ダークマターハローの速度分散の非等方性に関する考察

淺羽 信介 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

超新星の観測より現在の宇宙は加速膨張していることがわかっている。この加速膨張を説明する理論としてダークエネルギーモデルと修正重力理論がある。両者の理論では、物質の密度揺らぎや速度の発展が違うことが知られている。よって、観測から銀河の空間分布の情報を得ることで両者の理論を区別することができる。特に、分光観測から得られる赤方偏移空間の銀河分布が銀河の固有速度によって歪む効果 (赤方偏移変形) の情報が修正重力理論の制限において有用であることが知られている。その一方で、銀河の固有速度を直接観測することで密度揺らぎの線形成長率のスケール依存性を測定することができるようになってきた。線形成長率がスケールによって変化することは修正重力理論の一つの特徴であり、固有速度の直接観測は修正重力理論の制限において重要である。しかし、固有速度の測定において非線形効果の理解は完全ではなく、大きな不定性となっている。宇宙論的 N 体シミュレーションから銀河の固有速度の方向の並び方と大規模構造には相関があることが確かめられており、これは固有速度の非線形性の理解の手助けになると考えられる。今回は、ダークマターハローの速度分散の非等方性に着目する。ダークマターハローの速度分散も修正重力理論の影響を受けるため、修正重力理論の制限に使える。また、速度分散の非等方性と大規模構造の相関を調べることで銀河の固有速度の非線形効果を理解することができ、更なる重力のテストをすることができる可能性がある。

1 Introduction

超新星の観測から、現在の宇宙は加速膨張をしていることがわかっている。我々が知っている通常の物質の運動は宇宙論スケールでは重力によって決定されるため、通常の物質だけでは加速膨張を説明することができない。そのため、負の圧力を持つ未知のエネルギー (ダークエネルギー) を導入するモデルが現在の標準的な宇宙モデル (ΛCDM モデル) となっている。しかし、ダークエネルギーの候補である真空のエネルギーが予言する値は超新星の観測から予測される値とは 100 桁以上違うという問題がある。ΛCDM モデルは一般相対性理論を基に構築されているが、宇宙論スケールで一般相対性理論が正しいかはわかっていない。そこで重力理論を宇宙論スケールで拡張することで、未知のエネルギーを導入することなく超新星の観測を説明する修正重力理論が考えられた。宇宙の加速膨張を説明する理論としてダークエネルギーモデルと修正重力理論のどちらが正しいかを決めることは、宇宙論の重要な課題である。

修正重力理論では、ΛCDM モデルと同様に宇宙の加速膨張を説明することができる。また、物質の密度揺らぎや速度などの摂動量の発展が ΛCDM モデルと修正重力理論では違うことがわかっている。例えば、修正重力理論の一つであるアインシュタイン・ヒルベルト作用を拡張した f(R) Gravity 理論では、小スケールで $G_{\rm eff}/G = 4/3$ となる。そのため、密度揺らぎの成長が f(R) Gravity 理論ではスケール依存性を持つことが知られている。しかし、この効果を物質の密揺らぎから測定するには振幅の不定性が大きいため難しい。その一方で、線形理論において固有速度と密度揺らぎの間には $v = -aHf\delta$ という関係がある。ここで、f は線形成長率と呼ばれ、重力理論によって時間発展が違う量である。そのため、銀河の固有速度によって赤方偏移空間の銀河の空間分布が歪む効果である赤方偏移変形から、固有速度を測定することが重力理論のテストする上でとても有用である (Asaba et al., 2013)。また、銀河の固有速度の直接観測もできるようになり、線形成長率のスケール依存性を調べることができるようになってきた (Johnson et al., 2014)。しかし、今までの観測

で得られた線形領域付近の観測量では、まだ、どちらの理論が正しいのかという決着はついていない。(Dossett et al., 2014)。そのため、より高精度な議論をするために非線形領域の更なる研究が必要である。特に、修正重力理論が予言するダークマターハロー(DMH) のような高密度の領域で、重力の増幅が抑制される効果であるスクリーニング機構が観測量に与える影響の理解は不十分である。本研究では、DMH の速度分散の非等方性について注目する。DMH は力学的に安定しているため、ビリアル定理からその質量と速度分散にはとても強い関係があることが理論的に予想される。しかし、ビリアル定理の関係は球対称を仮定しているが、実際には球対称が完全に成り立っている訳ではない。球対称からのずれはそのハローが存在する環境に依存してい、速度分散の非等方性から環境の情報を得ることができると考えられる。環境の情報はスクリーニング機構を議論する上で重要であり、また、固有速度の非線形効果の理解の手助けになる可能性ある (Forero-Romero et al., 2014)。

2 Method and Simulation

DMH は宇宙の大規模構造を構成する重力的に束縛されたダークマターの塊である。また、宇宙論的 N 体シミュレーションで簡単に再現することができる。1 つの DMH が力学的に平衡状態にあるとすると、ビリアル平衡の式

$$W + 2K = 0, \tag{1}$$

に従う。ここで W はポテンシャルエネルギー、K は運動エネルギーである。まず、球対称な DMH を考える。質量を M、半径を R とし、N 個の質量 m のダークマター粒子で構成されているとすると

$$W = -\frac{1}{2}\sum_{i\neq j}^{N}\frac{Gm^2}{|x^i - x^j|} = -\frac{GM^2}{2R}, \tag{2}$$

$$K = \sum_{i}^{N}\frac{m(v^i - \bar{v})^2}{2} = \frac{M\sigma_v^2}{2}, \tag{3}$$

と書ける。ここで x^i と v^i は DMH 内の i 番目のダークマター粒子の位置と速度であり、$\bar{v}$ は DMH の固有速度 ($\bar{A}$ は DMH 内のダークマター粒子間の物理量 A の平均を表す)、σ_v は DMH 内のダークマター粒子の速度分散である。よって、DMH がビリアル平衡にある場合は

$$\sigma_v^2 = \frac{GM}{2R}, \tag{4}$$

が成り立つ。球対称の場合はさらに、

$$\sigma_{v_x}^2 = \sigma_{v_y}^2 = \sigma_{v_z}^2 = \sigma_v^2, \tag{5}$$

である。ここで $\sigma_v^2 \equiv (\sigma_{v_x}^2 + \sigma_{v_y}^2 + \sigma_{v_z}^2)/3$ である。さらに、DMH 内で密度が一定であると見なせるとすると $M \propto R^3$ なので、

$$\sigma_{v,\mathrm{vir}} \propto M^{1/3}, \tag{6}$$

となる。この関係は様々なコードの N 体シミュレーションで確かめられており、宇宙論パラメータによらず強固な関係であることがわかっている (Evrard et al., 2008)。その一方で、N 個のダークマター粒子からなる DMH が平衡に達する時間は

$$T \propto \frac{\sqrt{NR^3}}{\log N}, \tag{7}$$

で与えられる。

ここで DMH が球対称であることはあくまでも仮定であり、そこからのずれを考えることで更なる情報を得ることができる可能性がある。そのずれを見るために本研究では速度分散の非等方性を考える。速度分散の非等方性として、DMH 内で速度分散が最大 (最小) となる方向を求めた。速度の分散共分散行列 $\boldsymbol{C}$

$$C_{ij} = \frac{1}{N}\sum_{k}^{N}(v_i^k - \bar{v}_i)(v_j^k - \bar{v}_j), \tag{8}$$

の固有値を $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ とすると、$\lambda_1(\lambda_3)$ を与える固有ベクトル $\vec{e}_{v_1}(\vec{e}_{v_3})$ の方向が速度分散が最大 (最小) となる方向を表す。また、その方向の速度分散 $\sigma_{v_1}^2$ は λ_1 で与えられる。

本研究では、Gadget-2(Springel, 2005) を用いて N 体シミュレーションを行った。宇宙論パラメータとして、$(\Omega_m, \Omega_b, \Omega_\Lambda, h, \sigma_8) = (0.307, 0.048, 0.693, 0.678, 0.678, 0.8288)$ を用いた。また、粒子数 $N_p = 512^3$、ボックスサイズ $L = 150[\mathrm{Mpc}/h]$ として計算した。DMH は Friend-of-Friend 法 (Davis et al., 1985) で特定した。以下では、赤方偏移 $z = 0$ の結果を示す。

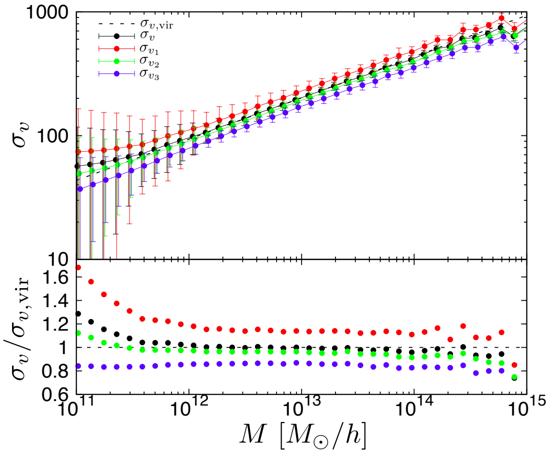

図 1: 上図は DMH の速度分散の平均と分散。速度の分散共分散行列から求めた固有値から求めた値 (σ_{v_1}:赤、σ_{v_2}:緑、σ_{v_3}:青) と 3 方向の平均を取った値 (σ_v:黒)。また、破線は σ_v から式 (6) の振幅を決めた時の理論線 $\sigma_{v,\mathrm{vir}}$。下図は理論線に対するそれぞれの速度分散の割合。

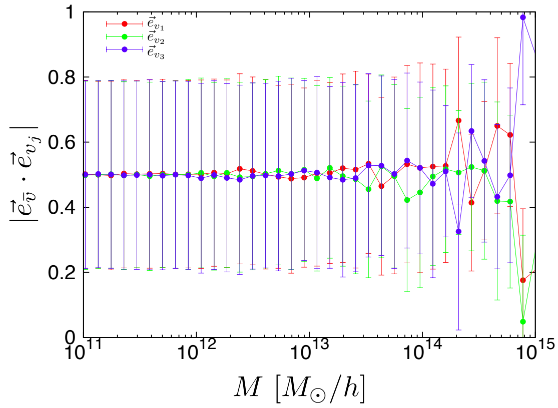

図 2: DMH の固有速度の方向と速度の分散共分散行列の固有ベクトルとの相関。

3 Results

N 体シミュレーションで得られた DMH のサンプルから速度の分散共分散行列を求め、各 DMH の速度分散が最大 (最小) になる方向とその速度分散を求めた。図 1 に、質量でビン分けした中での速度分散の平均と分散を示す。固有値から得られた値 σ_{v_i} に加え、3 方向の平均したときの値 σ_v を示している。さらに理論的に予測される速度分散と質量の関係である式 (6) も示す。振幅は $M = 10^{13}M_\odot/h$ での σ_v の値を用いた。また、下図に理論線に対するそれぞれの値の比も合わせて示す。

4 Discussion

図 1 からわかるように、$M > 10^{12}M_\odot/h$ では確かに理論的に予言される質量と速度分散の関係が成り立っている。また、球対称のようにどの方向でも速度分散が等しい訳ではなく、各 DMH において速度分散が大きくなる方向がある。つまり、DMH の速度分散は非等方性を持つと言える。さらに、速度分散の最大値と最小値の平均値に対する比は、$M > 10^{13}M_\odot/h$ では質量の依存性がないことがわかる。その一方で、式 (7) は軽い DMH の方が早くビリアル平衡に達することを意味している。そのため、低質量側 ($M < 10^{12}M_\odot/h$) の DMH ほうがよりビリアル定理が予言する関係により従いやすいと考えられる。しかし、低質量側で式 (6) の冪から外れており、その上、低質量ほど分散が大きくなっていることがわかる。ビリアル平衡の議論は孤立系を仮定しているが、実際の DMH は互いに相互作用しているため、周りの DMH のがつくる環境の影響を受ける。例えば、合体している途中の DMH ではビリアル定理は成り立たない。また、その DMH 自身が作る重力ポテンシャルよりも、周りにある重い DMH が作る重力ポテンシャルが大きい場合は速度分散が大きくなる。その効果は軽い DMH の方が顕著であるため、図 1 の様な結果になる。さらに、速度分散の最大値が予測される値よりも低質量側でより大きくなっていることから、速度分散が最大となる方向は環境によって決まると考えられる。その一方で、速度分散の最小値は低質量側でも理論が予測する冪からほとんどずれていない。よって、速度分散の最小値はその DMH の質量によって決定されると考えられる。

各 DMH において速度分散が最大または最小となる方向の物理的な意味を見ていく。ここでは DMH にとって特別な方向であると考えられる固有速度の方向と長軸または、短軸の方向の相関を考える。まず、各 DMH の固有速度方向の単位ベクトルと、速度の分散共分散から求めた固有ベクトルの内積を計算した。図 2 に DMH を質量でビン分けし、各ビン

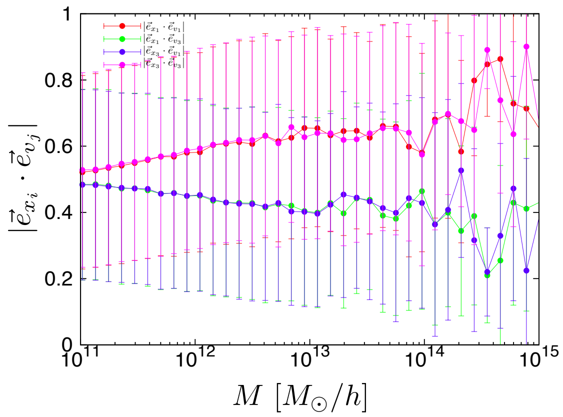

図 3: DMH の長軸方向 $\vec{e}_{x_1}$(短軸方向 $\vec{e}_{x_3}$) と速度分散が最大 (最小) となる方向 $\vec{e}_{v_1}(\vec{e}_{v_3})$ との相関。

での内積の平均値と分散を示す。図からわかるように、質量に関係なく平均値が 0.5 であることがわかる。これは 2 つのベクトルが完全に無相関であることを意味している。つまり、DMH の固有速度方向と速度分散の非等方性に関係はないと言える。これは 1 つまたは複数の DMH からなる系が平衡状態にある場合、その中の DMH の速度分散の非等方性は慣性系の取り方によらないためであると考えられる。次に、各 DMH の長軸や短軸の方向と速度分散が最大 (最小) となる方向の内積を計算した。図 3 にその結果を示す。図から長軸 (短軸) 方向と速度分散が最大 (最小) になる方向の内積の平均値が 0.5 よりも大きくなっていることがわかる。つまり、長軸 (短軸) 方向と速度分散が最大 (最小) になる方向が揃っていることを意味している。また、重い DMH ほど平均値が大きくなっている。よって、速度分散の非等方性はその DMH の形と相関があり、重い DMH ほど強い相関があることがわかる。逆に、軽い DMH の速度分散は DMH の形だけでは決まらず、非等方性から環境の情報を得ることができると考えられる。

5 Conclusion

本研究では、宇宙の大規模構造を使った修正重力理論の更なる制限に向けて、DMH の速度分散の非等方性について調べた。N 体シミュレーションから DMH の速度分散と質量には強い関係があることがわかっているが、軽い DMH では環境の影響によってずれる。速度分散の非等方性を調べることで更なる情報を得ることできる可能性がある。まず、速度の分散共分散行列から DMH の最大値と最小値を求めた。$M > 10^{12} M_\odot/h$ では、質量に関係なく速度分散の最大値 (最小値) と平均値の比は一定であり、また、最小値は低質量側でも質量と強い関係があることがわかった。次に、速度分散が最大 (最小) になる方向の物理的意味を調べるために、DMH の固有速度の方向や長軸 (短軸) の方向との相関を計算した。まず、速度分散の非等方性と固有速度の方向には関係がないことがわかった。また、速度分散が最大 (最小) になる方向と長軸 (短軸) の方向には相関があり、重い DMH ほど相関が強いことがわかった。

今後の課題

(1)3 軸不等な崩壊モデル (Nadkarni-Ghosh & Singhal, 2014) を考えることで DMH の長軸 (短軸) と速度分散の最大値 (最小値) の関係を解析に求める。

(2) 修正重力理論やスクリーニング機構が速度分散の非等方性にどのように影響するかを調べる。

Reference

Asaba, S., Hikage, C., Koyama, K., et al. 2013, JCAP, 8, 29

Johnson, A., Blake, C., Koda, J., et al. 2014, arXiv:1404.3799

Forero-Romero, J. E., Contreras, S., & Padilla, N. 2014, arXiv:1406.0508

Dossett, J., Hu, B., & Parkinson, D. 2014, JCAP, 3, 46

Evrard, A. E., Bialek, J., Busha, M., et al. 2008, ApJ, 672, 122

Springel, V. 2005, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 364, 1105

Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1985, ApJ, 292, 371

Nadkarni-Ghosh, S., & Singhal, A. 2014, arXiv:1407.1945