矮小銀河の回転曲線における理論と観測の不一致

畑　千香子 (北海道大学大学院 宇宙理学専攻)

Abstract

宇宙マイクロ波背景輻射の揺らぎの詳細な観測により、平坦・低密度で宇宙の物質密度の大部分を cold dark matter が占める ΛCDM が宇宙の標準モデルとして確立された。ΛCDM モデルに基づく銀河形成シミュレーションでは、矮小銀河のダークハローの中心密度プロファイルが近傍矮小銀河の回転速度の観測から示唆されるような銀河中心部で密度一定の”core”ではなく密度が半径の累乗の”cusp”構造を持つ（Navarro et al. 1996b, 1997）という問題”core-cusp problem”（Moore 1994）があることが 1990 年代半ばから知られている。

本発表ではこの問題に関する Oman et al.（Submitted to MNRAS）の論文のレビューを行う。この論文では EAGLE プロジェクトと LOCAL GROUPS プロジェクトによる ΛCDM 宇宙論的流体シミュレーションから得られた銀河の回転速度を調査し、矮小銀河の観測によって得られた回転曲線との比較を行っている。その結果から”core-cusp problem”を観測から示唆される銀河の中心密度プロファイルが理論から推測されるような半径の累乗ではなく一定であるという ”密度傾斜の不一致 ”の問題ではなく、銀河の内部領域の質量が理論から推測されるものよりも非常に小さいという ”内部質量の不足 ”の問題であるとみなし、次に述べる三つの事柄の内一つ又はそれ以上が正しくなければならないと示している。(i)dark matter は現在あるモデルで予想されるよりも複雑である。(ii) 矮小銀河の内部領域のバリオンの効果の再現が現在のシミュレーションでは正しくない。(iii) 運動学のデータから推測される ”内部質量が不足 ”している銀河の質量プロファイルを再評価する必要がある。

1 Introduction

宇宙論的シミュレーションによってダークマターハロー内部の密度プロファイルが詳細に調べられてきた。Navarro et al.(1997) はダークマターの平均密度プロファイルは半径のみに依存し $\rho \propto r^{-\gamma}(\gamma = 1)$ と近似できることを示唆した（NFW profile)。これによると密度プロファイルは $r \to 0$ の極限で発散する cusp 構造をもつ。観測的に密度プロファイルを求めるために使われる手法として、近傍銀河の回転曲線を調べる方法がある。回転曲線から見積もった密度プロファイル は、比較的大質量の銀河で理論と整合的であるが、矮小銀河については中心付近で密度がほぼ一定の core 構造を示す。このシミュレーションと観測の不一致は core-cusp 問題として知られている。

core-cusp 問題の様々な解決策が 1990 年代半ばから提案されてきた。例えばハロー中に core を形成する可能性を示す解決策として、”cold”ではないダークマターや自己相互作用するダークマター（SIDM; see e.g., Spergel & Steinhardt 2000）を仮定するというものと銀河形成の間に働くバリオン効果考慮するというものがある。その他、観測結果からの内部のダークマター密度の傾きに対する要請を再検討する必要性を主張するものがある。

銀河中心部の γ の値に注目して議論をすることは、重要な観点である銀河の内部質量についての問題を見落とす危険性を持つ。Oh et al.(2011) はバリオンによって引き起こされた揺らぎがダークマター cusp を平らにするようなシミュレーションで得られた銀河を観測結果と比較した。そのうちの一つである IC2574 について図 1 に示す。Oh et al. は最も中心部の γ の値の類似性に基づき、シミュレーションによる銀河は近傍の矮小銀河の観測結果に類似したハロー中心の質量分布を持つと結論付けた。しかし、この結論は IC2574 の密度プロファイルがシミュレーションによるものと比較して大きく異なっていることを評価

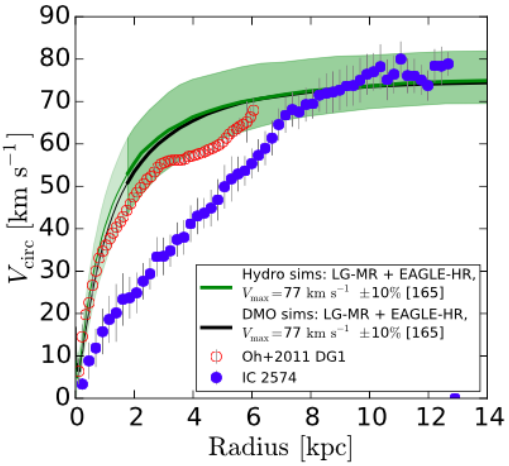

図 1: IC2574 の回転曲線とシミュレーションによる回転速度

していない。この原因の一つは回転速度を規格化していることである。

今までの core-cusp 問題の解決策は γ の値が観測と理論で整合的になるようなものであった。確かにバリオンの効果は、最も内部の γ の値を観測と一致する平坦なものにできるが、シミュレーションによって得られる回転曲線は観測から得られるものとの一致が十分ではない。それゆえに、この論文では観測から得られるすべての回転速度プロファイルを直接流体力学シミュレーションと比較することによって、core-cusp 問題の見直しを行っている。

そのために EAGLE プロジェクトと LOCAL GROUPS プロジェクトのシミュレーション結果から選んだ銀河の回転速度プロファイルを考える。シミュレーションによって得られた銀河は回転速度の最大値が 25 から 250km s^{-1} の広い範囲に及ぶ。これを同じ範囲の回転速度の最大値を持つ実際の銀河と比較する。

2 Methods

この論文の研究では EAGLE（Schaye et al.2015; Crain et al.2015）プロジェクトによるシミュレーションの結果の中で最も解像度の高い結果（EAGLE-HR）と LOCAL GROUPS（Sawala et al.2015）プロジェクトによるシミュレーションの結果の解像度の異なる 3 つの結果（低いものから LG-LR、LG-MR、LG-HR）を用いる。それぞれのシミュレーション結果のパラメータを表 1 に示す。

表 1: シミュレーションのパラメータ

Simulation	Particle Masses($M_\odot$) DM	Gas	Max Softening Length(pc)	Cosmological Parameter
EAGLE-HR	1.2×10^6	2.3×10^5	350	Planck15
LG-LR	7.3×10^6	1.5×10^6	712	WMAP7
LG-MR	5.9×10^5	1.3×10^5	308	WMAP7
LG-HR	5.0×10^4	1.0×10^4	134	WMAP7

銀河の回転曲線は次の資料から用いる。Oh et al. 2015; Adams et al. 2014; Oh et al. 2011; Kuzio de Naray et al. 2008; de Blok et al. 2008; de Block et al. 2004; Swaters et al. 2003; de Blok & Bosma et al. 2002; de Block et al. 2001。

3 Results & Discussion

シミュレーションによる銀河の回転速度プロファイルは半径 r 内の質量 $M(<r)$ から以下の式で求められる。

$$V_{\rm circ} = \sqrt{\frac{GM(<r)}{r}} \tag{1}$$

これを図 2 に示す。図 2 からシミュレーションによって得られた回転速度はその最大値（$V_{\rm max}$）の関数になっていることがわかる。これに対し観測から得られた回転曲線は特に矮小銀河において、$V_{\rm max}$ が等しい場合でもその差が大きい。

SIDM や WDM は core を形成することが可能であるが、この場合すべての銀河が core を持ち同じ質量や回転速度を持つ銀河は同じ大きさの core を持つと推測される。これは $V_{\rm max}$ が等しい場合でも回転曲線の差が大きいという観測結果に反する。したがって、提案されているダークマターの性質では回転曲線を説明できない。

図 3 は回転速度の最大値に対する半径が 2kpc での回転速度（$V_{\rm circ}$(2kpc)）をプロットした図である。この図の左下のパネルからいくつかの銀河の半径 2kpc での回転速度が、シミュレーションから推測される回転速度の最大値が等しい銀河と比較して小さい、つまり、銀河内部の質量が不足していることがわかる。これらの銀河の一部は不足している質量が Tully-Fisher

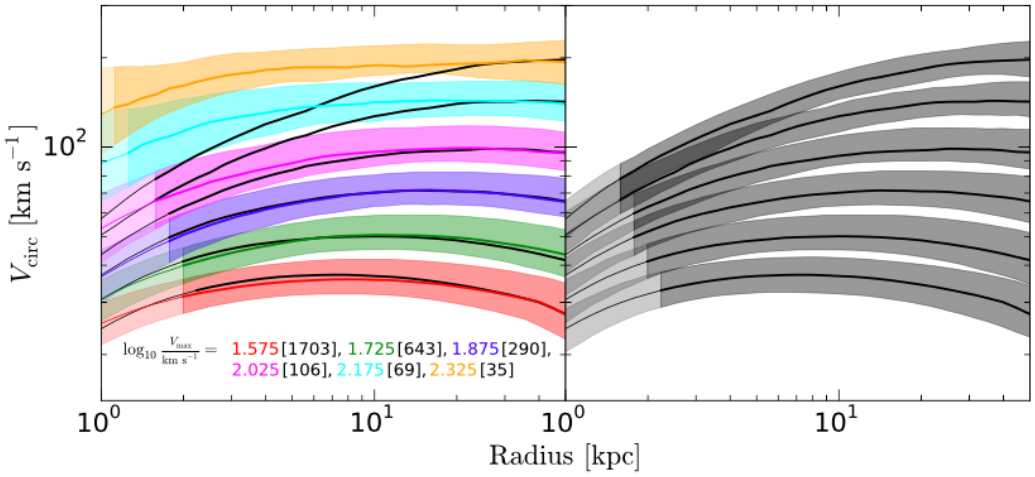

図 2: シミュレーションによって得られた銀河の回転速度。右がダークマターのみの場合のシミュレーションの結果を、左が流体力学シミュレーションの結果を示している。

関係（Sales et al 2015, in preparation）から求められるバリオンの質量の合計と同等あるいはそれ以上である。

バリオン効果によって"core"が形成されるとするシミュレーションではこの結果を説明することができない。図 3 の右下のパネルが示すように"core"を形成するシミュレーション結果の一部は $V_{\rm circ}(2{\rm kpc})$ が小さくなっているがその効果は小さく、内部領域の質量が $5\times10^8{\rm M}_\odot$ 以上不足している銀河を説明できる結果はない。

4 Conclusion

この論文の研究では銀河の回転曲線の調査と core-cusp 問題の再評価のために EAGLE プロジェクトと LOCAL GROUPS プロジェクトによる ΛCDM 宇宙における銀河形成の宇宙論的流体力学シミュレーションで得られた回転速度を用い、これを観測結果と比較した。

その結果、銀河の回転曲線について二つの問題があるとしている。一つ目はシミュレーションでは銀河の回転速度がその最大値の関数になっているのに対し、観測から得られた回転曲線は回転速度の最大値が等しい場合でも差が大きいこと。二つ目は銀河の内部領域質量が不足していることである。

以上の問題はダークマターの性質の修正や ΛCDM 宇宙において銀河の中に core が形成されるとする現在のモデルでは説明することができない。また、観測からの内部質量に対する要請を再評価する必要性も考えられる。銀河の内部の回転曲線の謎は現在未解決のままである。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号：YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

Oman, K. A., Navarro, J. F., Fattahi, A., Frenk, C. S., Sawala, T., White, S. D. M., Bower, R., Crain, R. A., Furlong, M., Schaller, M., Schaye, J., & Theuns, T., 2015, arXiv:1504.01437v1

Adams, J. J., Simon, J. D., Fabricius, M. H., et al. 2014, ApJ, 789,

Crain, R. A., Schaye, J., Bower, R. G., et al. 2015, ArXiv e-prints, arXiv:1501.0131163

de Blok, W. J. G., McGaugh, S. S., & Rubin, V. C. 2001, AJ, 122, 2396

de Blok, W. J. G., & Bosma, A. 2002, A& A, 385, 816

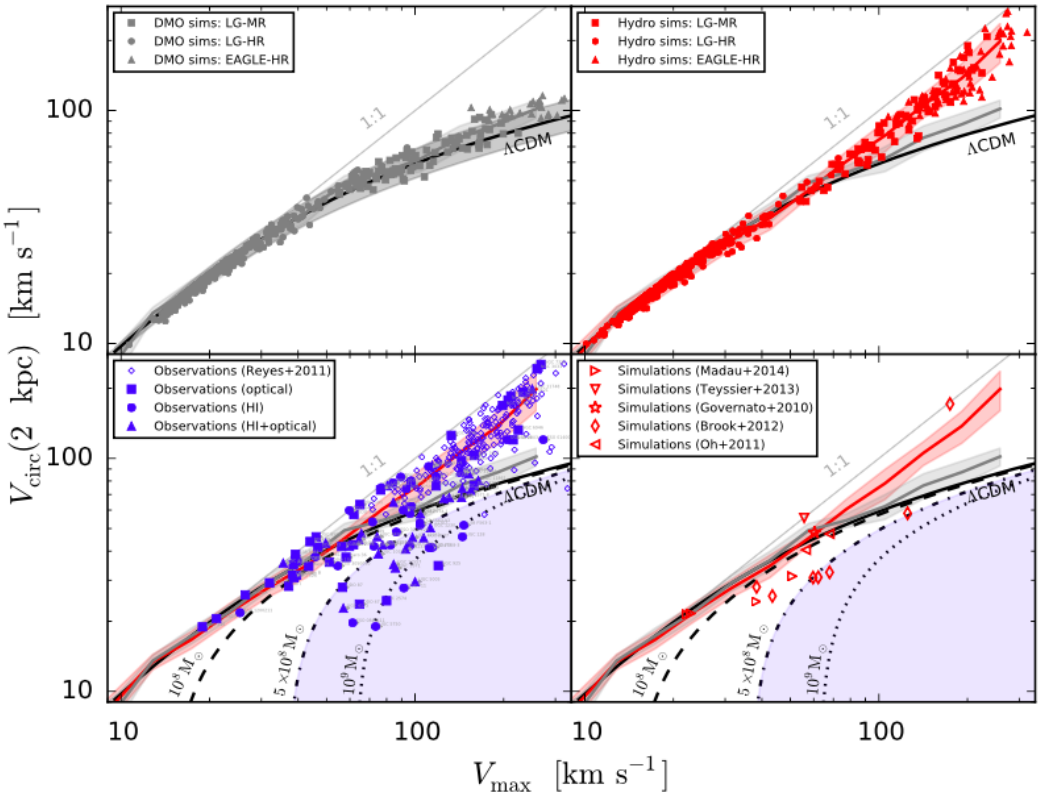

図 3: $r = 2$kpc における回転速度と回転速度の最大値。左上はダークマターのみの場合のシミュレーションの結果、右上がバリオンを含めた場合のシミュレーションの結果、左下が観測結果、右下が ΛCDM ハローの中に core を形成すると報告されている最近のシミュレーションの結果をそれぞれ示している。黒の実線は NFW プロファイルを表している。また、下の図には観測から得られた回転曲線から予測される半径 2kpc 以内の質量がシミュレーションによって得られた結果に比べてどれだけ不足しているかを示し、特にその不足が $5 \times 10^8 M_\odot$ 以上の領域を薄い青で表している。

de Blok, W. J. G., Weldrake, D. T. F., & Walter, F. 2004, in IAU Symposium, Vol. 220, Dark Matter in Galaxies, ed. S. Ryder, D. Pisano, M. Walker, & K. Freeman, 373

de Blok, W. J. G., Walter, F., Brinks, E., et al. 2008, AJ, 136, 2648

Kuzio de Naray, R., McGaugh, S. S., & de Blok, W. J. G. 2008, ApJ, 676, 920

Moor, B. 1994, Nature, 370, 629

Navarro, Frenk, & White, 1997, ApJ, 490, 493

Oh, S.-H., de Blok, W. J. G., Brinks, E., Walter, F., & Kennicutt, Jr., R. C. 2011, AJ, 141, 193

Oh, S.-H., Hunter, D. A., Brinks, E., et al. 2015, ArXiv e-prints, arXiv:1502.01281

Sawala, T., Frenk, C. S., Fattahi, A., et al. 2015, MNRAS, 448, 2941

Schaye, J., Crain, R. A., Bower, R. G., et al. 2015, MNRAS, 446, 521

Spergel, D. N., & Steinhardt, P. J. 2000, Physical Review Letters, 84, 3760

Swaters, R. A., Madore, B. F., van den Bosch, F. C., & Balcells, M. 2003, ApJ, 583, 732