

CDMモデルにおける cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題の関連性

加藤一輝(筑波大学)

共同研究者: 森正夫(筑波大学)
扇谷豪(LMU, MPE)

Introduction

標準的な構造形成理論である**Cold dark matter(CDM)モデル**は、宇宙の大規模構造の統計的な性質を再現することに成功したが、**銀河スケール以下の構造でいくつかの問題が存在する**

- ・数値計算による **cusp-core問題** の研究
- ・解析手法による **too-big-to-fail問題** の研究



二つの問題に関連性を見出し、同時に解決できることを示唆

・数値計算によるcusp-core問題の研究

Cusp-core問題

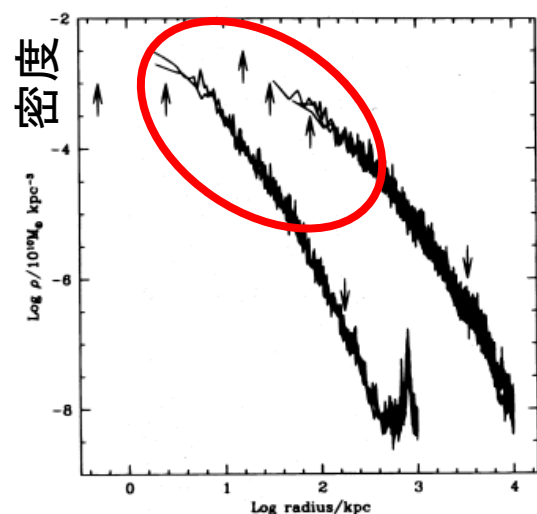
Dark matter halo(DMH)の
中心部の密度分布の矛盾

Burkert (1995)等

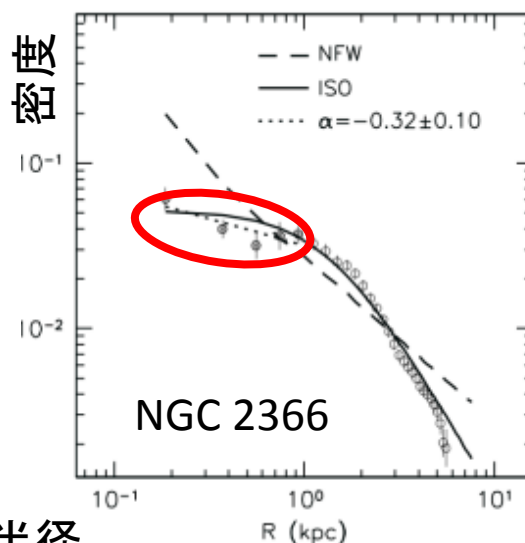
理論:cusp構造

観測: core構造

(中心密度分布が発散) (中心密度分布が平坦)



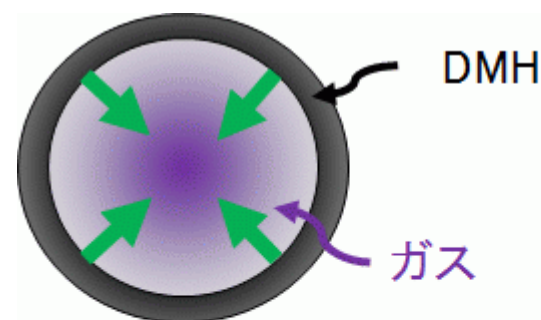
Navarro et al. (1996)



Oh et al. (2011)

方法

周期的な超新星爆発(SN)による
ガスの重力ポテンシャル変動が
DMHに及ぼす影響を調べる



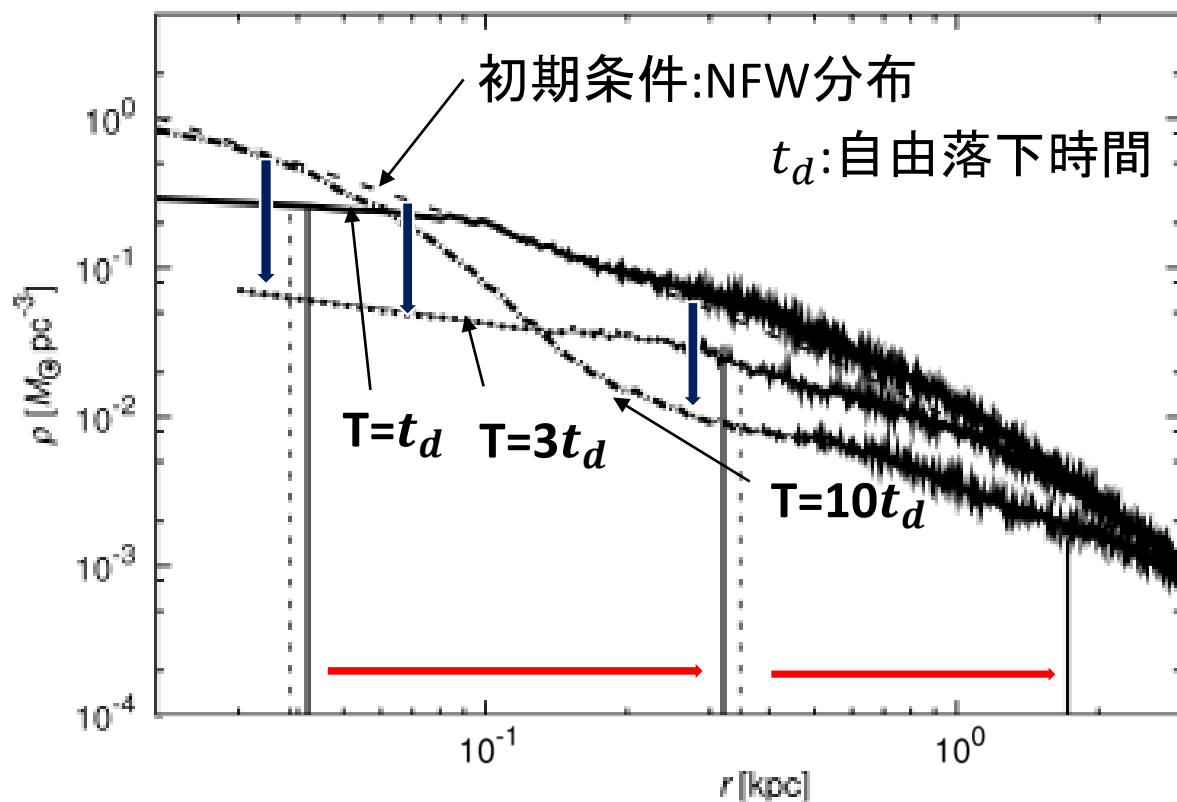
重力によりガス収縮

重いDMHならガスは系に
束縛されたままとなり
周期的にSNが起こる

・先行研究

SNの周期と自由落下時間が近いと
ランダウ共鳴によって、効率よくDMHが加熱される

Ogiya and Mori (2014)



縦の(点線、実線)は解析的に見積もった r_{core}

Cusp-core遷移し、
振動周期が長いほど
coreの出来る位置が外側になる

$$\text{NFW分布: } \rho = \frac{\rho_s r_s^3}{r(r_s + r)^2}$$

ρ_s :スケール密度
 r_s :スケール半径

Navarro et al.(1996)

$$\text{外場: } \Phi_b(r, t) = -\frac{GM_b}{r + R_b(t)}$$

r_{core} :密度の下がる位置

$T(\text{Myr})$	$r_{core}(\text{kpc})$	
500	11	↑ 外側
100	3.0	
70	2.2	↑ スケール半径
50	1.5	
13	0.24	↓ 内側

線形解析による
振動周期と密度が下がる位置の関係

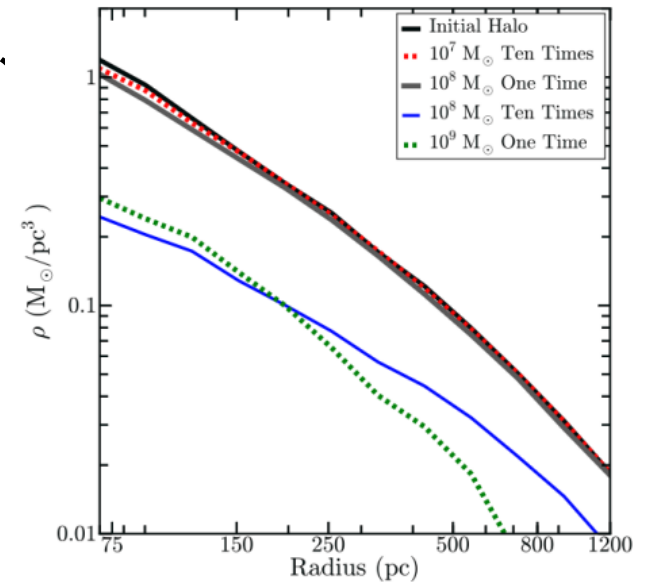
一方、先行研究Garrison-Kimmel et al. (2013) では、
周期が500Myrの周期的なSNフィードバックで
cusp-core遷移は起きないと結論づけた

何かおかしい!!

Ogiya and Mori (2014)を考慮すると、
彼らは振動周期が長いためにSNのエネルギーが
DMHの中心部に効率よく伝わっていないと思われる

目的

- ・Cusp-core遷移が実際に起こるか確認する
- ・密度分布の冪と振動周期との関係を見る
- ・フィードバックの形状が楕円体の場合を調べる



・本研究

独自開発したNested-PM法でN体計算

中心程メッシュ幅を小さくし、高解像度で計算コストを抑えた計算ができる

DMH: 重い矮小銀河

$$\text{Hernquist: } \rho = \frac{\rho_s r_s^3}{r(r_s + r)^3}$$

Hernquist (1990)

$$r_s = 2.2 \text{ kpc}$$

ρ_s : スケール密度

r_s : スケール半径

ガス

$$\text{ビリアル質量} = 2.28 \times 10^9 M_\odot$$

$$1.6 \times 10^7 \text{ 粒子}$$

最小メッシュ幅は17pc

$$\text{外場: } \mathbf{a}(\mathbf{r}) = \frac{-GM_b(t)}{((x^2 + y^2 + (z/\mathbf{c})^2)^{1/2} + r_b)^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

形状のパラメータ: \mathbf{c}

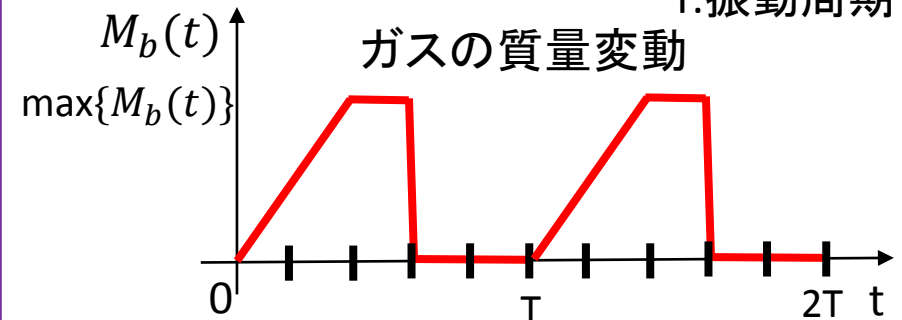
スケール半径: $r_b = 210 \text{ pc}$

$$\text{最大質量: } \max\{M_b(t)\} = 10^8 M_\odot$$

4×10^3 回SN/T (SNのエネルギーが全て
ガスの運動エネルギーになる)

10回振動させる

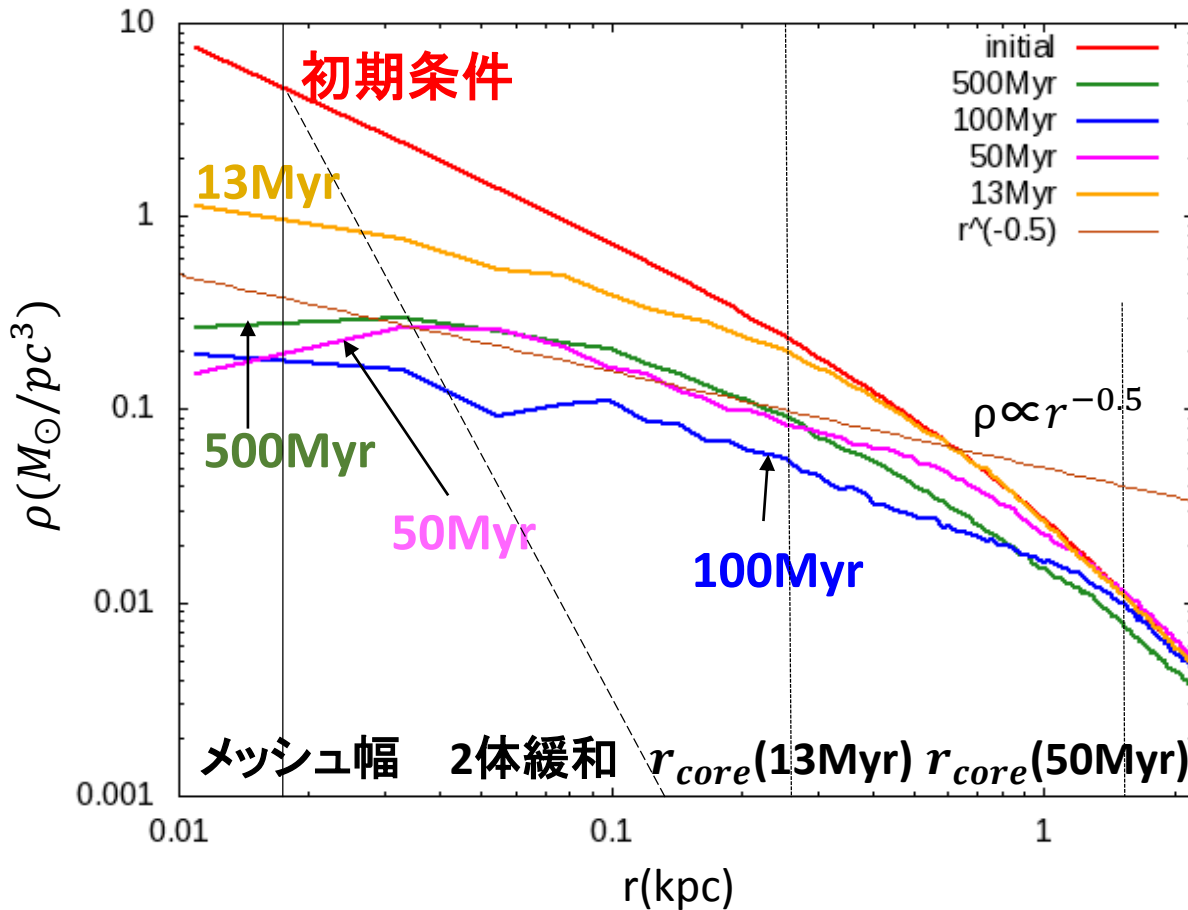
T: 振動周期



主にGarrison-Kimmel et al. (2013)で用いられた値を用いている

・球対称フィードバック($c=1$)

異なる振動周期で10回振動させた



・コア半径は概ね
振動周期に依存

Ogiya and Mori (2014)

・中心付近の密度分布の冪は
観測を再現し、
振動周期に依存しない



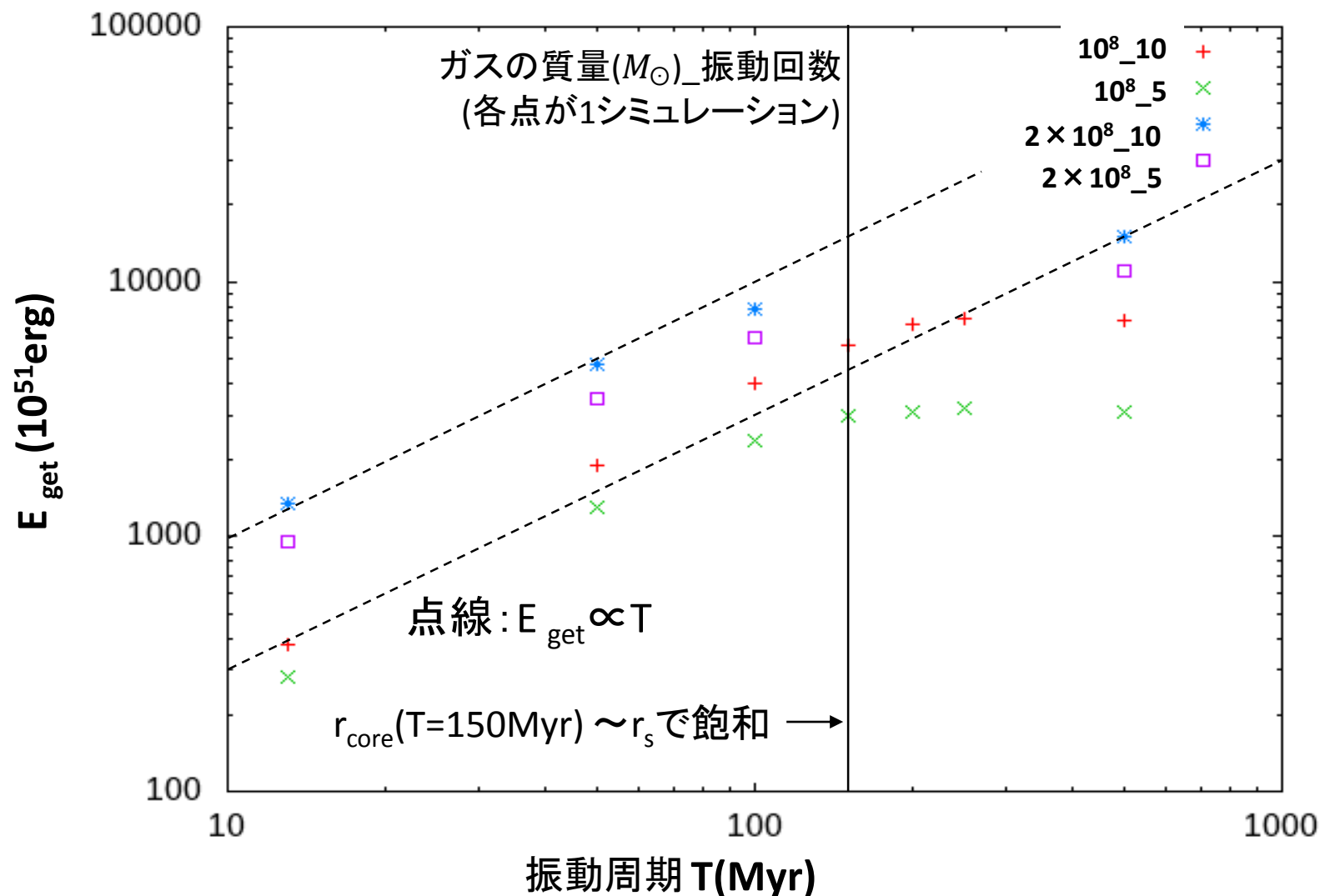
今後
振動周期、core半径、
エネルギー輸送率、
密度分布の冪のそれぞれの
関係性を調べる必要がある

周期的なSNフィードバックで cusp-core 遷移が発生することを確認

Garrison-Kimmel et al. (2013)は
粒子数が少なく2体緩和の影響を考え、中心まで見ていない($r > 0.08\text{kpc}$)
振動直後で力学的に平衡でない時を見ている
ことが原因でcuspが残っていた

・DMHが得たエネルギー

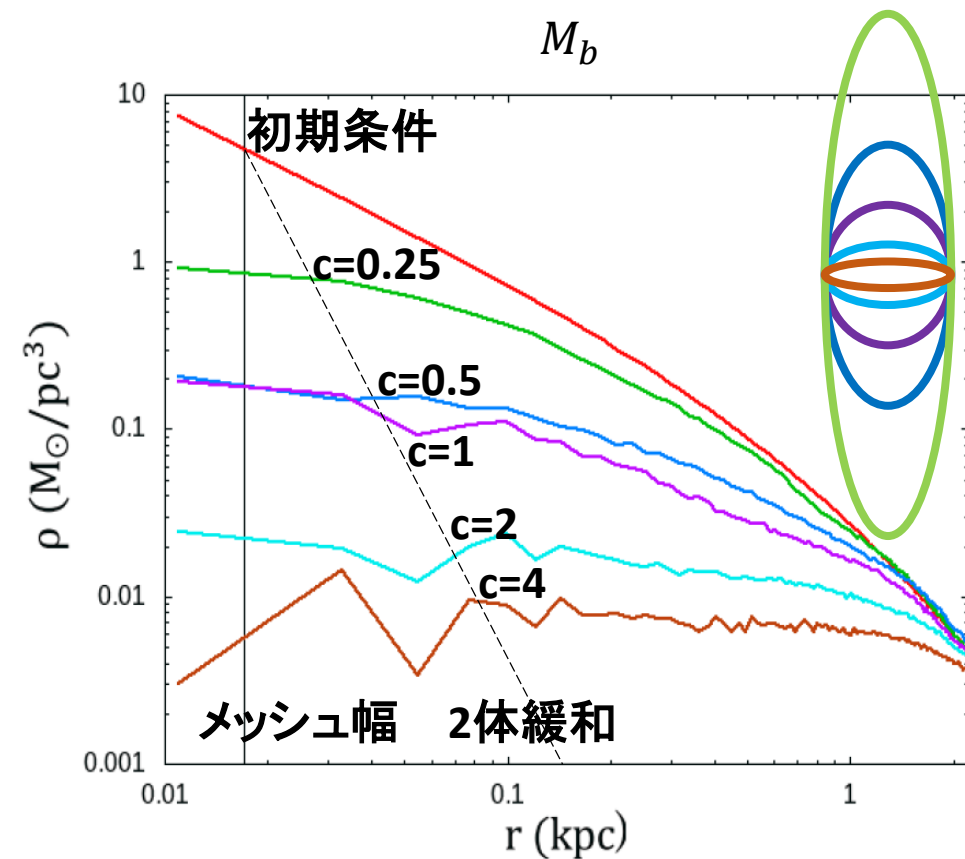
外場の強さと振動回数を変えて、DMHが得た力学的エネルギーを調べた



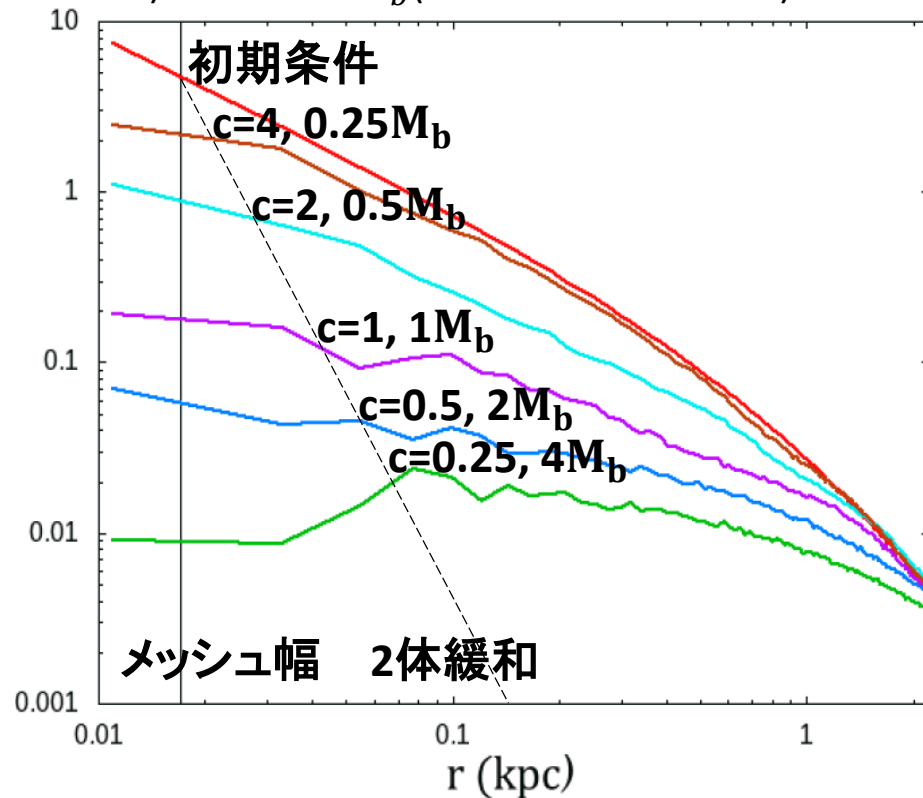
エネルギー輸送率は振動周期に依存

・楕円体のフィードバック(DMHは球対称)

$$T=100\text{Myr}, \max\{M_b(t)\} = 10^8 M_\odot \equiv M_b$$



z方向に伸ばした分、最大質量を増やした
ex)c=0.25 \rightarrow $4M_b$ (ガスの最大質量4倍)

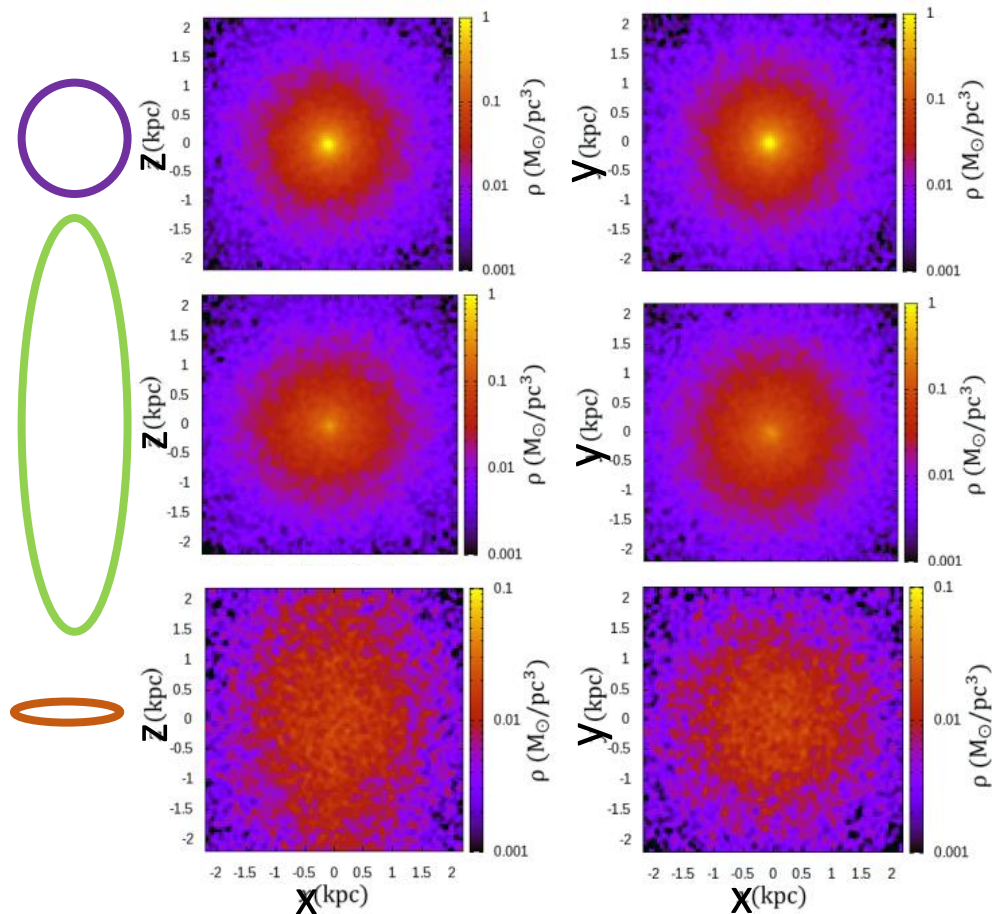


“core”のできる位置はほぼ変わらない

フィードバックがz方向に短いとDMHの密度分布の冪が小さくなる

フィードバックの形状と強さはDMHの密度分布に大きな影響を与える

・振動直後のz-x平面とy-x平面上の密度分布



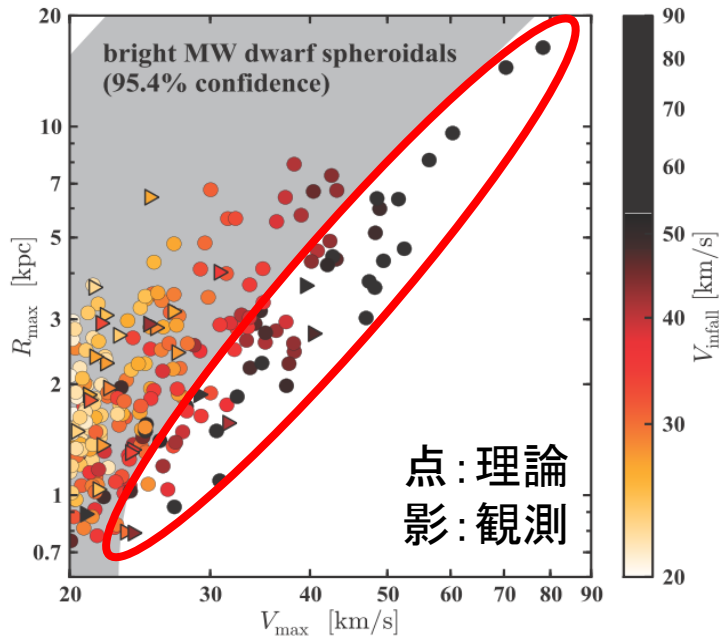
フィードバックがz方向に長いと
z方向のポテンシャル勾配が緩くなるので
DMHはx-y方向に膨張し、

フィードバックがz方向に短いと
z方向のポテンシャル勾配が緊くなるので
DMHはz方向に膨張する

・解析手法によるtoo-big-to-fail問題の研究

Too-big-to-fail問題

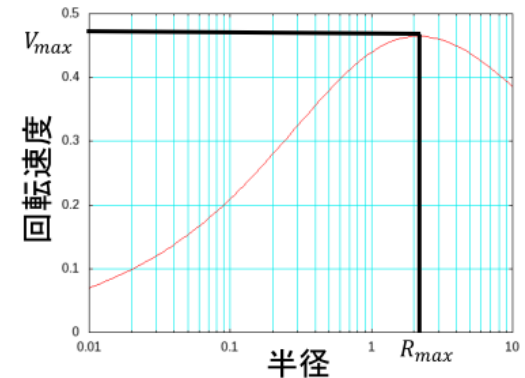
理論で予言される中心密度が
高いDMHが観測されていない



Boylan-Kolchin et al.(2011)

cusp構造(NFW分布)の V_{\max} - R_{\max}
(最高回転速度-その位置)関係

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{GM(R_{\max})}{R_{\max}}}$$



$$M(r) = 4\pi\rho_s r_s^3 \left[\ln\left(1 + \frac{r}{r_s}\right) - \frac{r/r_s}{1 + r/r_s} \right]$$

ρ_s :スケール密度
 r_s :スケール半径

Navarro et al.(1996)

$r_s \sim 0.46 R_{\max}$ で一意に決まるので、

ρ_s が分かれば良い

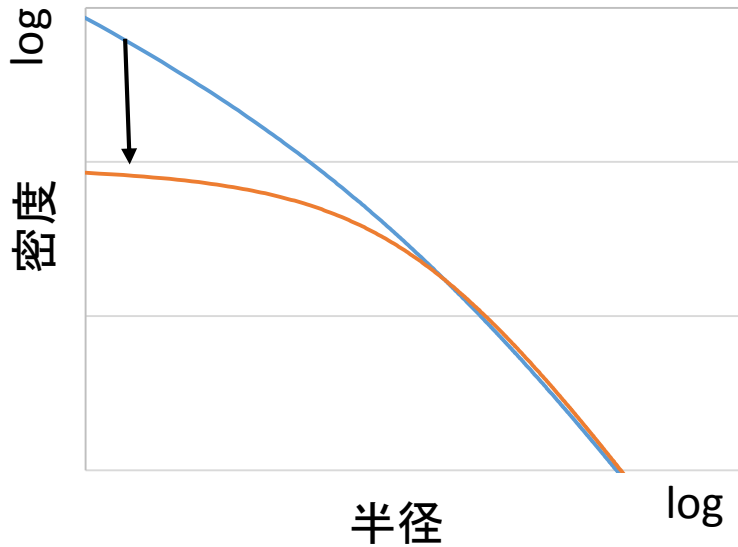
観測された $r_{1/2}$ (half-light-radius)と $M(r_{1/2})$ を
cusp構造(NFW分布)に用いて $\rho_s(r_s)$ を得る

・本研究

原始銀河のDMHはcusp構造だが、
バリオンのフィードバックによって
core構造に遷移した場合を考える

目的

Cusp-core遷移でtoo-big-to-fail問題が
解決できるか調べる



観測された $r_{1/2}$ と $M(r_{1/2})$ を
Core構造(Burkert分布)に用いて ρ_0 (r_0)を得る

$$M(r) = 4\pi\rho_0 r_0^3 \times \left[-\frac{1}{2} \text{Arctan}\left(\frac{r}{r_0}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{r}{r_0}\right) + \frac{1}{4} \ln\left(1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right) \right]$$

ρ_0 :スケール密度
 r_0 :スケール半径
Burkert (1995)

cusp-core遷移モデル

$$\rho_s \sim \rho_0, \quad r_0 \sim r_s \quad \text{Ogiya et al. (2014)}$$

$$\rho_s = \rho_0(r_s)$$

cusp構造(NFW分布)の V_{max} - R_{max} 関係

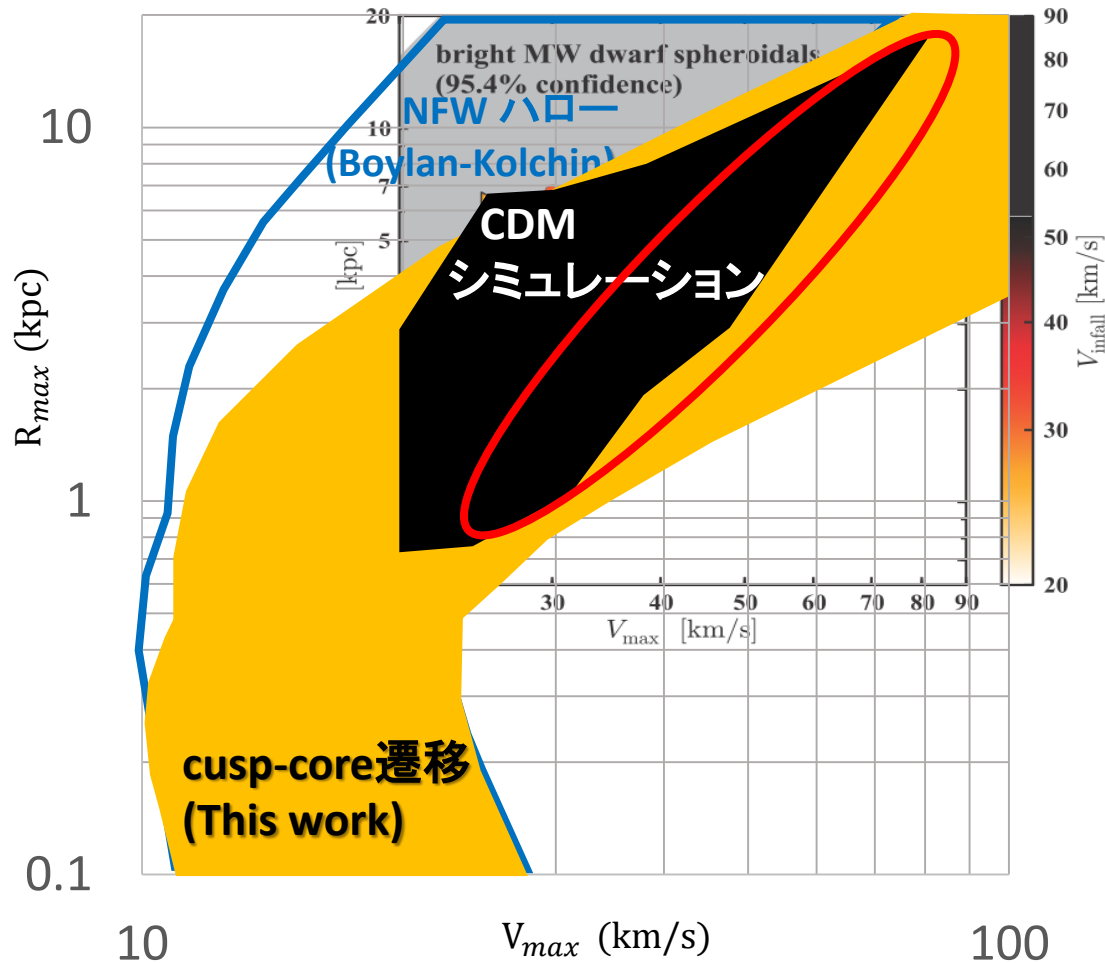
$$V_{max} = \sqrt{\frac{GM(R_{max})}{R_{max}}}$$

$$M(r) = 4\pi\rho_s r_s^3 \left[\ln\left(1 + \frac{r}{r_s}\right) - \frac{r/r_s}{1 + r/r_s} \right]$$

$$r_s \sim 0.46 R_{max}$$

・解析結果

Boylan-Kolchin et al.(2011)



cuspcore遷移を考慮することで
CDMシミュレーションとの
矛盾がなくなった



cuspcore遷移とTBTF問題が
密接に関係し共に解決できる
ことを示唆

・まとめ

・数値計算

周期的なSNフィードバックでcusp-core遷移が起き、
観測されている密度分布の冪を再現

冪は振動周期に依らない

フィードバックの形状と強さはDMHの密度分布に大きな影響

・解析手法

cusp-core遷移が起こるとtoo-big-to-fail問題が解決できることが示唆

**Cusp-core 問題と too-big-to-fail 問題は
共にDMHの中心密度分布に関する問題であり、
SN フィードバックがこれらの問題を同時に解く鍵である**