

## 銀河団の多波長観測を用いた修正重力モデルの検証

照喜名 歩 (広島大学大学院 理学研究科)

### Abstract

宇宙の加速膨張を再現する修正重力モデルでは、一般に重力以外に第 5 の力が物質に作用する。この第 5 の力が銀河団で現れると、銀河団ガスに作用し、その分布観測に影響を与える可能性がある。静水圧平衡を仮定すると銀河団ガスの分布観測を組み合わせることで銀河団質量の質量プロファイルを予測することができる。我々は第 5 の力が存在するとニュートン重力に比べてこの質量プロファイルの見積もりが小さくなることを示した。また、実際にかみのけ座銀河団の X 線温度、表面輝度観測から質量プロファイルを見積もり、これを重力レンズ観測による質量予測と比較することで、重力レンズ観測の誤差の範囲で修正重力モデルのモデルパラメータに制限を与える事が可能であることを示した。

### 1 Introduction

宇宙の加速膨張の起源究明は宇宙論の大きな目標の一つである。この問題を解決する可能性としてアインシュタインの宇宙項やこれを拡張したダークエネルギーの導入が有力視されているが未だ確証には至っていない。一方、このような未知のエネルギー成分を導入せず、宇宙論的な長距離スケールで一般相対性理論を修正する修正重力理論に興味を集めている。これは一般相対性理論の修正による重力的な効果が宇宙の加速膨張を引き起こすと考えるアプローチである。しかし、重力理論を修正すると新たな自由度が現れ、これが物質に第 5 の力として働くことがある。太陽系近傍では一般相対性理論が非常に良い精度で検証されているため、このような領域では新たな自由度は隠されなければならない。カメレオン重力モデルは物質の密度に依存したスカラー場を隠す機構（カメレオン機構）を有しており、局所重力における一般相対論を再現する。

一方、我々は銀河団ガスに第 5 の力が働く可能性に注目した。銀河団の外側では物質の密度が低くなり、カメレオン機構が働かず第 5 の力が現れる可能性がある。我々の先行研究では、銀河団ガスに第 5 の力が働く場合、ニュートン重力に比べてガス分布がコンパクトになることを示し、実際のガス分布観測と比較することで重力モデルのパラメータに対して制限を与えた (Terukina and Yamamoto, 2012)。しかしこの議論では静水圧平衡とガスの状態方程式と

いう 2 つの重要な仮定をおいている。より現実的で精密な制限を得るためにはこの 2 つの仮定を検証していく必要がある。その一歩として、今回は銀河団の多波長観測を組み合わせた状態方程式に依存しない制限を得ることを試みる。

2 章では銀河団ガス分布の 2 次元観測から 3 次元分布を再構築し、それから銀河団の質量プロファイルを見積もる手法を紹介する。また、銀河団の重力レンズ効果の観測から得られた質量プロファイルと比較することで、静水圧平衡を評価できることを見る。3 章では第 5 の力が存在した場合にガス分布観測から得られる質量予測が影響を受けることを見る。さらに、重力レンズ質量と比較することで重力モデルのモデルパラメータに制限を与える。4 章でまとめと結果を述べる。

### 2 Hydrostatic Mass

銀河団ガスの圧力勾配とガスに働く重力との間の静水圧平衡を仮定すると

$$\frac{1}{\rho_{\text{gas}}} \frac{dP_{\text{gas}}}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2} \quad (1)$$

が成り立つ。 $G$  は重力定数、 $M(r)$  は銀河団の質量プロファイル、 $\rho_{\text{gas}}, P_{\text{gas}}$  はそれぞれ銀河団の密度、圧力である。このとき、銀河団ガスの 3 次元温度 ( $T_{\text{gas}}$ )、密度、圧力プロファイルのいずれか 2 つが分かれば、

次のように銀河団の質量プロファイルを見積もることができる。

$$M(r) = -\frac{r^2}{G\rho_{\text{gas}}} \frac{dP_{\text{gas}}}{dr} \quad (2)$$

$$= -\frac{kT_{\text{gas}}r}{\mu m_p G} \left( \frac{d \ln \rho_{\text{gas}}}{d \ln r} + \frac{d \ln T_{\text{gas}}}{d \ln r} \right), \quad (3)$$

ここで、 $m_p$  は陽子質量、 $\mu$  は平均分子量である。一方、これとは独立に重力レンズ効果の観測から得られた質量プロファイルの見積もることができる。ダークマターが支配的でその分布が NFW プロファイル

$$\rho = \frac{\rho_s}{r/r_s(1+r/r_s)^2} \quad (4)$$

で与えられる場合、その質量プロファイルは、

$$M_{\text{WL}} = 4\pi\rho_s r_s^3 \left[ \ln(1+r/r_s) - \frac{r/r_s}{1+r/r_s} \right], \quad (5)$$

となる。よって、両者を比較することで静水圧平衡を評価することができる。

しかし、X 線や、SZ 効果の観測で得られるのは視線方向に垂直な 2 次元面に射影したガス分布である。以降で扱う X 線温度、表面輝度はガスの 3 次元プロファイルを用いて

$$T_X(r_{\perp}) = \frac{\int n_e^2 T_{\text{gas}}^{1/2} \cdot T_{\text{gas}} dl}{\int n_e^2 T_{\text{gas}}^{1/2} dl}, \quad (6)$$

$$S_X(r_{\perp}) = \int n_e^2 \lambda_c(T_{\text{gas}}) dl \quad (7)$$

とが観測量となる。ここで、 $n_e = (2 + \mu)\rho_{\text{gas}}/5\mu m_p$  は電子の数密度、 $\lambda_c(T_{\text{gas}})$  は冷却関数であり、積分は視線方向に沿ったものである。

2次元プロファイルから3次元プロファイルを取り出すため、ガスの温度と電子の数密度に対して、次のようなフィッティング関数を用いることにする。

$$T_{\text{gas}}(r) = T_0 \left[ 1 + A_1 \left( \frac{r}{r_0} \right) \right]^{\beta_0}, \quad (8)$$

$$n_e(r) = n_0 \left( 1 + \frac{r^2}{r_1^2} \right)^{\beta_1}. \quad (9)$$

(8), (9) を用いて (6), (7) 式を実際の観測と比較することでフィッティング関数のパラメータを決定し、銀河団ガスの3次元温度、密度プロファイルを構築することができる。

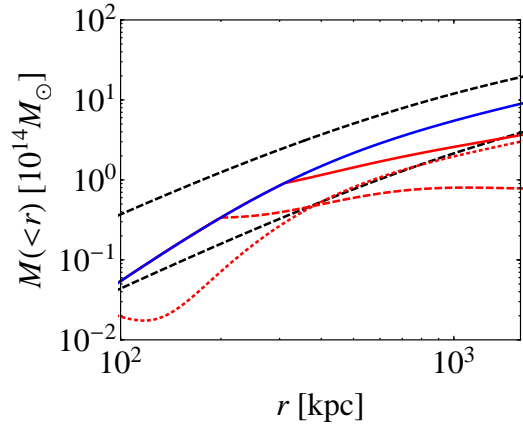


図 1: かみのけ座銀河団の質量分布。青実線は X 線観測から予測される質量分布。赤線はカメレオンフォースが働いた場合の質量予測。黒破線で挟まれた領域は重力レンズ観測から得られた質量分布。

得られた 3 次元プロファイルを組み合わせ、質量プロファイル (2) を見積もることが可能である。

我々は実際に、かみのけ座銀河団は X 線による温度・表面輝度の観測と重力レンズ効果の観測を用いてかみのけ座銀河団の質量プロファイルを比較した。

X 線観測 (温度、表面輝度) フィッティングから得られた銀河団ガスの動径分布から (2) 式を用いて質量プロファイルを求めたのが図 1 中の青線である。黒い破線で挟まれた領域は重力レンズから見積もられた質量の 1 シグマの領域。他の物理的影響 (後述する第 5 の力や非熱的效果など) が無ければ、銀河団の外側 ( $> 10^2$  kpc) で両者の見積もりは重力レンズ観測の誤差の範囲で一致している。

### 3 The Effect of the Chameleon Force and Constraint on the Chameleon model

準静的で球対称な系を仮定すると、カメレオン重力模型におけるスカラー場  $\phi$  の方程式と、単位質量

あたりに働く第 5 の力 (カメレオンフォース)  $F_\phi$  は

$$\nabla^2 \phi(r) = V_{,\phi}(\phi) + \frac{\beta \rho(r)}{M_{\text{Pl}}} \quad (10)$$

$$F_\phi(r) = -\frac{\beta}{M_{\text{Pl}}} \frac{d\phi(r)}{dr} \quad (11)$$

で与えられる。ここで、 $\beta$  は結合定数、 $\rho$  は銀河団の質量密度、 $M_{\text{Pl}} = (8\pi G)^{-1/2}$  は換算プランク質量であり、ポテンシャルとして  $V = \Lambda^{4+n}/\phi^n$  を選ぶことにする。銀河団が NFW プロファイル (4) で密度分布が与えられるダークマターで支配されていることと、 $\beta\phi \ll M_{\text{Pl}}$  を仮定すると、(10) 式は解析的に解け、その解は

$$\phi \simeq \begin{cases} 0 & (r < r_c) \\ -\frac{\beta \rho_s r_s^2}{M_{\text{Pl}}} \frac{\ln(1+r/r_s)}{r/r_s} - \frac{C}{r/r_s} + \phi_\infty & (r > r_c) \end{cases} \quad (12)$$

で与えられる。 $r_c$  より内側の解はカメレオン機構が働いている解、 $r_c$  より外側の解はカメレオン機構が働かず、カメレオンフォースが現れる解である。ここで、 $\phi_\infty$  はバックグラウンドにおけるスカラー場の値で、積分定数  $C$  と接続点  $r_c$  は次のような関係がある。

$$C \simeq -\frac{\beta \rho_s r_s^2}{M_{\text{Pl}}} \ln(1+r_c/r_s) + \phi_\infty r_c/r_s \quad (13)$$

$$\phi_\infty - \frac{\beta \rho_s r_s^2}{M_{\text{Pl}}} (1+r_c/r_s)^{-1} \simeq 0. \quad (14)$$

このとき、スカラー場の解はポテンシャルのパラメータ  $\Lambda, n$  に依らない (Terukina and Yamamoto, 2012)。したがって、重力モデルのパラメータとしては  $\beta, \phi_\infty$  のみとなる。

カメレオンフォースが存在すると、静水圧平衡の式 (1) の右辺にはカメレオンフォース (11) が加わることになる。これにより、ガス分布から見積もられる質量 (2) は次のように変更されることになる。

$$M(r) = M_{\text{thermal}} + M_\phi, \quad (15)$$

$$M_\phi(r) \equiv -\frac{r^2}{G} \frac{\beta}{M_{\text{Pl}}} \frac{d\phi}{dr}. \quad (16)$$

$M_{\text{thermal}}$  はニュートン重力の場合の質量プロファイルで (2) 式そのものであり、 $M_\phi$  はカメレオンフォースが現れることによる補正項である。

図 1 の赤線は上式で表されるスカラー場による質量成分の影響を加えた場合の質量プロファイルの見積りである。赤実線、赤破線、赤点線はカメレオンモデルのパラメータがそれぞれ  $(\beta, \phi_\infty [10^{-4} M_{\text{Pl}}]) = (1, 1.5), (1.2, 2), (1, 1.9)$  となる場合の質量プロファイルである。カメレオンフォースが存在すると、カメレオンフォースが存在しない場合 (青線) に比べて、銀河団の外側で質量を低く見積もってしまう傾向があることが分かる。

静水圧平衡が成り立っていると仮定すると、 $M_{\text{thermal}} + M_\phi$  は重力レンズ質量  $M_{\text{WL}}$  と一致していなければならない。カメレオンフォースが強く現れると、重力レンズ質量からずれが生じ、これが静水圧平衡のズレとなる。ここでは、重力レンズ観測の 1 シグマの誤差を  $\Delta M_{\text{WL}}^\pm$  (+ を誤差の上限、- を誤差の加減) として、半径  $r = 1 \text{ Mpc}$  において、 $M_{\text{WL}} - \Delta M_{\text{WL}}^- < M_{\text{thermal}} + M_\phi < M_{\text{WL}} + \Delta M_{\text{WL}}^+$  となる条件のもと、カメレオンモデルのパラメータ  $(\beta, \phi_\infty)$  に対して制限を得ることができた。この結果を図 2 に示した。結合定数が小さいと、ニュートン重力とほとんど変わらないため、制限を得ることができない。また、 $\phi_\infty$  が小さい場合はカメレオン機構が広い範囲で成り立つため、ニュートン重力が回復する。したがってこの場合も制限を得ることができない。

この結果は先行研究 (Terukina and Yamamoto, 2012) と矛盾ないが、ガスの状態方程式を仮定していないためより本質的な制限である。

## 4 Summary and Conclusion

我々はかみのけ座銀河団のガス分布観測から得られる質量プロファイルの見積りもりと重力レンズ観測から得られる質量プロファイルを比較することで、カメレオン重力モデルに対して制限を与えるアプローチを試みた。ここで、質量プロファイルの見積りにも必要な 3 次元ガス温度、電子数密度を X 線温度、表面輝度観測の 2 次元観測からモデルを用いずに再構築した。また、銀河団の密度プロファイルとしては NFW プロファイルで与えられるダークマター密度分布を仮定した。

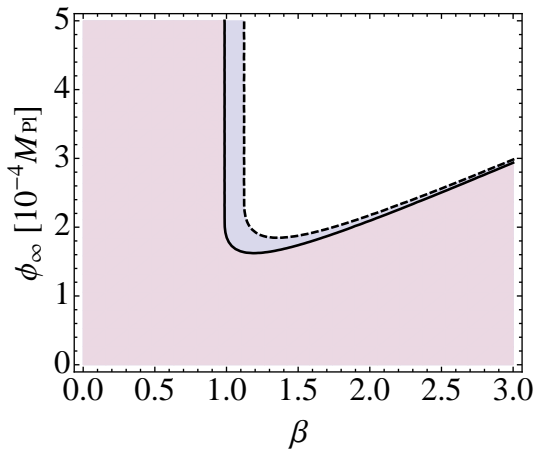


図 2: モデルパラメータの制限。各線の左下の色のついた領域が観測と比較して許される領域。

カメレオンフォースが働くとガス分布観測から見積もられる質量は銀河団の外側で小さくなることが分かった。静水圧平衡のもとでは、ガス分布観測から見積もられる質量と重力レンズ質量は一致するという立場から、重力レンズ観測の誤差の範囲内でカメレオン重力モデルのパラメータに対して有用な制限を得ることができた。この結果はガスの状態方程式に依らないため、我々の先行研究で得られた制限より本質的な制限となっている。

また、ここでは詳しく説明しなかったが静水圧平衡が破れる一つの可能性として、非熱的粒子による寄与が考えられる。我々は乱流による非熱的粒子からの圧力を考慮した場合においてもカメレオンモデルに対して制限を与えた。この場合の制限は図 2 の破線部から左下の色付きの領域となる。これは非熱的な成分が重力モデルの制限に影響を与える可能性を示唆している。したがって、今後はこの非熱的粒子がかみのけ座銀河団に（または個々の銀河団）にどの程度分布しているか、観測に対してどう影響するかということを定量的に示し、その上で重力モデルの制限を議論する必要があると考えている。

## Acknowledgement

この研究は広島大学の山本一博氏、ポーツマス大学の小山和哉氏、D. Bacon 氏、L. Lombriser 氏、R.

Nichol 氏との共同研究に基づいている。

## Reference

- A. Terukina and K. Yamamoto. 2012. PRD. **86**, 103503.  
 F. Churazov et al. 2012. MNRAS. **421**, 1123.  
 S. L. Snowden et al. 2008. A&A. **478**, 615.  
 D. R. Wik et al. 2009. ApJ. **696**, 1700.  
 N. Okabe, Y. Okura and T. Futamase. 2010. ApJ. **713**, 291.  
 N. Battaglia et al. 2012. ApJ. **758**, 74.