ダークマターの自己相互作用を考慮した 宇宙の構造形成シミュレーション

千葉大学 融合理工学府 数学情報科学専攻 情報科学コース 石山研究室 M2 蛭子 俊大

イントロダクション

- ・ 矮小銀河はサブハローと呼ばれる
 ダークマターの局所密度が高い系に属している
 その形成過程や進化の研究は ダークマターの性質を理解する上で重要
- 従来の冷たいダークマター(CDM)モデルに基づく 宇宙論的N体シミュレーション
 - 銀河団スケール以上 ➡ 観測を精度よく再現する
 - 銀河スケール以下 ➡ 観測との矛盾が存在する
 - ex) カスプ-コア問題, ミッシングサテライト問題
- 銀河スケール以下での問題を解決する案の1つ として,自己相互作用するダークマター(SIDM) モデルが提案されてきた.



CDMシミュレーションでの問題



Self-Interacting Dark Matter (SIDM) モデル

(Spergel & Steinhardt 2000)

- ・密度が高いハローの中心で多く<u>自己相互作用</u>する
 - ➡粒子が散乱
 - ➡ハローの中心密度が低下
 - ➡サブハローが減少
- ・高密度以外の場所ではCDMと変わらない
 →大規模構造は変化しない

その他の解決策 – バリオンフィードバック (Ogiya & Mori 2014) – 暖かいダークマターモデル (Bode et al.2000)

本研究の目的

- 従来のSIDMシミュレーション
 - 広範囲なシミュレーション(Mpcスケール以上で宇宙全体) ➡ 粗い質量分解能(10⁷M_☉程度) (Rocha+2013 など)
 - 高い質量分解能なシミュレーション(10⁴M_☉程度) ➡ 狭い範囲(数百kpcスケールでハロー単体) (Zavala+2019 など)



- 宇宙初期から高分解能&広範囲な SIDMシミュレーションを実行
- 低輝度矮小楕円体銀河の観測結果と比較
 ダークマターが支配的
 - シミュレーションに高分解能が必要
 - PFSなどで精密なデータが得られる予定
 - すばる超広視野分光器 PFS (Prime Focus Spectrograph)
 1度に広範囲な波長で大量の天体を分光観測可能
 暗い天体の視線速度のデータを多く得られる
- ダークマターモデルに制限を付けたい!



※今回はSIDMシミュレーションとCDMシミュレーションの比較

SIDM simulation

ダークマターの自己相互作用をシミュレーションに実装するために montecarlo法(Burkert 2000, Kochanek & White 2000)を用いた.

各粒子について最近傍粒子と衝突する確率Pを計算する.
 乱数を生成しPより小さければ最近傍粒子と完全弾性衝突させる.



Cosmological simulation

N	Ω_0	Ω_{b}	λ_0	h	Ζ	BoxSize (Mpc/h)	m_p (M_{\odot}/h)	<i>е</i> (pc/h)
1024 ³	0.31	0	0.69	0.68	127	8	4.1×10^{4}	100

- 国立天文台 XC50 のCPUコア520個を使用
- TreePM code のGreeM (Ishiyama+2009)
 にモンテカルロ法を実装して使用.
- ハロー検出に ROCKSTAR (Behroozi+2013) と CONSISTENT TREE (Behroozi+2013) を使用.
- SIDMシミュレーションは $\sigma/m = 1.0(\text{cm}^2/\text{g})$ のみで実行.
- ・結果よりMWサイズのダークマターハロー $(5 \times 10^{11} M_{\odot} - 4.0 \times 10^{12} M_{\odot})$ を9個得た. これらをCDMとSIDMで比較した.



結果:ホストハローの比較



Fig1.9つのMWサイズのハローの中の1つのハローについて, (a)z = 0での密度プロファイル, (b)z = 0での V_{max} 関数, (c)z = 12 - 0でのビリアル質量の時間進化.

- Fig1より
 - (a)よりSIDMではハローの中心にコアが確認できた.
 - (b)よりSIDMでのサブハローの個数はCDMと比較してわずかしか減少しなかった.
 - (c)よりCDMとSIDMでホストハローの質量の時間進化は変わらなかった.

これらの傾向は全てのMWサイズのハローに見られた.

結果:サブハローの比較







Fig3. z = 0でホストからの距離r内のサブ ハローの累積個数. 7つのMWサイズハロー (> 7 × $10^{11}M_{\odot}$)の平均値をプロット.

- ・ Fig2より
 - SIDMではCDMよりV_{circ}が中心に向けて鋭く減少 ⇒ コア構造になっている. この傾向は全てのMWサイズのサブハローに見られた.
- ・ Fig3より
 - 低質量領域を含むサブハロー(V_{max} > 4.5km/s)はr = 300kpcでSIDMのほうが累積個数 は少ないが,ミッシングサテライト問題を解決できるほどの差は見られない.
 - MW内の明るい衛星銀河に対応するサブハロー(V_{max} > 15km/s)の数もSIDMのほうが
 CDMより少ないが,大きな差は見られなかった.

結果:サブハローの平均面密度の比較



Fig4. z=0における全MWサイズハローのサブハロー($V_r > 10 \text{km s}^{-1}$)の $V_r - \Sigma_{V_r}$ 図. 円運動速度の最大値をとる半径を r_{max} として, 左から $r = (1, 1/2, 1/4, 1/8)r_{\text{max}}$ での結果を示す. 上段は散布図. 中段は V_r をビンで区切った各範囲の四分位を表し, 中央値を線で結んだ結果を示す. 下段は各中央値の SIDM/CDM を表す.

- Fig4より
 - $r = r_{\text{max}}, 1/2 r_{\text{max}}$ ではCDMとSIDMの結果で顕著な違いは見られなかった.
 - $r = 1/4 r_{max}$ ではSIDMの平均面密度がCDMの約8割に, $1/8 r_{max}$ では約7割に低下した.

まとめ

- 高分解能かつ広範囲でSIDMシミュレーションを行い,
 CDMシミュレーションの場合とハローの構造を比較した.
- ホストハローの密度プロファイルやサブハローの回転曲線 (Fig1(a),2)からSIMDでの中心密度の減少,コア構造の形成が確認 できた.これらは先行研究(Robels+2019, Zavala+2019)と共通する.
- ホストハローの質量の時間進化(Fig1(c))から, SIDMがホストハローの形成過程に与える影響はほとんど無いことが確認できた.
- サブハローのV_{max}関数,空間分布(Fig1(b), 3)からσ/m=1.0(cm²/g)
 ではミッシングサテライト問題の解決は困難と考えられる.
- 円運動速度の最大値をとる半径の約1/4から, SIDMとCDMの平均 面密度に差が見られた(Fig4).
- 今後の予定
 - 粒子数を2048³に増やしてシミュレーションを実行し,より詳細なCDMと SIDMの比較を行うことを検討中.