

3.5 keV X 線輝線が示唆する Mixed dark Matter モデルにおける Substructure 問題

原田 了 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

Λ CDM モデルは銀河団程度以上の大規模構造の観測結果を説明するが、銀河程度以下の小規模構造の観測との間には矛盾が生じている。そのような矛盾として、天の川銀河周辺に存在する矮小銀河の最大回転速度に対する分布が食い違う Substructure 問題や、中心密度が食い違う Too Big To Fail 問題が知られている。

これを Warm Dark Matter (WDM) の自由流減衰により小規模構造を均すことで解決しようとする、Lyman- α の森の観測結果から加わる WDM モデルへの制限と矛盾する。ところが、WDM と CDM を混ぜた Mixed Dark Matter (MDM) モデルなら Lyman- α の森からの制限を緩和し、この矛盾を解消できる可能性がある。また、最近 Andromeda 銀河や Perseus 銀河団などから起源が不明な 3.5 keV の X 線輝線が検出された。これは Dark Matter 粒子の崩壊した信号である可能性がある。我々は、この信号を説明できる素粒子モデルは自然に MDM モデルとなることに注目した。

我々は、この 3.5 keV 輝線を説明できる MDM モデルにおける構造形成について調べた。 N 体シミュレーションを実行すると、MDM モデルでの天の川銀河サイズ ($\sim 10^{12} M_{\odot}$) のハロー中のサブハローの数は CDM モデルの場合より $\sim 30\%$ から $\sim 50\%$ 程度減少した。特に最大回転速度に対する分布を調べると、MDM モデルの方が CDM モデルよりも観測をよく説明し、Substructure 問題の解決に近づくことを発見した。

1 Introduction

Λ CDM モデルは銀河団程度以上の大規模構造及び宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) などの観測結果を説明することができる。その一方で、銀河程度以下の小規模構造の観測との間には矛盾が生じている。そのような矛盾の一つとして substructure 問題 (Kravtsov 2010) というものが知られている。これは天の川銀河周辺に存在する矮小銀河と、 Λ CDM モデルシミュレーション中に存在するサブハローの最大回転速度に対する分布 (Cumulative maximum circular Velocity Function, CVF) が食い違うという問題である。

こうした問題を解決する方策として、Warm Dark Matter (WDM) というものが考えられている。WDM 粒子は無視できない速度分散を持つため、自由流によって矮小銀河程度のスケールの構造を均す。この自由流減衰はサブハローの数を減少させるようにはたらくため、観測結果を説明できる可能性がある。自由流減衰が効くスケールは WDM 粒子が熱的に生成されたとすれば粒子質量に対応し、銀河程度以下

のスケールの構造の観測結果を説明できるという条件によって WDM 粒子質量には制限が加えられている。それとは独立に、WDM 粒子質量には遠方のクエーサーのスペクトル中に見られる Lyman- α 吸収線の観測結果からも制限が加えられている。これらの制限を比較すると、互いに矛盾することが指摘されたが (Schneider et al. 2014)、CDM と WDM を混合した Mixed Dark Matter (MDM) モデルを考えると Lyman- α 吸収線からの制限を緩和し (Boyersky et al. 2009)、この矛盾を解消できる可能性がある。

また、最近 Andromeda 銀河や Perseus 銀河団を始めとした多数の銀河団から起源が不明な 3.5 keV の X 線輝線が検出された (Bulbul et al. 2014; Boyarsky et al. 2014)。これは Dark Matter (DM) 粒子の崩壊などによる信号である可能性が指摘されている。我々は、特にこれが質量 $M \sim 7$ keV のステライルニュートリノの崩壊によって生じる信号である可能性を考えた。さらに、このステライルニュートリノが非共鳴生成 (NRP, Dodelson & Widrow (1994)) されたとすると、3.5 keV X 線輝線を説明するためには DM

全体は NRP ステライルニュートリノとその他の安定な粒子からできている必要がある。NRP ステライルニュートリノは宇宙初期に自由流減衰によって構造を均すため、WDM として振る舞う。それゆえ、安定な粒子が CDM として振る舞えば、3.5 keV X 線輝線を説明する DM モデルは MDM モデルとなる。本講演の目的は、この 3.5 keV X 線輝線を説明できる MDM モデルが substructure 問題を解決できるかどうか議論することである。

2 Structure Formation in the Mixed Dark Matter Model

2.1 Linear Structure Evolution

DM 全体のうち、 r_{warm} の割合が NRP ステライルニュートリノでできており、残りが CDM でできている場合を考える。この場合、Andromeda 銀河からの X 線輝線のフラックスは

$$F \simeq 6.5 \times 10^{-5} \frac{\text{cts}}{\text{s cm}^2} \left(\frac{\Sigma_{\text{DM}}}{500 M_{\odot}/\text{pc}^2} \right) \left(\frac{\Omega_{\text{fov}}}{500 \text{ arcmin}^2} \right) \times \left(\frac{\sin^2(2\theta)}{10^{-9}} \right)^2 \left(\frac{M}{7 \text{ keV}} \right)^6 \quad (1)$$

となる。ただし、 Σ_{DM} は全 DM の柱密度で Ω_{fov} は観測する視野角、 θ はアクティブ・ステライル間の混合角である。いま、Andromeda 銀河からのフラックスとして Boyarsky et al. (2014) の値 $4.9^{+1.6}_{-1.3} \times 10^{-6} \text{ cts/s/cm}^2$ を使い、かつ柱密度の値として $680^{+950}_{-500} M_{\odot}/\text{pc}^2$ (Boyarsky et al. 2010) を用いれば、 $\sin^2(2\theta)/10^{-9} \simeq 0.1-0.7$ という値を得る。さらに、 h を 100 km/s/Mpc で規格化した Hubble パラメータとして、NRP ステライルニュートリノの密度パラメータは $\Omega_s h^2 \sim 0.1(\sin^2(2\theta)/10^{-9})(M/7 \text{ keV})^2$ であり (Dodelson & Widrow 1994)、全 DM の密度パラメータは $\Omega_{\text{DM}} h^2 \sim 0.1$ なので、 $M \sim 7 \text{ keV}$ の場合には $r_{\text{warm}} = \Omega_s h^2 / \Omega_{\text{DM}} h^2 \sim \sin^2(2\theta)/10^{-9}$ となる。即ち、3.5 keV X 線輝線を説明できるのは $r_{\text{warm}} \sim 0.1-0.7$ であるが、本講演では特に $r_{\text{warm}} = 0.25$ の場合と $r_{\text{warm}} = 0.50$ の場合に着目する。

まずは CDM モデル、MDM モデル、WDM モデル (熱的生成粒子質量 2.4 keV) における構造の線形成長を調べた。これには公開コード CAMB (Lewis et

al. 2000) を利用したが、MDM モデルで計算するには質量のあるニュートリノの Fermi-Dirac 分布を NRP ステライルニュートリノの運動量分布に置き換える修正を加えた。また、宇宙論パラメータとしては Komatsu et al. (2011) の WMAP+BAO+ H_0 Mean を用いた。

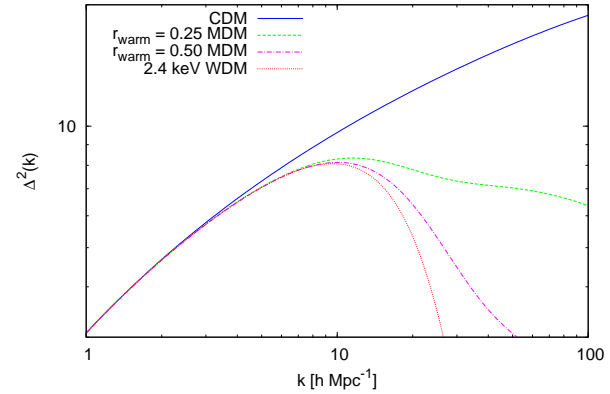


図 1: 4 つのモデルにおけるパワースペクトルを比較した。CDM 以外の 3 つのモデルは全て同じスケール以下でパワースペクトルが抑制されており、 r_{warm} が大きいほど強く抑制される。

その結果得られた線型パワースペクトルを図 1 に載せる。自由流減衰によって、 $r_{\text{warm}} = 0.25$ (緑破線) 及び $r_{\text{warm}} = 0.50$ (マゼンター点鎖線) の MDM モデルと WDM モデル (赤点線) におけるパワースペクトルは、CDM モデル (青実線) の場合よりも小スケールで小さくなっていることが見て取れる。いま、WDM モデルとして熱的生成粒子質量 m_{WDM} が 2.4 keV のものを比較に用いているが、それはパワースペクトルが抑制されるカットオフスケールが MDM モデルの場合と同じだからである。このカットオフスケールは当密度時 t_{eq} における共動 Jeans スケール

$$k_J = a \sqrt{\frac{4\pi G \rho_0}{\sigma^2}} \Big|_{t=t_{\text{eq}}} = 64 \text{ Mpc}^{-1} \left(\frac{m_{\text{WDM}}}{2.4 \text{ keV}} \right)^{4/3} \quad (2)$$

$$= 64 \text{ Mpc}^{-1} \left(\frac{M}{7 \text{ keV}} \right) \left(\frac{0.25}{r_{\text{warm}}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

で定義される。ただし G は万有引力定数、 ρ_0 は平均物質密度、 σ^2 は DM 粒子の速度分散である。 $r_{\text{warm}} = 0.50$ の場合の k_J は正確には 64 Mpc^{-1} ではないが、

本講演では 64 Mpc^{-1} に近似して扱う。

ここで定義したカットオフスケールに対応する質量 M_J は

$$M_J = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{2\pi}{k_J} \right)^3 \rho_0 \simeq 8.7 \times 10^7 \left(\frac{64 \text{ Mpc}^{-1}}{k_J} \right) M_\odot / h \quad (4)$$

と銀河程度以下の質量スケールになるので、今考えているモデルは substructure 問題を解決に近づける可能性がある。それを確かめるために、我々は次に N 体シミュレーションを行った。

2.2 Nonlinear Structure Formation

3.5 keV X 線輝線を説明できる MDM モデルにおける非線形構造形成を調べるために、 N 体シミュレーションを行った。シミュレーションは公開コード GADGET-2 (Springel 2005) を用いて行い、赤方偏移 $z = 19$ において図 1 のパワースペクトルを再現するように初期条件を生成した。シミュレーション領域は共動座標で一辺 $10 \text{ Mpc}/h$ の立方体であり、 512^3 個の粒子 (質量 $\simeq 5.7 \times 10^5 M_\odot / h$) を用いた。ソフトニング長は $\epsilon = 1 \text{ kpc}$ とした。ハローは Friends-Of-Friends 法 (Davis et al. 1985) を用いて同定した。

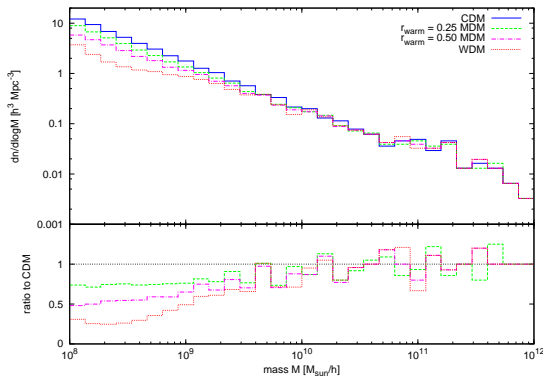


図 2: 上図: 4 つのモデルの間の質量関数の比較。下図: WDM 及び 2 つの MDM モデルでの質量関数の、CDM モデルでの質量関数に対する比。色は図 1 に対応。CDM 以外のモデルでは $\sim 10^{10} M_\odot / h$ 以下の質量のハローの個数が CDM モデルの場合に比べて小さくなっている。

その結果得られた質量関数を図 2 に載せる。これを見ると、 $\sim 10^{10} M_\odot / h$ 以下の質量において、MDM

モデル及び WDM モデルでの質量関数は CDM モデルの場合に比べて小さくなっていることがわかる。これは銀河程度以下の質量なので、substructure 問題も解決に近づくことが期待できる。そこで、次に天の川銀河程度の質量のハローに含まれるサブハローについて、CVF を作ることを考える。

CVF は横軸に最大回転速度 V_{\max} をとるが、これは

$$V_{\max} = \max_r \sqrt{\frac{GM(<r)}{r}} \quad (5)$$

で定義される。ただし、 r はサブハロー中心からの距離で $M(<r)$ はサブハローの中心から距離 r の範囲に含まれる質量である。これはシミュレーションからは容易に計算できる一方で、矮小銀河の観測データは V_{\max} を直接求められるほど分解能が高くない。そこで、観測データとしては視線速度分散 σ_{los} を用い、速度分布が等方的であることを仮定して

$$V_{\max} = \sqrt{3} \sigma_{\text{los}} \quad (6)$$

として V_{\max} を見積もる。

図 3 には CDM モデル及び二つの MDM モデルにおける CVF と観測された矮小銀河の CVF との比較を示す。ただし、矮小銀河は天の川銀河に束縛されているものと Andromeda 銀河に束縛されているものとの 2 つの集団を考えた。シミュレーションから CVF を作る際には、質量が $7.0 \times 10^{11} M_\odot$ 以上 $2.7 \times 10^{12} M_\odot$ 以下のハローを天の川銀河または Andromeda 銀河に対応する質量のハローとみなした。サブハローは SUBFIND アルゴリズム (Springel et al. 2001) によって同定した。観測では銀河中心から 279 kpc より遠くに矮小銀河が見つかっていないので、サブハローもハロー中心から 279 kpc 以内のもののみを考えた。

図 3 を見ると、 V_{\max} の小さい端では CDM モデルにおけるサブハローの数は少なくとも観測されたものより 1.5 倍以上多いが、MDM モデルでは観測を説明できるハローがシミュレーション中に存在する。 $r_{\text{warm}} = 0.25$ の MDM モデルにおいては青い線が、 $r_{\text{warm}} = 0.50$ の MDM モデルにおいてはシアン、青、黒の線がそれぞれ観測を説明できるハローに対応する。

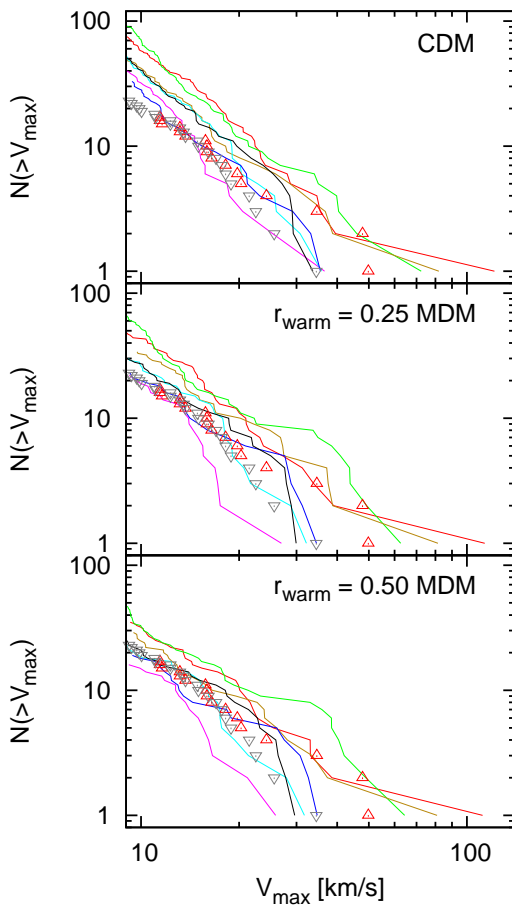


図 3: CDM および 2 つの MDM モデルにおける CVF。実線はシミュレーション中の各ハローの CVF を表す。赤い上向き三角と灰色の下向き三角はそれぞれ天の川銀河と Andromeda 銀河に束縛された矮小銀河についての CVF である。2 つの MDM モデルのシミュレーション中には、観測を説明できるハローが存在する。

3 Discussion and Conclusion

我々は、最近見つかった起源不明の 3.5 keV X 線輝線を説明できる DM モデルは自然と MDM モデルとなることに着目した。この MDM モデルは遠方クエーサーのスペクトル中の Lyman- α 吸収線も説明できる。さらに我々の N 体シミュレーションの結果を観測と比較することで、このモデルのもとでは substructure 問題が解決に近づくことを発見した。

観測とシミュレーションの間的小スケールでの矛盾としては他に Too Big To Fail 問題 (Boylan-Kolchin

et al. 2011) がある。これは、最も明るい矮小銀河の中心密度が、シミュレーション中で質量が最大のサブハローの中心密度より小さくなっているという問題である。本講演で扱った MDM モデルにおいてこの Too Big To Fail 問題が解決されるかどうかというのは非常に興味深い問題であり、今後調査していく必要があるだろう。

Acknowledgement

本研究は鎌田歩樹氏 (UC Riverside) との共同研究である。指導教員の吉田直紀氏 (東京大学)、及び共同研究者の鎌田歩樹氏には多くの有益なアドバイスと議論を頂いたため、ここに謝意を述べる。

Reference

- Boyardsky, A., Lesgourgues, J., Ruchayskiy, O., & Viel, M. 2009, *Physical Review Letters*, 102, 201304
- Boyardsky, A., Ruchayskiy, O., Iakubovskiy, D., et al. 2010, *MNRAS*, 407, 1188
- Boyardsky, A., Ruchayskiy, O., Iakubovskiy, D., & Franse, J. 2014, arXiv:1402.4119
- Boylan-Kolchin, M., Bullock, J. S., & Kaplinghat, M. 2011, *MNRAS*, 415, L40
- Bulbul, E., Markevitch, M., Foster, A., et al. 2014, *ApJ*, 789, 13
- Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1985, *ApJ*, 292, 371
- Dodelson, S., & Widrow, L. M. 1994, *Physical Review Letters*, 72, 17
- Komatsu, E., Smith, K. M., Dunkley, J., et al. 2011, *ApJS*, 192, 18
- Kravtsov, A. 2010, *Advances in Astronomy*, 2010,
- Lewis, A., Challinor, A., & Lasenby, A. 2000, *ApJ*, 538, 473
- Schneider, A., Anderhalden, D., Macciò, A. V., & Diemand, J. 2014, *MNRAS*, 441, L6
- Springel, V. 2005, *MNRAS*, 364, 1105
- Springel, V., White, S. D. M., Tormen, G., & Kauffmann, G. 2001, *MNRAS*, 328, 726