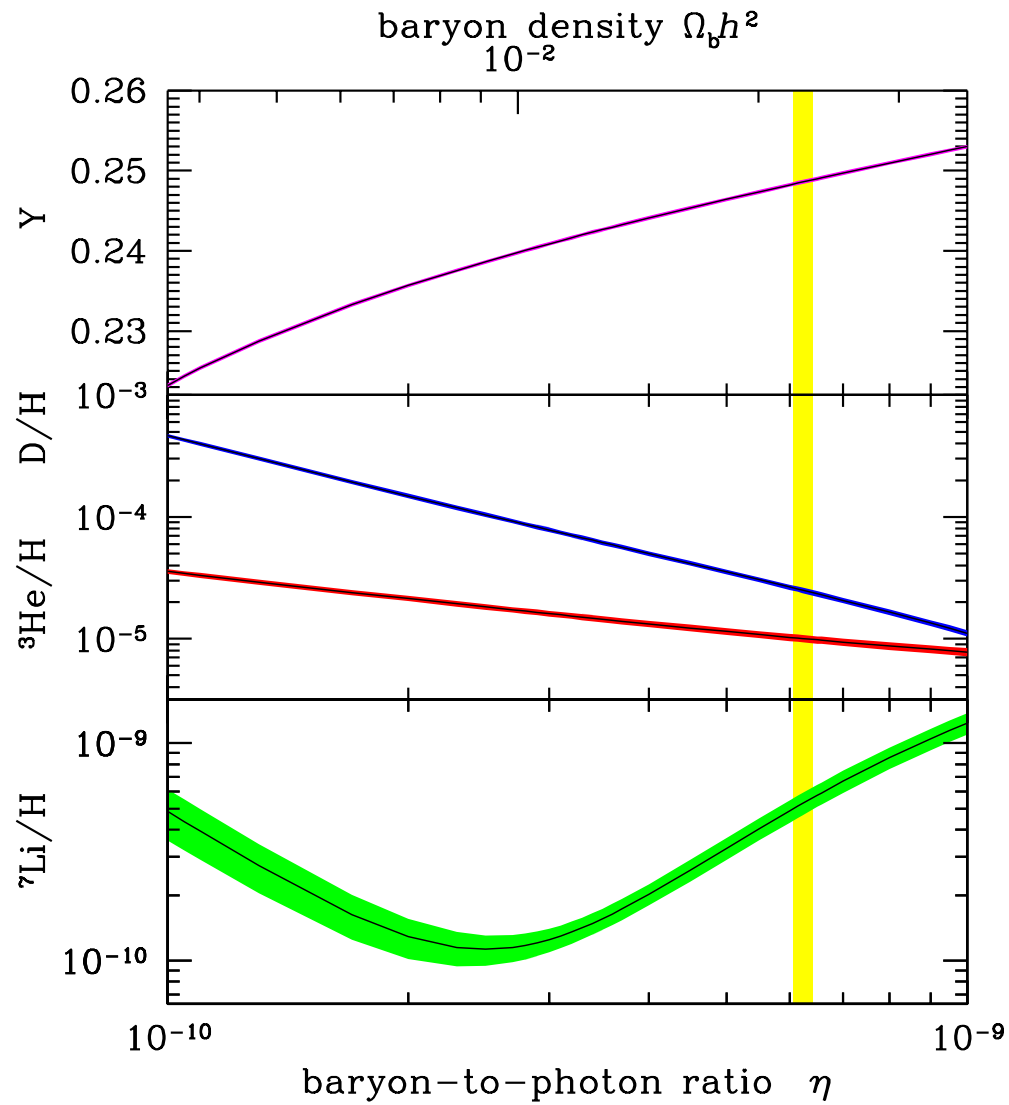
Początek problemu – późne lata 1930-e, gdy Shapley odkrył gromady galaktyk. Fakt, że gromadzą się w grupy, wydawał się trudny do zrozumienia. Rozkład wydawał się być bardzo anizotropowy i stwierdzono, że warunki początkowe ekspansji mogły być drastycznie zmienione przez oddziaływanie grawitacyjne.

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.

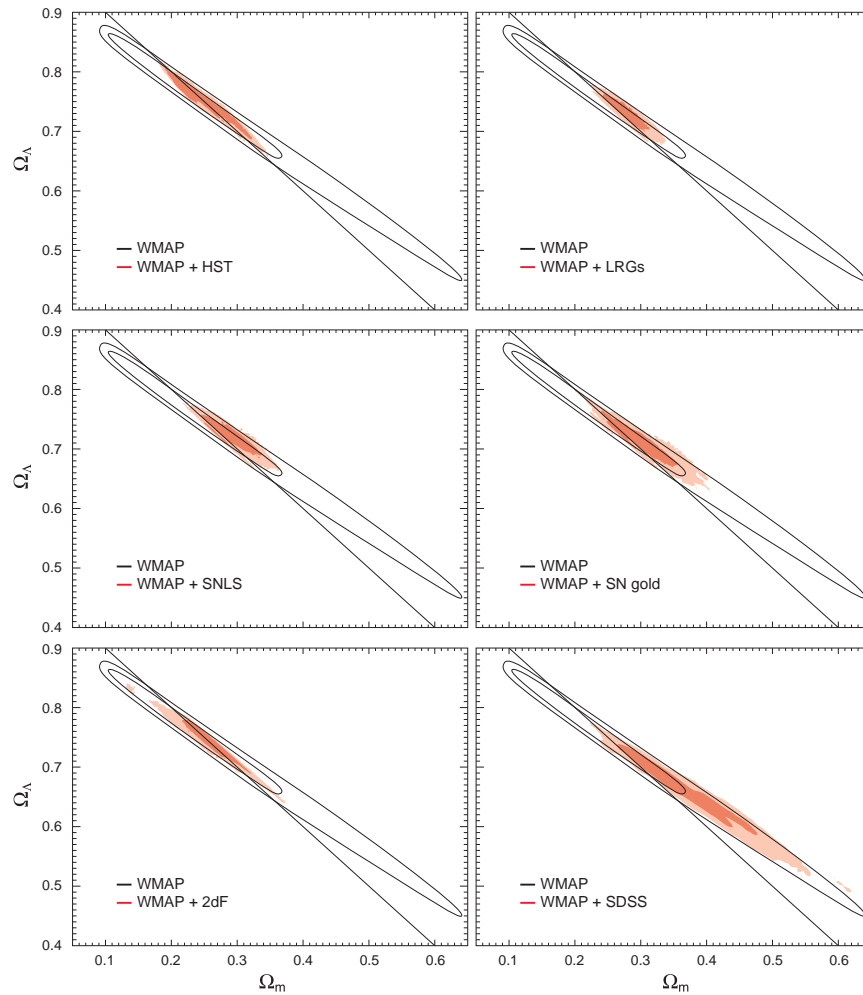
W miarę postępu wielkoskalowych pomiarów prędkości galaktyk w odległych gromadach problem ciemnej materii stawał się coraz bardziej poważny. Najbardziej znamienym przykładem są krzywe rotacji w galaktykach spiralnych – masa szacowana na ich podstawie jest kilkukrotnie większa niż masa materii świecącej.

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 10 lat temu zostało potwierdzone przez

satelitę WMAP ($0.022, \Omega_b \simeq 0.045$) a ostatnio przez satelitę Planck ($\Omega_b \simeq 0.049$).



Przewidywania teorii pierwotnej nukleosyntezy



Ograniczenia z WMAP, SN Ia i wielkoskalowej struktury Wszechświata

6. 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 wchodziłaby 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.

7. 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

$$g = g_{Newton}$$

$$g \gg a_0$$

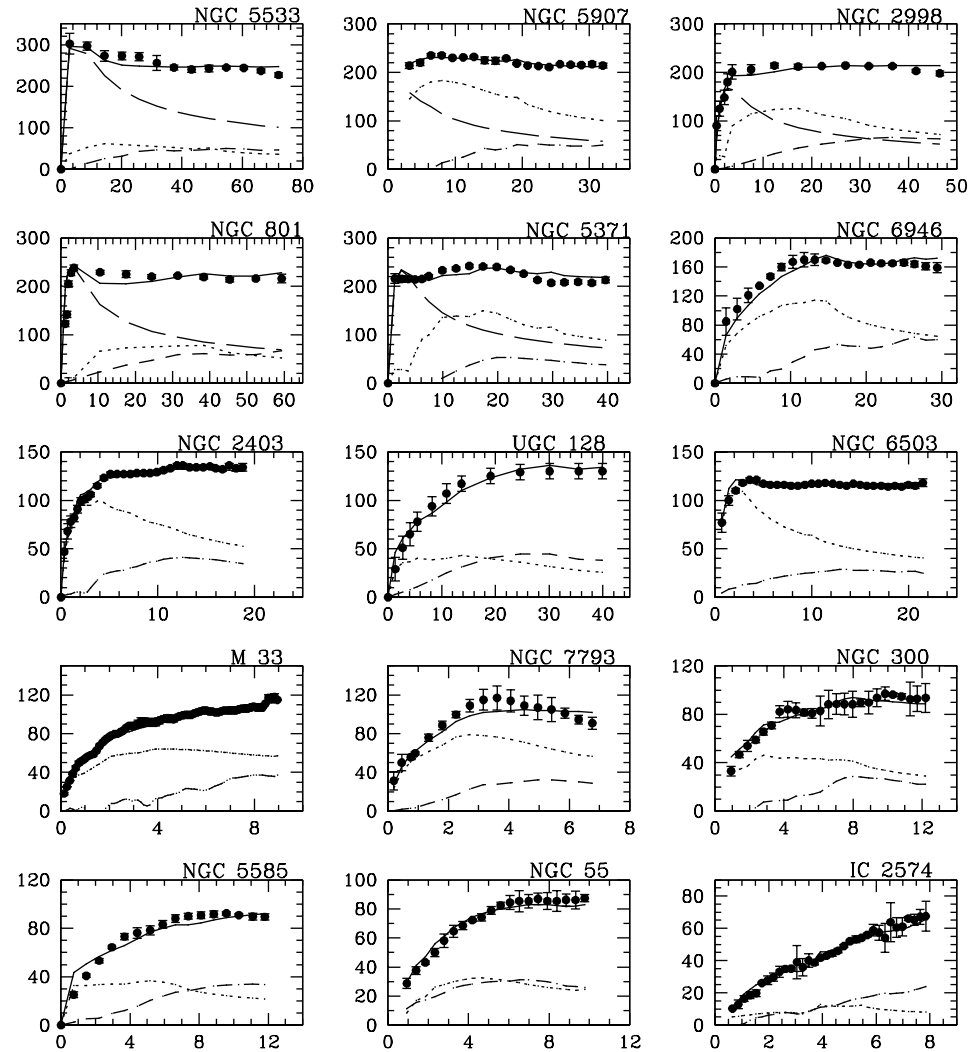
$$g = \sqrt{g_{Newton} a_0}$$

$$g \ll a_0$$

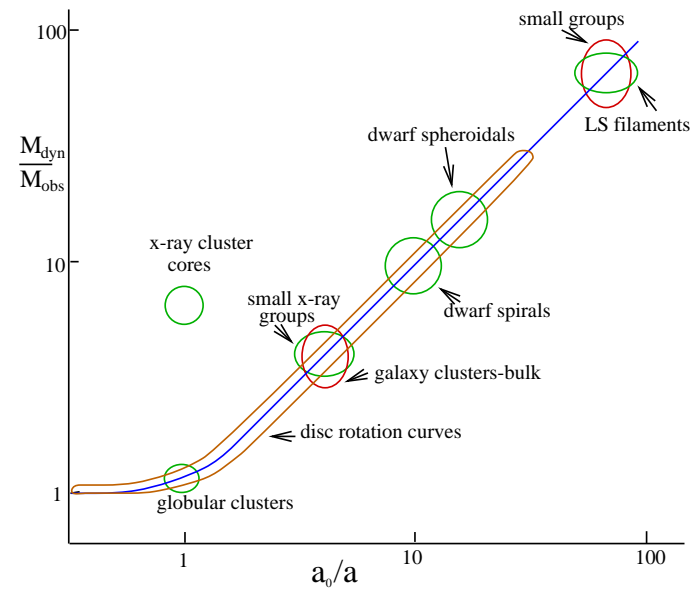
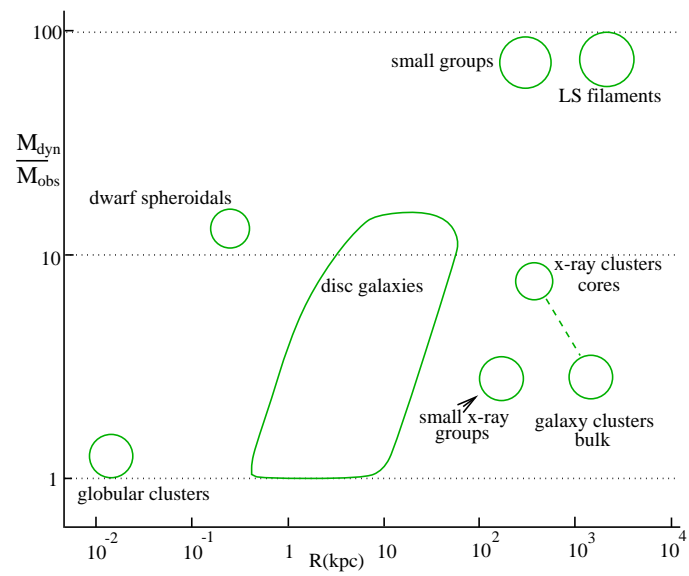
(modyfikacja grawitacji).

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. nieznanym wpływem 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

wystarczają). 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.

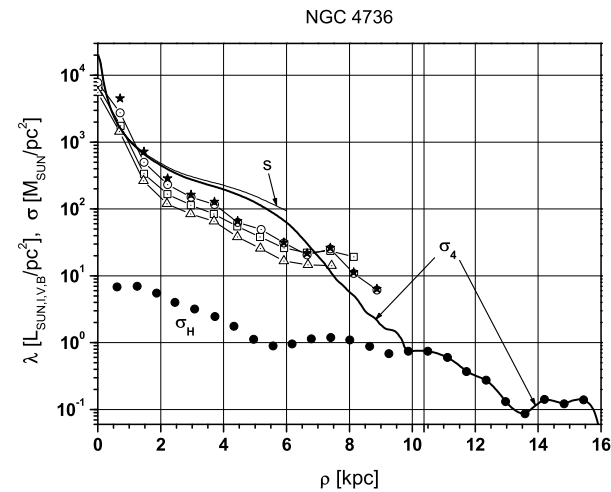
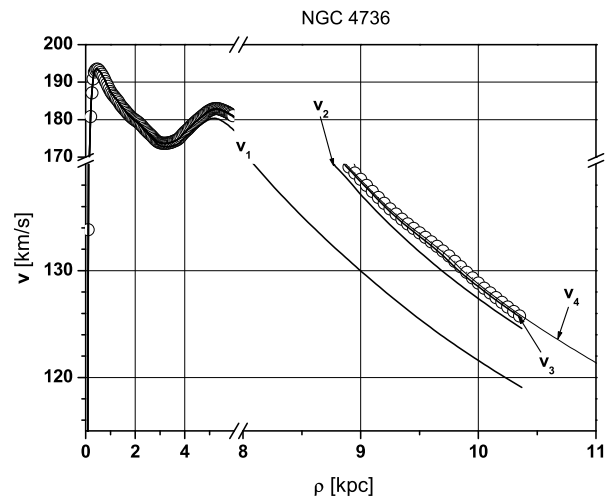
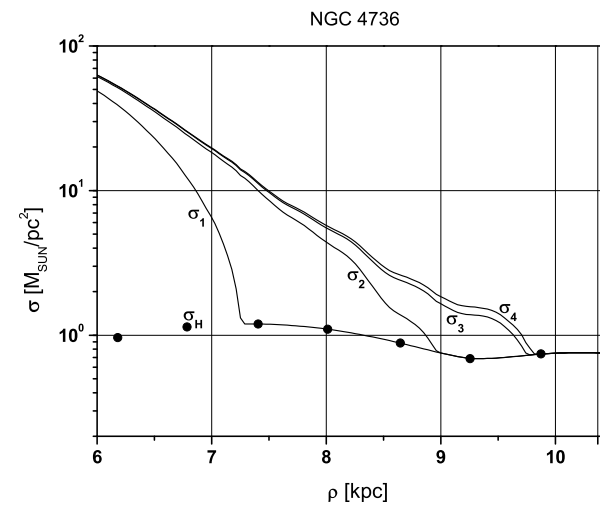
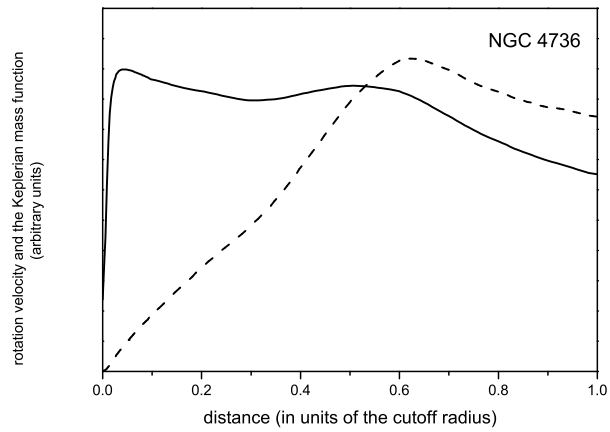
Od pewnego czasu uczeni zaczęli poważniej traktować MOND i wielokrotnie próbowali go weryfikować. Wyniki nie są jednoznaczne: wiele testów potwierdza MOND (co oznacza, że jest to przynajmniej bardzo dobry model fenomenologiczny) a niektóre są niezgodne z tym modelem, ale żaden z nich nie mógł go ostatecznie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

8. Czy galaktyki spiralne potrzebują ciemnej materii?

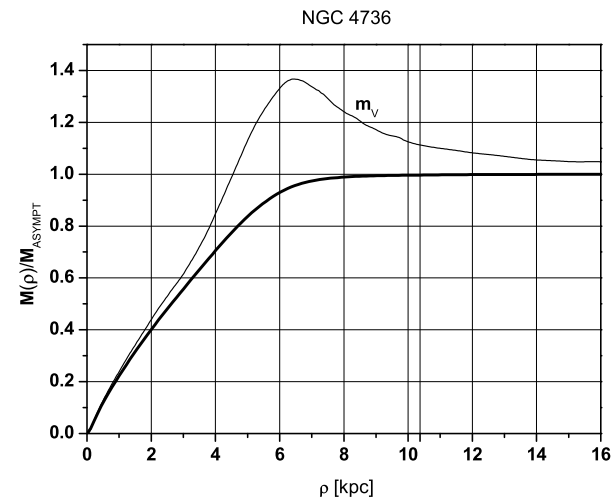
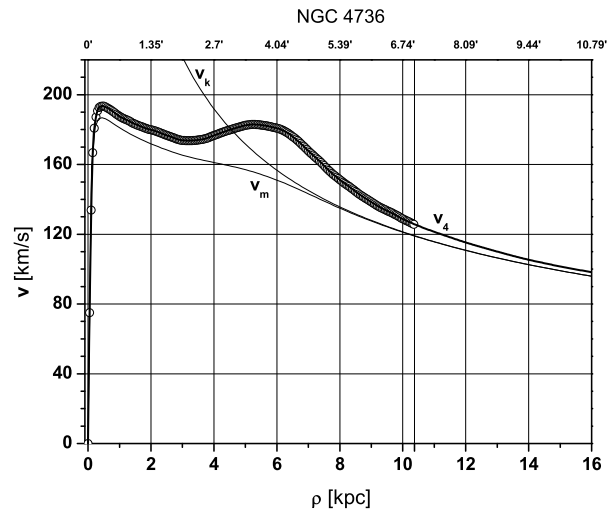
Ok. 2005 roku zajęła się para krakowskich astrofizyków, Joanna Jałocha (był to temat jej pracy doktorskiej) i Łukasz Bratek. Wspólnie z prof. Markiem Kutscherą (później dołączali do nich inni) napisali na ten temat serię artykułów. Twierdzą, że jeśli się zastosuje odpowiedni model to w wielu galaktykach spiralnych **nie ma potrzeby wprowadzania niebarionowej ciemnej materii ani dodatkowej grawitacji, gdyż materia zawarta w gwiazdach w zupełności wystarczy**. Podobne wyniki otrzymała parę innych grup.

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 znacząco popsułoby 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).

9. Supernowe w kosmologii

Uważa się, że obecnie najbardziej wiarygodną metodą pomiaru odległości w bardzo dużym ich zakresie (mówi się nawet o odległościach powyżej 1 Gpc) jest użycie supernowych SN Ia jako świec standardowych.

- ⇒ Zalety: używa się wyłącznie standardowej fizyki, brak zaczepienia o niższe *szczeble drabiny*.
- ⇒ Wada: niepewności związane z modelami, zwłaszcza dla supernowych przy pierwotnym składzie materii we Wszechświecie.

Jeszcze w połowie lat 1990. w kosmologii obowiązywał model płaski, w którym na materię barionową przypadało 5% a na ciemną materię 95% (parametr $\Omega=1$). W 1997 roku słyszałem pierwsze „przecieki” na temat publikacji, które ukazały się w następnych latach: Supernova Cosmology Project i High-z Supernova Team ogłosiły, że ekspansja Wszechświata przyspiesza, stała kosmologiczna jest większa od 0 a odpowiedni przyrządek do gęstości energii $\Omega_\Lambda \simeq 0.7$ (ale nadal $\Omega=1$). Modele CDM zostały zastąpione przez Λ CDM.

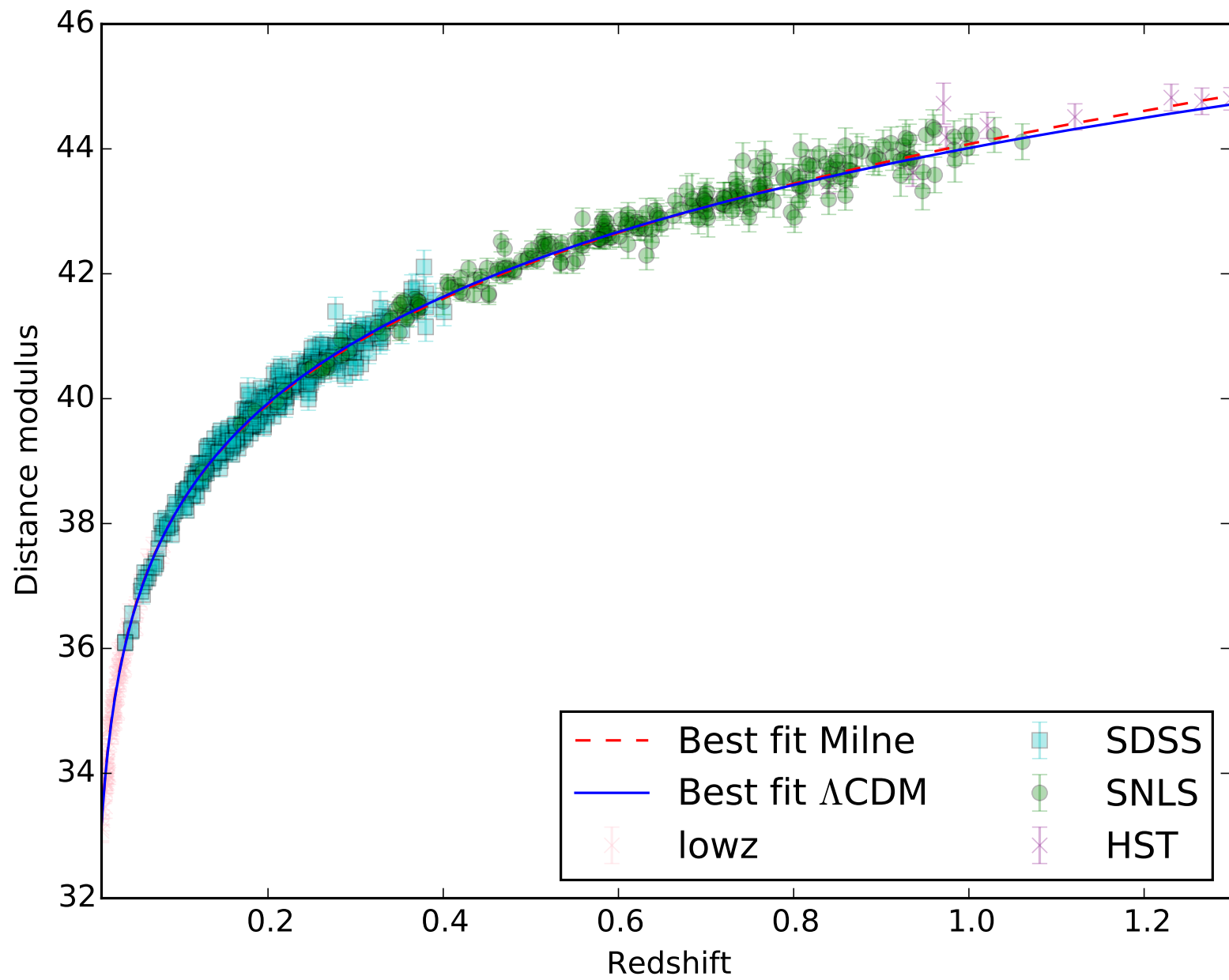
Później okazało się, że jednak jest pewna wątpliwość. Co prawda modele typu „best fit” przy założeniu $\Omega=1$ dają przyspieszoną ekspansję, ale **niewiele gorsze dopasowanie** można uzyskać dla **pustego Wszechświata**, w którym stała Hubble’a nie zmienia się w czasie.

10. Przekłuty balon?

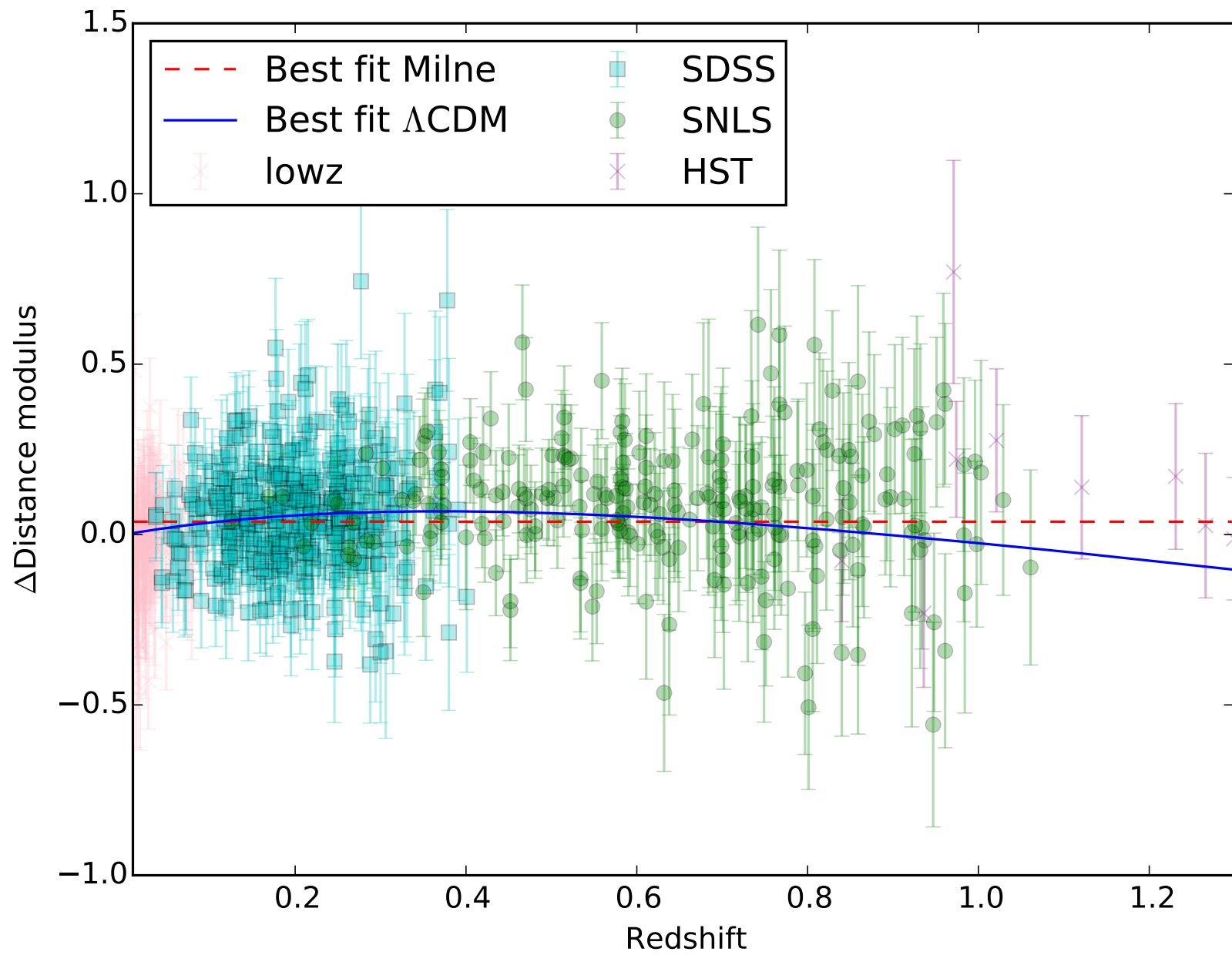
Malkontenci (w tym i piszący te słowa) narzekali, aż w końcu ktoś podszedł do sprawy systematycznie. W czasopiśmie *Scientific Reports* w 2016 roku ukazał się artykuł J.T. Nielsena, A. Guffantiego i S. Sarkara „Marginal evidence for cosmic acceleration from Type Ia supernovae”. Autorzy przeanalizowali dane (katalog Joint Lightcurve Analysis) i doszli do wniosku, że różnice między modelami nie są na tyle duże, żeby definitywnie przesądzać o przyspieszonej ekspansji. Oto wyniki:

TABLE I. Maximum likelihood parameters under specific constraints (in boldface).

Constraint	$-2 \log \mathcal{L} / \mathcal{L}_{\max}$	$(-2 \log \mathcal{L}_{\max} = -214.97)$									
		Ω_m	Ω_Λ	α	$x_{1,0}$	$\sigma_{x_{1,0}}$	β	c_0	σ_{c_0}	M_0	σ_{M_0}
None (best fit)	0	0.341	0.569	0.134	0.038	0.932	3.059	-0.016	0.071	-19.052	0.108
Flat geometry	0.147	0.376	0.624	0.135	0.039	0.932	3.060	-0.016	0.071	-19.055	0.108
Empty universe	11.9	0.000	0.000	0.133	0.034	0.932	3.051	-0.015	0.071	-19.014	0.109
Non-accelerating	11.0	0.068	0.034	0.132	0.033	0.931	3.045	-0.013	0.071	-19.006	0.109
Matter-less universe	10.4	0.000	0.094	0.134	0.036	0.932	3.059	-0.017	0.071	-19.032	0.109
Einstein-deSitter	221.97	1.000	0.000	0.123	0.014	0.927	3.039	0.009	0.072	-18.839	0.125



Zależność odległości od redshiftu



Porównanie modelu Milne'a z Λ CDM

Widać, że **wiele różnych modeli może prowadzić do bardzo podobnych przewidywań**. Najlepsze dopasowanie jest, oczywiście, przy braku ograniczeń na parametry kosmologiczne, odrobinę gorsze dla standardowego Λ CDM, ciągle nieźle dla trzech innych modeli (pusty Wszechświat, brak przyspieszenia i brak materii), zdecydowanie można wykluczyć tylko Wszechświat Einsteina-de Sittera ($\Omega_\Lambda=0$, $\Omega=1$).

Trzeba zaznaczyć, że np. model „pustego Wszechświata” **wcale nie musi oznaczać Wszechświata bez materii**. Podobne przewidywania mogą dawać inne modele, ale niejednorodne (to również dotyczy pozostałych modeli).

11. Imperium kontratakuje – i co dalej?

Pod koniec 2016 roku ukazał się preprint D. Rubina i B. Haydena „Is the Expansion of the Universe accelerating? All Signs point to Yes”, w którym autorzy podważają model zastosowany przez Trosta, Nielsena i Sarkara. Autorzy twierdzą, że brak przyspieszonej ekspansji jest wykluczony na bardzo wysokim poziomie ufności (4.2σ lub więcej, zależnie od założeń). Kto ma rację? Mógłby to ocenić tylko ktoś bardzo biegły w zaawansowanych metodach statystycznych.

Niezależnie od tego, kto ma rację, wiele również zależy od tego, jak wiarygodne jest użycie supernowych jako świec standardowych.

12. Podsumowanie

Standardowy Model Kosmologiczny wydaje się prosty i elegancki, ale przysłowiowy diabeł tkwi w szczegółach. Lawina danych powoduje, że ciągle trzeba wprowadzać poprawki. Na razie udaje się model „kłajstrować” ale jest o to coraz trudniej i uważam, że kiedyś się w końcu rozsypie.