

バリオンの超音速相対速度が宇宙論的観測に与える影響

浅羽 信介 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

通常物質に加えて冷たい暗黒物質と負の圧力を持つエネルギーを考えるモデルは Λ CDM モデルと呼ばれ、宇宙マイクロ波背景放射や宇宙大規模構造の観測を説明することに成功した。しかし、どのように初代天体が形成され宇宙再電離が起きたかということが宇宙論の問題として残されている。現在計画中の次世代電波干渉計の目的の一つとして、宇宙再電離以前の高赤方偏移中性水素の空間分布を観測することがある。この中性水素の空間分布から、初代天体の形成や宇宙再電離についての情報を得ることができる。さらに高赤方偏移では非線形効果が小さいため、より小スケールでの揺らぎを使った宇宙論の議論ができると考えられている。その一方で、宇宙の晴れ上がり以前にバリオンと光子がトムソン散乱によって強く結合していたことにより、バリオンはダークマターに対して超音速の相対速度を持っていることが知られている。この相対速度はバリオンの密度揺らぎの成長を抑制する。線形理論において、相対速度による項は圧力のように見なすことができ、ジーンズ長を大きくする。そのため、初代天体の形成や小スケールでの揺らぎを考える上で重要であり、さらに、非線形成長に与える影響を見積もる必要がある。本研究では、宇宙論的 N 体シミュレーションを用いてバリオンが持つ超音速の相対速度がダークマターの構造形成に与える影響を計算した。特に球対称崩壊モデルを応用することで相対速度がダークマターの非線形成長に与える影響を準解析的に理解することができることを示した。また、ダークマターハローの形成が遅れることやハロー内のバリオンの割合が減少することが観測量にどの程度影響するのかを見積もったので発表する。

1 Introduction

Λ CDM モデルという、通常物質に加えて冷たい暗黒物質 (CDM) と負の圧力を持つ暗黒エネルギー (DE) を含んだモデルは、数少ないパラメーターで宇宙マイクロ波背景放射や宇宙大規模構造を説明できるため、現在の宇宙論の標準モデルとなっている。その一方で、CDM や DE の性質についてや初代星の形成過程、宇宙再電離についてはまだわかっていないことも多い。これらの問題を解決する一つの方法として、より高赤方偏移、小スケールの構造を観測することがある。特に中性水素の超微細構造線 (21cm 線) を用いて宇宙再電離期以前の物質の構造を観測することを目的の一つとした大規模電波干渉計 (e.g. Square Kilometre Array) が計画されている。

近年、(Tseliakhovich & Hirata 2010) によって宇宙の晴れ上がり時における DM-バリオン間の超音速相対速度が小スケールの構造形成に影響を与えることが示された。宇宙の晴れ上がり以前は、光子とバリオンはトムソン散乱によって一流体の様に振る舞っ

ており、DM とは違った速度場を持っていた。バリオンの速度場の二乗平均平方根は ~ 30 km/s であり、宇宙の晴れ上がり以後のバリオンの音速の 5 倍程度であるため、この DM-バリオン間の相対運動は超音速相対運動と呼ばれている。相対速度はエネルギー運動量保存則から膨張によって a^{-1} で減衰する。また、速度場のパワースペクトルは $k > 0.5$ Mpc $^{-1}$ では拡散減衰を受けるため、小スケールでは相対速度は一様成分と見なすことができる。そして、線形摂動論において小スケールでの相対速度の効果は背景速度として扱うことができる。このとき、バリオンの密度揺らぎの発展方程式は、

$$\frac{d^2\delta_b}{dt^2} = - \left(2H - 2\mu v_{bc} \frac{k}{a} \right) \frac{d\delta_b}{dt} + \frac{3H^2}{2} (\Omega_c \delta_c + \Omega_b \delta_b) - (c_s^2 + \mu^2 v_{bc}^2) \frac{k^2}{a^2} \delta_b, \quad (1)$$

で与えられる。ここで v_{bc} は DM-バリオン間の相対速度であり、 μ は相対速度と波数ベクトルのなす角である。角度平均を考えると μ の一次の項を無視できるため、相対速度による項は圧力の様に振る舞う

ことがわかる。よって、ジーンズ不安定性と同様の議論により、構造形成の減衰スケールとして $k_{bc} = aH/v_{bc} \sim 40 \text{ hMpc}^{-1} (M_{bc} \sim 10^7 M_{\odot}/h)$ を得ることができる。

実際の観測と比較する上で、DM-バリオン間の相対速度が非線形成長に与える影響を見積もることは重要である。相対速度が初代星の形成や構造形成に与える影響は N 体シミュレーションによっても研究されている (Naoz et al. 2012, 2013)。本研究の目的は、球対称崩壊モデルを拡張することにより超音速相対速度が密度揺らぎの非線形成長に与える影響を N 体シミュレーションを用いて見積もることである。また、準解析的モデルを用いて評価を行う。

2 Analytical model

密度揺らぎの非線形成長を求める方法として密度一定の球を考える球対称崩壊モデルがある。球殻の運動方程式は、

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{GM}{x^2}, \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $M = 4\pi x_i^3 \bar{\rho}_i (1 + \delta_i)/3$ である。添字の i は初期時刻での値であることを示している。式 (2) の解析解として、

$$\begin{aligned} \tilde{t} = \frac{t}{t_i} &= \frac{3}{4\sqrt{1+\delta_i}} \left[1 - \frac{(v_i/H_i x_i)^2}{1+\delta_i} \right]^{-3/2} (\theta - \sin \theta), \\ \tilde{x} = \frac{x}{x_i} &= \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(v_i/H_i x_i)^2}{1+\delta_i} \right]^{-1} (1 - \cos \theta), \end{aligned} \quad (3)$$

が得られる。さらに、密度一定を保つように速度を、 $v_i = H_i x_i [1 - \delta_i/3(1 + \delta_i)]$ と与えると、崩壊時の線形密度揺らぎとして、臨界密度 $\delta_{\text{crit}} = 1.69$ が得られる。次に、球対称崩壊モデルにおいてバリオンの相対運動が与える影響を考える。相対速度のために、バリオンは DM が作るポテンシャルに溜まりにくくなる。DM の球殻の運動方程式において、バリオンの寄与を分けると、

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_c}{dt^2} &= -\frac{G(M_{c,i} + M_b)}{x_c^2}, \\ M_{c,i} &= \frac{4\pi}{3} \bar{\rho}_{c,i} x_{c,i}^3 (1 + \delta_{c,i}), \\ M_b &= \frac{4\pi}{3} \bar{\rho}_b x_c^3 (1 + \delta_b), \end{aligned} \quad (4)$$

と書くことができる。ここで、 M_b は DM の球殻内でのバリオンの質量である。DM-バリオン間の相対運動が DM 球殻の崩壊に与える影響は、球殻内のバリオンの質量割合 $f_b = M_b/(M_b + M_c)$ の変化であると解釈することができる。しかし、 f_b を解析的に求めることは難しい。そのため、N 体シミュレーションを用いて影響を見積もる。

3 N-body simulation

N 体シミュレーションを用いて球対称崩壊モデルの再現を行い、バリオンに相対速度を持たせることで DM 球殻の崩壊時刻の変化を見積もった。N 体シミュレーションのコードとしては Gadget-2 (Springel 2005) を用いて重力相互作用のみを計算した。全粒子の 1/6 がバリオンであるとし、また、バリオンの初期時刻での揺らぎの影響を無視する為に $z_i = 1000$ から始めた。DM の初期条件として、まず、一様粒子を置きその中に一様密度球を再現するように粒子を加えた。ボックスサイズは $L_{\text{Box}} = 200 \text{ kpc}/h$ で、球の半径を $r_i = 50 \text{ kpc}/h$ とした。また、DM 球の質量は $M_c \sim 4 \times 10^7 M_{\odot}/h$ であり、初期密度揺らぎとして $\delta_{c,i} = 0.017, 0.033, 0.066$ を計算した。DM 粒子の初期速度として $v_i = H_i r_i \delta_i/3(1 + \delta_i)$ を与えた。バリオンの初期条件としては、一様粒子のみを考え速度として相対速度のみを与えた。図 1 に球殻の時間変化を示す。ここでは $\delta_{c,i} = 0.033$ の結果を示している。また、 $r_i = 42 \text{ kpc}/h$ の結果である。破線は式 (4) を解いた結果である。この準解析解において M_b は N 体シミュレーションから得られた値を用いている。確かに相対速度がある場合、崩壊時刻が変化することが確かめられる。また、相対速度が大きいほど崩壊時刻が遅れることがわかる。さらに、転回時刻まで N 体シミュレーションで得られた結果と準解析解が一致していることがわかる。転回時刻以降、二つの結果がずれる理由は、N 体シミュレーションの場合は無限小の領域に崩壊することができない為である。また、転回点以後は崩壊と同時に緩和が起こる為だと考えられる。

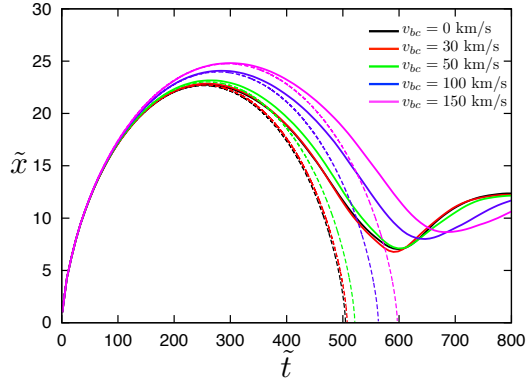


図 1: 球殻の時間変化 (黒: $v_{bc} = 0$ km/s、赤: $v_{bc} = 30$ km/s、緑: $v_{bc} = 50$ km/s、青: $v_{bc} = 100$ km/s、桃: $v_{bc} = 150$ km/s)。実線は N 体シミュレーションの結果であり、破線は式 (4) を解いた結果である。

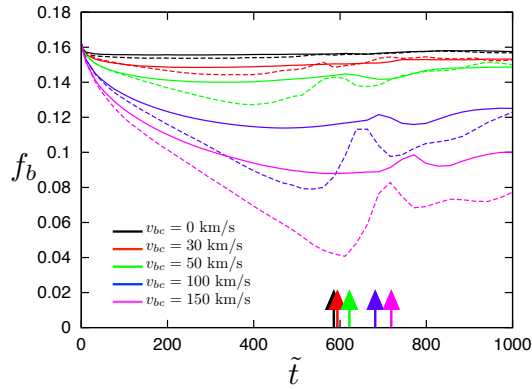


図 2: f_b の時間変化 (黒: $v_{bc} = 0$ km/s、赤: $v_{bc} = 30$ km/s、緑: $v_{bc} = 50$ km/s、青: $v_{bc} = 100$ km/s、桃: $v_{bc} = 150$ km/s)。矢印は DM 球の崩壊時刻を示す。実線は $r_i = 50$ kpc/h の球内で見積もった結果であり、破線は $r_i = 42$ kpc/h の球内で見積もった結果を示している。

4 Discussion

まず、DM 球内でのバリオンの質量割合 f_b の時間変化を図 2 に示す。ここでは、最大球殻内を見積もった結果 (実線) と $r_i = 42$ kpc/h 内を見積もった結果 (破線) を示している。まず、相対速度によって f_b が減少することがわかる。また、DM 球の中心部ほど f_b が小さいことがわかる。これは DM とバリオンの

密度ピークの位置がずれているためであり、さらに、DM 球の崩壊時刻直前に f_b が振動し始める。これより、DM-バリオン間に相対運動が存在する場合、バリオンは DM とは違う場所に溜まり DM の密度ピークの周りを振動しながら緩和するという描像が考えられる。

次に、DM 球の崩壊時刻の変化が DM ハローの質量関数に与える影響を示す。ここでは、崩壊時刻の変化を臨界密度の変化として与える。物質優勢期を考えるとこの変化は

$$\begin{aligned} \tilde{\delta}_{\text{crit}}(M, v_{bc}, \delta_{c,i}) &= \delta_{\text{crit}} [1 + \mathcal{A}(M, v_{bc}, \delta_{c,i})], \\ \mathcal{A}(M, v_{bc}, \delta_{c,i}) &\equiv \frac{a(M, v_{bc}, \delta_{c,i}) - a_0(\delta_{c,i})}{a_0(\delta_{c,i})}, \end{aligned} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 $a_0(\delta_{c,i})$ は相対運動が存在しない時の崩壊時刻である。また、Press-Schechter 質量関数を

$$\begin{aligned} \tilde{n}(M, z) &= \int dv_{bc} P(v_{bc}) \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\tilde{\rho}(z)}{M} \left| \frac{d\sigma(M, z)}{dM} \right| \\ &\times \frac{\tilde{\delta}_c^2(M, v_{bc}, \delta_{c,i})}{\sigma^2(M, z)} \exp \left[-\frac{\tilde{\delta}_c^2(M, v_{bc}, \delta_{c,i})}{2\sigma^2(M, z)} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

と修正する。ここで $P(v_{bc})$ は Maxwell-Boltzmann 分布である。宇宙論パラメータとして PLANCK の値 (Planck Collaboration et al. 2014) を用いた。また、 $\sigma(M)$ は CAMB¹ (Lewis et al. 2000) を用いて計算した。図 3 に相対速度がある場合と無い場合の質量関数の比を示す。式 (6) を計算する上で \mathcal{A} は、 $v_{bc} M^{1/3}$ の大きさに依存することを使った。影領域は N 体シミュレーションの結果から得られる 1σ 領域を示している。また、実線は \mathcal{A} のフィッティング関数 (Asaba et al. 2015) を用いた結果である。この図から DM-バリオン間の相対運動によって、 $M = 10^5 M_\odot/h$ の DM ハローの数密度が $z = 35.6$ で 1 桁、 $z = 17.8$ で 60% 程度減少することがわかる。また、相対運動が影響が顕著になる質量として線形理論から得られる減衰スケール $\sim 10^7 M_\odot/h$ がよい指標になっていることが確かめられる。

¹<http://camb.info>

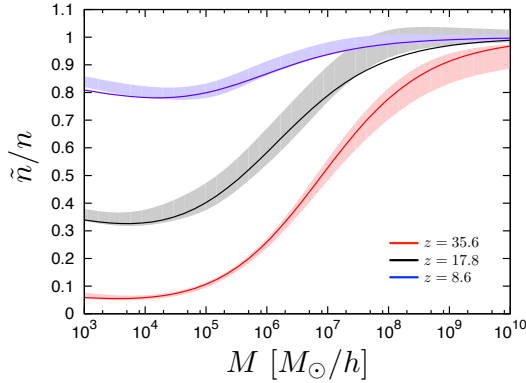


図 3: DM ハローの質量関数の変化。影領域は N 体シミュレーションより得られた 1σ 領域を示している。実線はフィット関数を用いた結果である。

5 Conclusion

宇宙論の残された問題である初代星形成や宇宙再電離などを解決する上で、高赤方偏移の小スケールの情報を使うことは有用であると考えられている。しかし、小スケールの構造形成において宇宙の晴れ上がり以前の光子とバリオンの強結合に起因する DM-バリオン間の相対運動が与える影響を見積もることは重要である。本研究では、球対称崩壊モデルを拡張することによって DM-バリオン間の相対運動が構造形成に与える影響について見積もった。相対速度が存在する場合、DM 球の崩壊時刻が遅れることが確認できた。また、崩壊時刻の遅れは DM 球内のバリオンの質量割合の減少によって説明できる。この結果を考慮して DM ハローの質量関数を計算すると、再電離以前 ($z \gtrsim 10$) で $M \simeq 10^7 M_{\odot}/h$ のハローの数密度が数 10% 減少することがわかった。ハローの数密度やバリオンの質量割合の減少は初代星の形成や分布に大きな影響を与えられられる。また、宇宙再電離の描像も変化すると考えられる。これらは現在計画中の大型電波干渉計による 21cm 線を通した中性水素の観測によって確かめることができると期待される。今後の課題は、21cm 線のシグナルに与える影響を見積もること、バリオン物理も考慮した結果を求めることである。

Acknowledgement

本研究は日本学術振興会から支援を受けています。

Reference

- Tseliakhovich, D., & Hirata, C. 2010, Phys. Rev. D, 82, 083520
- Naoz, S., Yoshida, N., & Gnedin, N. Y. 2012, ApJ, 747, 128
- Naoz, S., Yoshida, N., & Gnedin, N. Y. 2013, ApJ, 763, 27
- Springel, V. 2005, MNRAS, 364, 1105
- Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2014, A&A, 571, A16
- Lewis, A., Challinor, A., & Lasenby, A. 2000, ApJ, 538, 473
- Asaba, S., Ichiki, K., Tashiro, H. 2015, in preparation