

コールドダークマターハローのコア-カスプ問題が 超新星爆発で解決できるか？

加藤 一輝 (筑波大学大学院 数理物質科学研究科)

Abstract

コア-カスプ問題に関する論文、Navarro, Eke and Frenk (1996) 及び Ogiya and Mori (2011) のレビューを行う。コア-カスプ問題とは、理論で得られたダークマター (DM) ハローの中心密度がカスプ状の分布を示唆しているのに対して、観測ではコア状の分布をしているという矛盾である。Navarro, Eke and Frenk (1996) では球対称な矮小銀河からガスが放出するモデルを N 体計算し、DM ハロー中心のカスプがコアに遷移することを示した。一方、Ogiya and Mori (2011) では、ガス放出の time scale と系の粒子数に注目して計算が行われていて、結果として、Navarro, Eke and Frenk (1996) の計算は十分な精度がないことと、ガス放出の time scale が短いほうが中心密度をより平坦にすることを示した。しかし、どのような time scale の場合でも中心にカスプが残るため、Ogiya and Mori (2011) は、ガスの放出は DM ハロー中心のカスプをコアにする効果的なメカニズムではないと言及している。

1 Introduction

コールドダークマターモデルは宇宙の大規模構造を上手く再現するため、現在、宇宙の構造形成において最も有力な理論である。しかし、銀河スケールにおいていくつかの問題が存在する。その問題の一つが、今回取り扱うコア-カスプ問題である。コア-カスプ問題とは、理論で得られた DM ハローの中心密度がカスプ状の分布 (中心密度が発散) を示唆しているのに対して、観測ではコア状の分布 (平坦) をしているという矛盾である。図 1¹⁾ が理論によって得られたカスプ構造の例、図 2⁹⁾ が観測されたコア構造の例である。

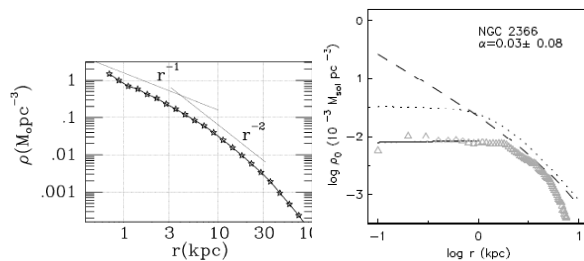


図 1: 理論によって得られた DM ハロー分布

計算が行われてきた。矮小銀河を取り扱った理由は、他の銀河に比べ、重力ポテンシャルが浅く、星間ガスが超新星爆発等の影響を受け易いからである。本発表では、銀河中心からのガス放出を考えた、Navarro, Eke and Frenk (1996) 及び Ogiya and Mori (2011) についてレビューをする。

2 Navarro, Eke and Frenk model

本論文では、カスプを持つ DM ハローの中心から瞬間的に質量放出が発生した場合に、系がどのように準平衡状態に遷移するかを調べた。DM ハローの密度 $\rho_{DM}(r)$ は Hernquist モデル³⁾

$$\rho_{DM}(r) = \frac{M}{2\pi} \frac{a}{r(r+a)^3}, \quad (1)$$

を仮定する。ここで、M、a は DM ハローの全質量とスケール長である。彼らは 10^4 個の粒子を用いて N 体計算を行った。銀河円盤の重力ポテンシャルは指数関数的に増加するとし、円盤の質量 $M_{disk}(=0.05, 0.1, 0.2)$ とスケール長 $r_{disk}(=0.01, 0.02, 0.04)$ にのみ依存するとした。DM ハローと外場による系が準平衡状態になるように 30

この矛盾を解決するために、矮小銀河における N 体

図 2: 観測された DM ハロー分布

単位時間経過させ、その後、瞬時に外場が無くなる条件のもと計算を行った。観測¹⁰⁾によると、バリオンの質量は銀河の全質量の 17% 程度なので、 $M_{disk} = 0.2$ がこの中で一番現実的なモデルである。 $M_{disk} = 0.2$ のときの計算結果が図 3 である。図 3 の縦軸は DM ハローの密度、横軸は DM ハローの中心からの距離である。実線は初期条件で、一点鎖線は質量の放出がない場合である。そして、長鎖線は $r_{disk} = 0.04$ 、短鎖線は $r_{disk} = 0.02$ 、点線は $r_{disk} = 0.01$ で、質量放出後に準平衡状態となった時の密度分布を示している。この図より、瞬時の質量損失によって中心密度がカスプからコアになったことが伺え、Navarro, Eke and Frenk (1996) は矮小銀河のコアカスプ問題は解決したと主張した。

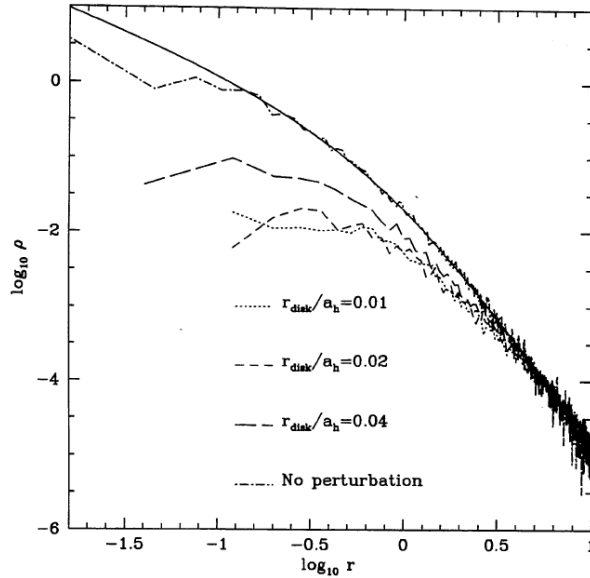


図 3: DM ハローの密度分布

3 Ogiya and Mori model

Ogiya and Mori (2011) は Navarro, Eke and Frenk (1996) の行った計算は粒子数が少ないため、2 体緩和を無視できずに中心密度がコアになった可能性を指摘した。2 体緩和とは、粒子の多重散乱により、粒子の初期の進行方向の速さと、それに垂直な速さがほぼ等しくなった状態を言う。重力多体系

において、2 体緩和するまでにかかる時間、緩和時間 t_{rel} は系の粒子数 N とその系を粒子が横切る時間 t_{cross} を用いて以下の式で見積もる事ができる⁴⁾。

$$t_{rel} = \frac{0.1 \times N}{\ln N} t_{cross} \quad (2)$$

この緩和時間 t_{rel} が系の進化より十分大きければ、2 体緩和を無視することが出来る。実際の銀河では粒子数が $\sim 10^{11}$ 個と十分大きいために緩和時間が宇宙年齢より十分大きくなり、2 体緩和の影響はない。しかし、粒子数の少ない計算では人工的な 2 体緩和が発生する場合がある。以上を踏まえ、今回の計算は粒子数に注意して行い、その上で、ガス放出の time scale にも注目して行う。

3.1 Numerical model

DM ハローのビリアル質量とビリアル半径として $10^9 M_{\odot}$ 、10kpc を、DM ハローの密度として

$$\rho_{DM}(r) = \frac{\rho_0 R_{DM}^3}{r^\alpha (r + R_{DM})^{3-\alpha}}, \quad (3)$$

を仮定した。ここで、 r は DM ハローの中心からの距離で、 ρ_0 、 $R_{DM}(=2\text{kpc})$ は DM ハローのスケール密度とスケール長である。 α の値は理論的にまだ決定していないが、 $\alpha=1$ の Navarro-Frenk-White(NFW) モデル⁸⁾ と、 $\alpha=1.5$ の Fukushima-Makino-Moore(FMM) モデル¹⁾⁶⁾ の 2 つのモデルで計算する。また、観測⁹⁾ では $\alpha = 0.2 \sim 0.3$ である。バリオンモデルは外場として Hernquist モデル³⁾ のポテンシャル

$$\Phi_b(r) = -\frac{GM_b}{r + R_b}, \quad (4)$$

を仮定した。ここで、 G は重力定数で、 M_b 、 $R_b(=0.04\text{kpc})$ はバリオンの質量と外場のスケール長である。また、準平衡状態を作るために外場を加えてから時間を $\sim 30t_d$ 経過させている。 t_d は自由落下時間で、以下で定義される。

$$t_d(r) = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\bar{\rho}(< r_d)}} \quad (5)$$

$\bar{\rho}(< r_d)$ は $r_d = 0.2\text{kpc}$ 以内の DM ハローの平均密度である。また、ガスの放出は $M_b = M_{b,tot}(1 - \frac{t}{T_{out}})$

Table 1
Summary of Simulation Runs

ID	DM Halo	N	T_{rel}	Mass Loss (T_{out})	Fitted α
UP1	FMM	1,048,576	495 t_d	...	
UP2	FMM	16,384	7.74 t_d	...	
UP3	NFW	1,048,576	148 t_d	...	
UP4	NFW	16,384	2.32 t_d	...	
ML1	FMM	1,048,576	495 t_d	Instantaneous	0.85
ML2	FMM	1,048,576	495 t_d	1 t_d	1.20
ML3	FMM	1,048,576	495 t_d	10 t_d	1.44
ML4	FMM	1,048,576	495 t_d	50 t_d	1.46
ML5	NFW	1,048,576	148 t_d	Instantaneous	0.42
ML6	NFW	1,048,576	148 t_d	50 t_d	0.89

Notes. ML indicates mass-loss runs, and UP indicates unperturbed runs to examine the stability of the N -body system and the effects of two-body relaxation. T_{rel} is a two-body relaxation time within 0.2 kpc.

表 1: モデルパラメータ

とした簡単なモデルを用いる。ここで、 $M_{b,tot}$ ($= 1.7 \times 10^8 M_{\odot}$)、 T_{out} は全てのバリオンの質量とガス放出の time scale である。ただし、瞬時に全てのガスが放出された場合は $M_b=0$ とする。計算の詳細は表 1 に記してある。

3.2 Results

図 4 は縦軸に DM ハローの密度、横軸に DM ハローの中心からの距離を取っていて、すべて FMM モデルである。(a) は外場を加えてから $\sim 30t_d$ 経過した状態である。また、鎖線は外場を加える前の初期状態である。そして、(b) \sim (e) は瞬時にガスを放出するモデル (ML1) の時間発展、(f) \sim (i) は準断熱的にゆっくりとガスを放出するモデル (ML4) の時間発展を上から下へ表してしている。それぞれの時間発展は (a) の状態から $15t_d$ 、 $30t_d$ 、 $50t_d$ 、 $110t_d$ である。ML1 では始めに中心密度が平坦になったが、中心から次第にカスが回復した。そして、最終状態ではカスが初期状態に比べてなだらかな状態になった。ML4 ではカスが時間発展と共になだらかになっているが、これはバリオンの放出によるものである。これは、最終状態が FMM モデルの初期状態に戻っていることから分かる。NFW モデル (ML5)、(ML6) の場合も同じ様な結果となる。

図 5 の左のパネルが FMM モデルで、右のパネルが NFW モデルである。そして、上の 4 つのパネルは図 4 と同様に、縦軸に DM ハローの密度、横軸に

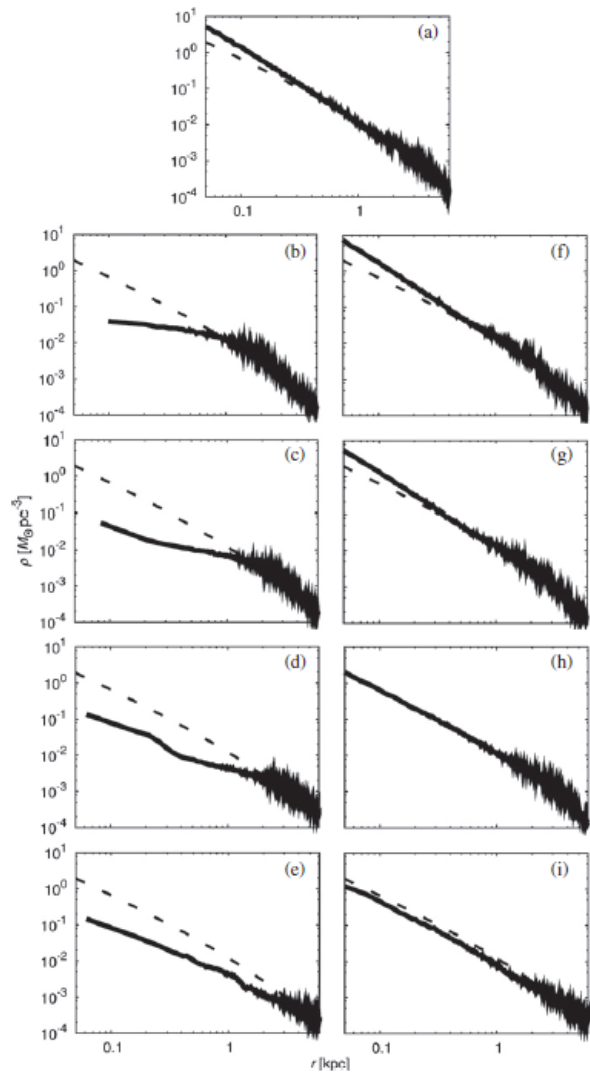


図 4: FMM モデルにおける DM ハローの時間発展

DM ハローの中心からの距離を取っている。鎖線はそれぞれのモデルでの初期状態である。下の 2 つのパネルは、縦軸に DM ハローの全エネルギーの変化、横軸に外場を加えてからの時間経過を取っている。ガスの放出は $40t_d$ 辺で始まっている。

図 5 の上のパネルは外場を加えてない FMM モデルと NFW モデルの初期状態を示している。細線は

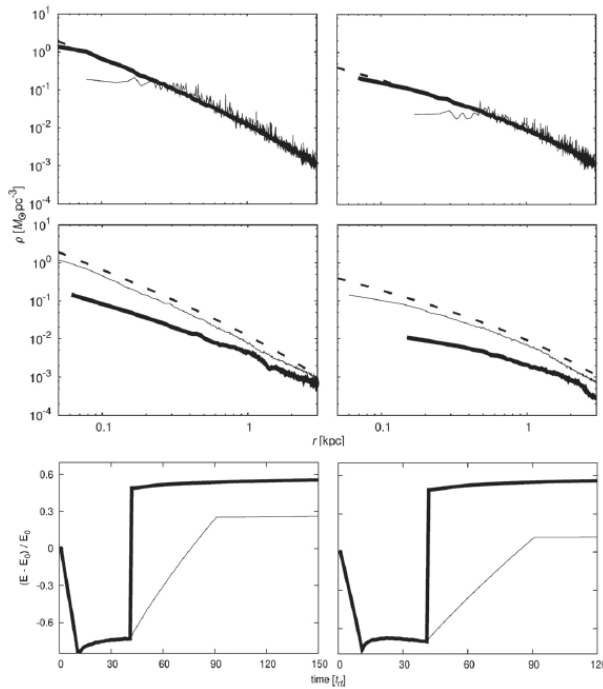


図 5: 粒子数及びガス放出の time scale の違いによる DM ハローの最終状態の比較

粒子数の少ない (1.6×10^4 個) 場合 (up2)、(up4) であり、太線は粒子数の多い (10^6 個) 場合 (up1)、(up3) である。細線は 2 体緩和を無視できず、中心の密度が平坦になっていることが分かる。一方、太線は傾斜となっており、十分に 2 体緩和が無視出来ている。つまり、Navarro, Eke and Frenk (1996) の計算 (10^4 個) では 2 体緩和の影響を十分無視できていないのである。

真ん中のパネルはガス放出後に準平衡状態になった時である。太線は瞬時にガスを放出する場合 (ML1)、(ML5) で、細線は $T_{out} = 50t_d$ かけてガスを放出する場合 (ML4)、(ML6) である。FMM モデルで、ガスが無くなる time scale に注目すると表 1 より、条件が ML1 の時 $\alpha = 0.85$ 、ML2 の時 $\alpha = 1.20$ 、ML3 の時 $\alpha = 1.44$ 、ML4 の時 $\alpha = 1.46$ である。これらより、ガス放出の time scale が短い方がカスプを平坦にすることが分かる。しかし、瞬時にガスを放出する場合でも NEW モデルでは $\alpha = 0.42$ 、FMM モデルでは $\alpha = 0.85$ である。この値は観測の $\alpha = 0.2 \sim 0.3$ よりも大きい値であり、観測を再現できない。下のパネルの太線は瞬時にガスを放出する場合で、細線は $T_{out} = 50t_d$ かけてガスを放出する場合である。このパネルより、瞬時にガスを放出した方が、ゆっ

くり放出する場合より多くのエネルギーを得ている事が分かる。すなわち、ガス放出の time scale が短い方が多くの運動エネルギーを得て、カスプをより平坦にするのである。

4 Discussion

Navarro, Eke and Frenk (1996) のコアカスプ問題の計算は「ガス放出の time scale を考えていない。」そして、「2 体緩和の影響を十分無視できない。」という問題があった。Ogiya and Mori (2011) はこれを解決し、ガス放出の time scale が DM ハローの力学応答に深く関係していること示し、それが短いほうが中心のカスプを平坦にすることを示した。しかし、瞬時にガスが放出するモデルでも、最終状態における α の値は観測の値より大きくなった。よって、ガスの放出は中心のカスプをを平坦にする効果的なメカニズムではないのである。従って、コアカスプ問題は解決できないことが分かった。

Reference

- 1) Fukushige, T. and Makino, J. 1997, ApJ, 477, L9
- 2) Ogiya, G. , and Mori. M. 2011, ApJ, 736L, 20
- 3) Hernquist, L. 1990, ApJ, 356, 359
- 4) Binney, J. , and Tremaine, S. 2008, Galactic Dynamics 2nd ed, Princeton University Press,
- 5) Komatsu, E. , et al. 2009, ApJS, 180, 330
- 6) Moore, B. , Quinn, T. , Governato, F. , Stadel, J. , and Lake, G. 1999, MNRAS, 310, 1147
- 7) Navarro, J. F. , Eke, V. R. , and Frenk, C. S. 1996, MNRAS, 283, L72
- 8) Navarro, J. F. , Frenk, C. S. , and White, S. D. M. 1996, ApJ, 462, 563
- 9) Spekkens, k. , Giovanelli, R. , and Haynes, M. p. 2005, AJ, 129, 2119
- 10) Spiegel, D. N. , et al. , 2007, ApJS, 170, 377