

「京」コンピュータによる 暗黒物質の位相空間分布に 関する研究

「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」
公募研究 15H01030 2015/4-2017/3

石山 智明

千葉大学統合情報センター (2015/3 から)

筑波大学計算科学研究センター 神戸分室 (2015/2 まで)

ダークマターハロー

(画像: シミュレーションから得られた銀河スケールのハロー)

対消滅フラックス \propto 密度²

太陽系を通過するフラックス \propto 密度

直接検出のシグナル \Leftrightarrow 速度分布

ハローの構造は宇宙論的シミュレーションで調べるしかない !!!

ダークマターハローの構造

Diemand and Moore 2011,
Taylor 2011 の review など

- **カusp構造**

- Core-cusp 問題

- **無数のサブハロー**

- 矮小銀河問題

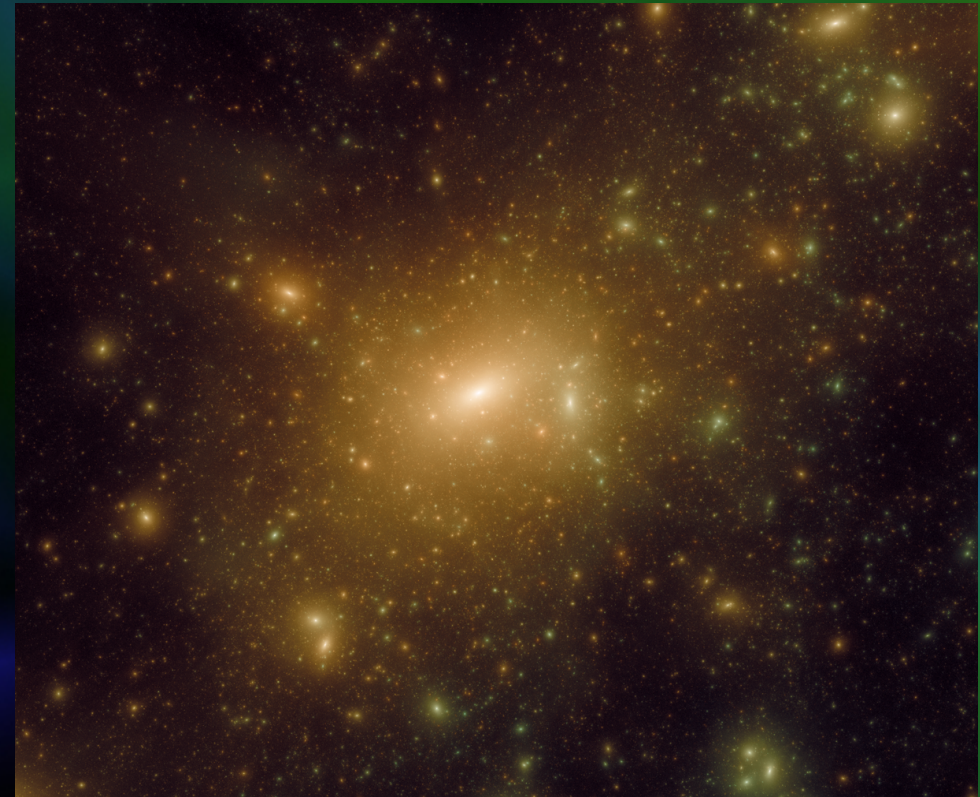
- $dn/dm \sim m^{-(1.9-2)}$

- **3 軸不等**

- **Non Universality**

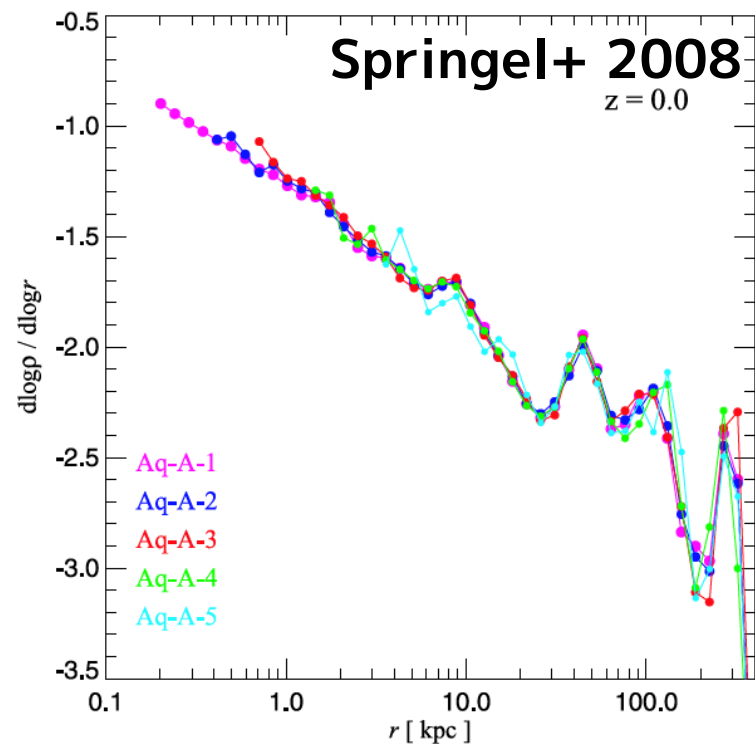
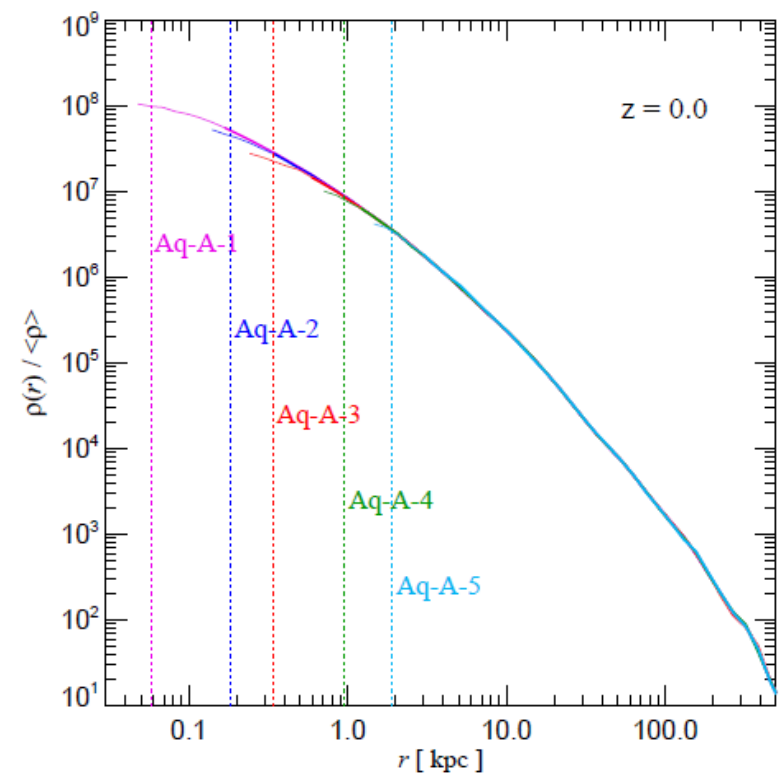
- ハロー質量への弱い依存性

- halo to halo variation (主に formation epoch 起源)



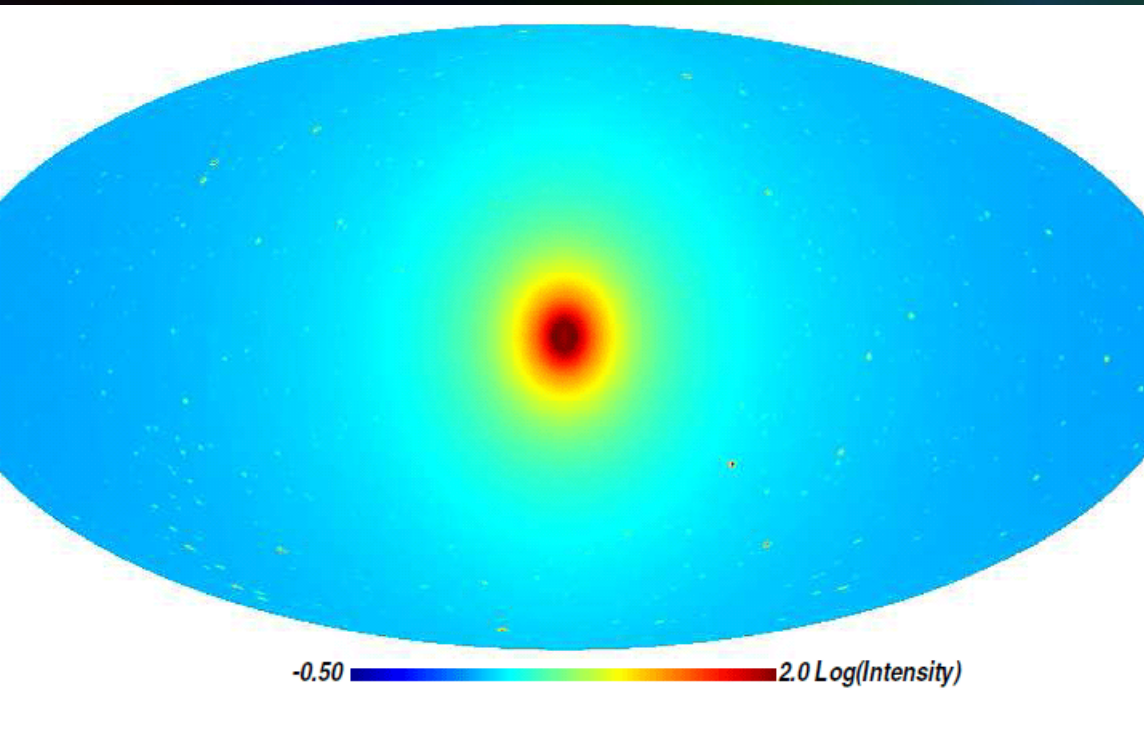
密度プロファイル

- 右： 銀河サイズのアークの密度プロファイル
- 2015 年時点での最高分解能クラスの計算 (1 アークあたり 10 億粒子)
- 密度プロファイルの冪はいかなる値にも収束しない
- 物理的メカニズムは不明
- **これまでの研究は、主に銀河スケールアークの構造に注目**



対消滅シグナル

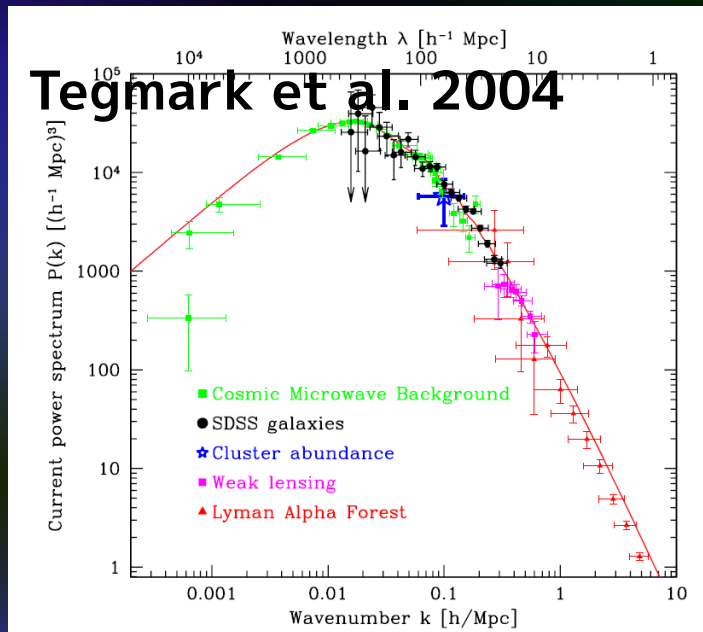
Springel+ 2008, Nature



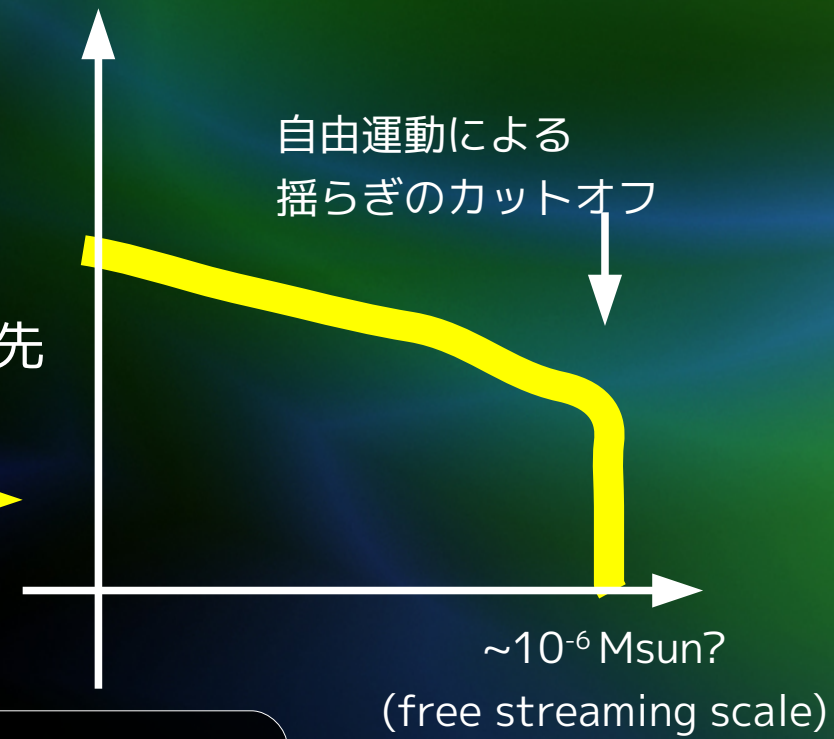
- $10^6 \sim 10^{12}$ 太陽質量のサブハローを分解
- トップダウン的に最小スケール ($\sim 10^{-6}$ 太陽質量) まで外挿
- シミュレーションでは分解できていない全サブハローに NFW を仮定
- 銀河中心の対消滅が一番観測しやすい

全て NFW で良いのか？

- ダークマター粒子の自由運動による密度揺らぎ減衰が最小のハロースケールを決める
 - CDM: 10^{-6} Msun (100GeV WIMP) (e.g. Zybin+ 1999, Berezhinsky+ 2003)
 - WDM: 10^{6-9} Msun



質量で 20 桁ほど先の
スケール



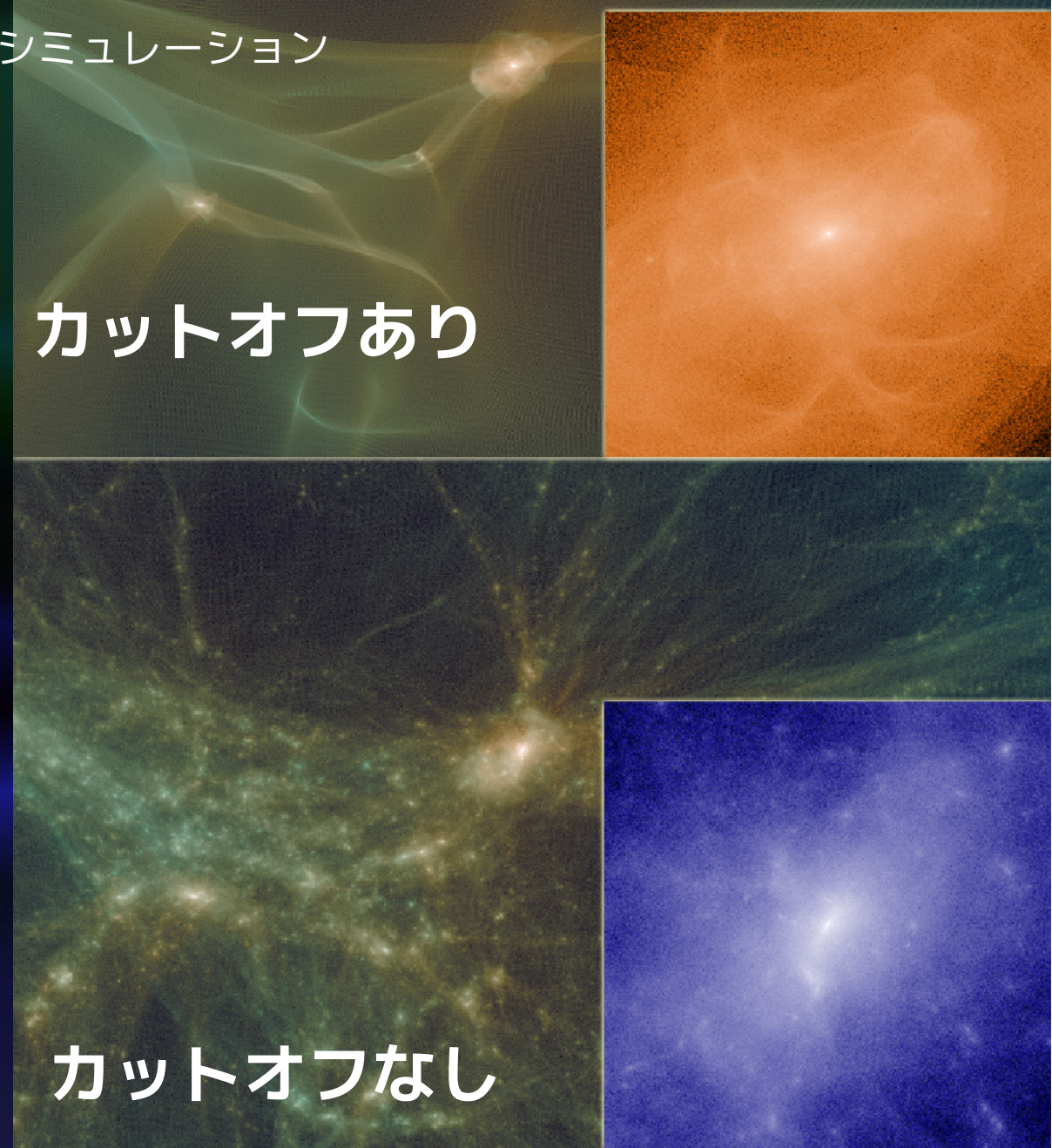
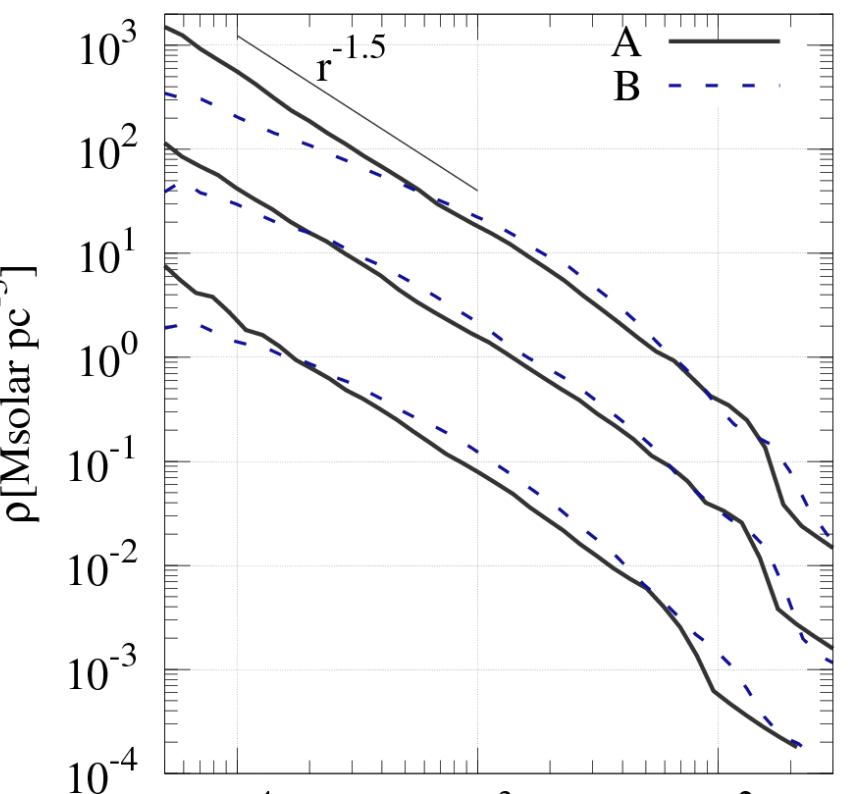
パワースペクトルの形が異なるので、
構造が大スケールと同じとは限らない

最小ハローの構造

- 最小ハローだけの高分解能宇宙論的シミュレーション
 - 粒子数 1024^3
- カットオフがある場合のほうが、中心密度が高いハローができる
 - サブハローなし

カットオフあり

カットオフなし



より大規模なシミュレーションへ

- スパコンの大型化

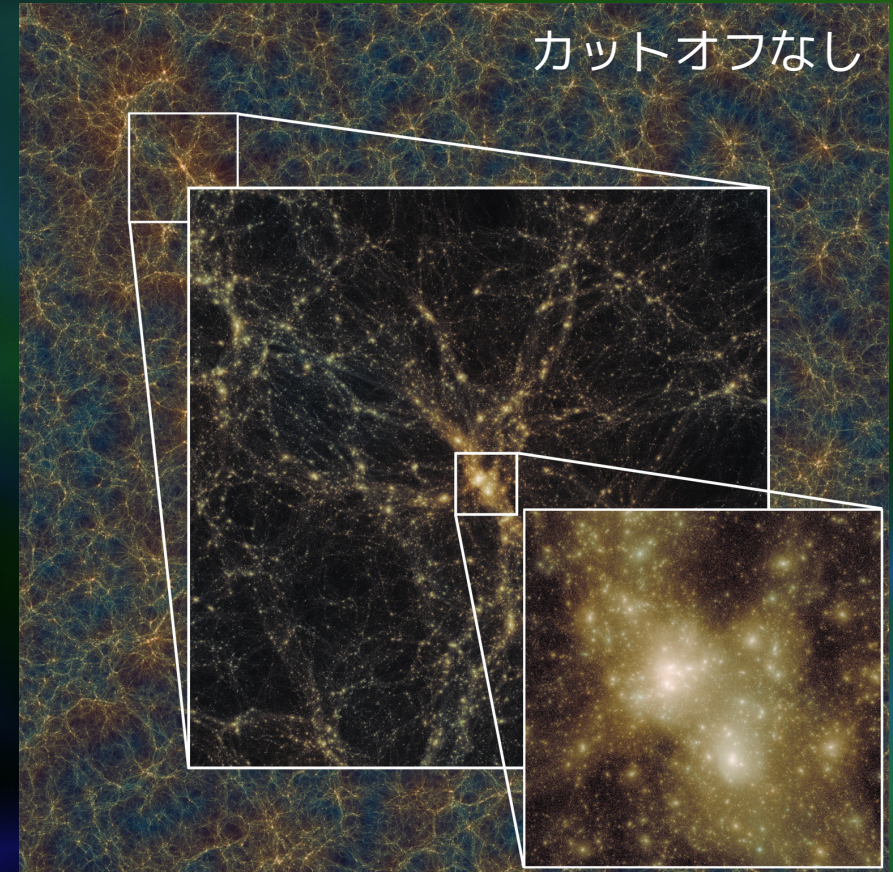
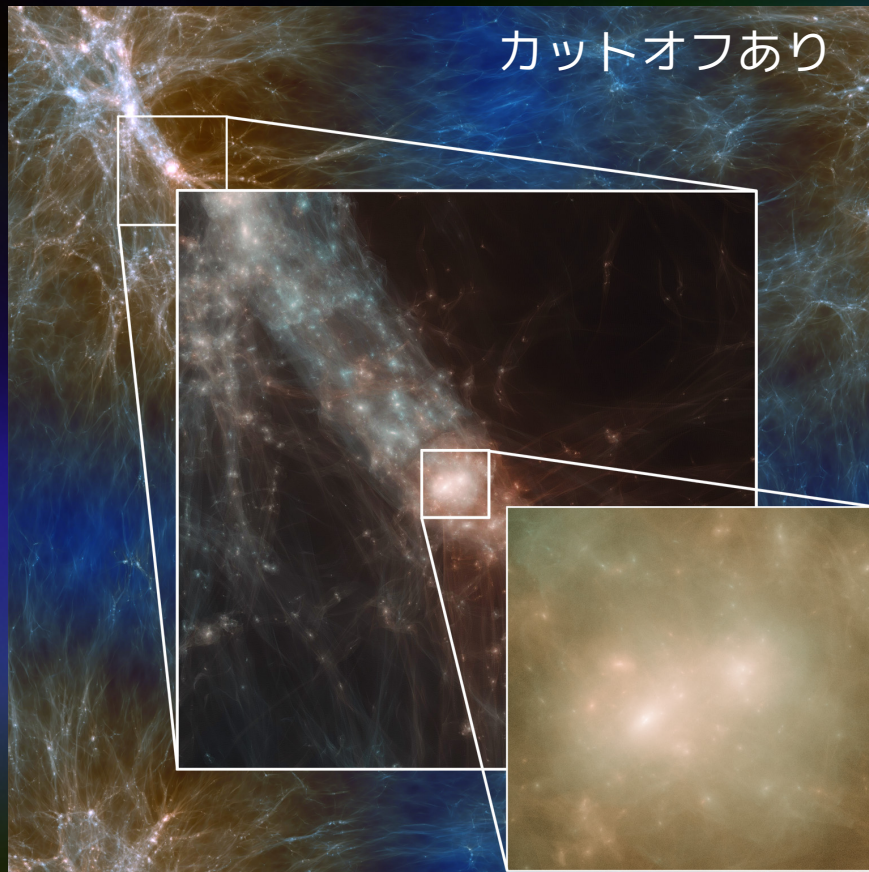


- 大規模スパコン上で効率良くシミュレーションできるコードの開発
 - GreeM TreePM N-body code (Ishiyama+ 2009, 2012)

⇒ 数百億粒子以上の宇宙論的シミュレーションが可能に
(他の国ではビッグプロジェクト)

Name	N	$L(\text{pc})$	$\epsilon(\text{pc})$	$m(M_{\odot})$	$m_{\text{DM}}(\text{GeV})$
A_N4096L400	4096^3	400.0	2.0×10^{-4}	3.4×10^{-11}	100
A_N4096L200	4096^3	200.0	1.0×10^{-4}	4.3×10^{-12}	100
B_N2048L200	2048^3	200.0	2.0×10^{-4}	3.4×10^{-11}	w/o cutoff

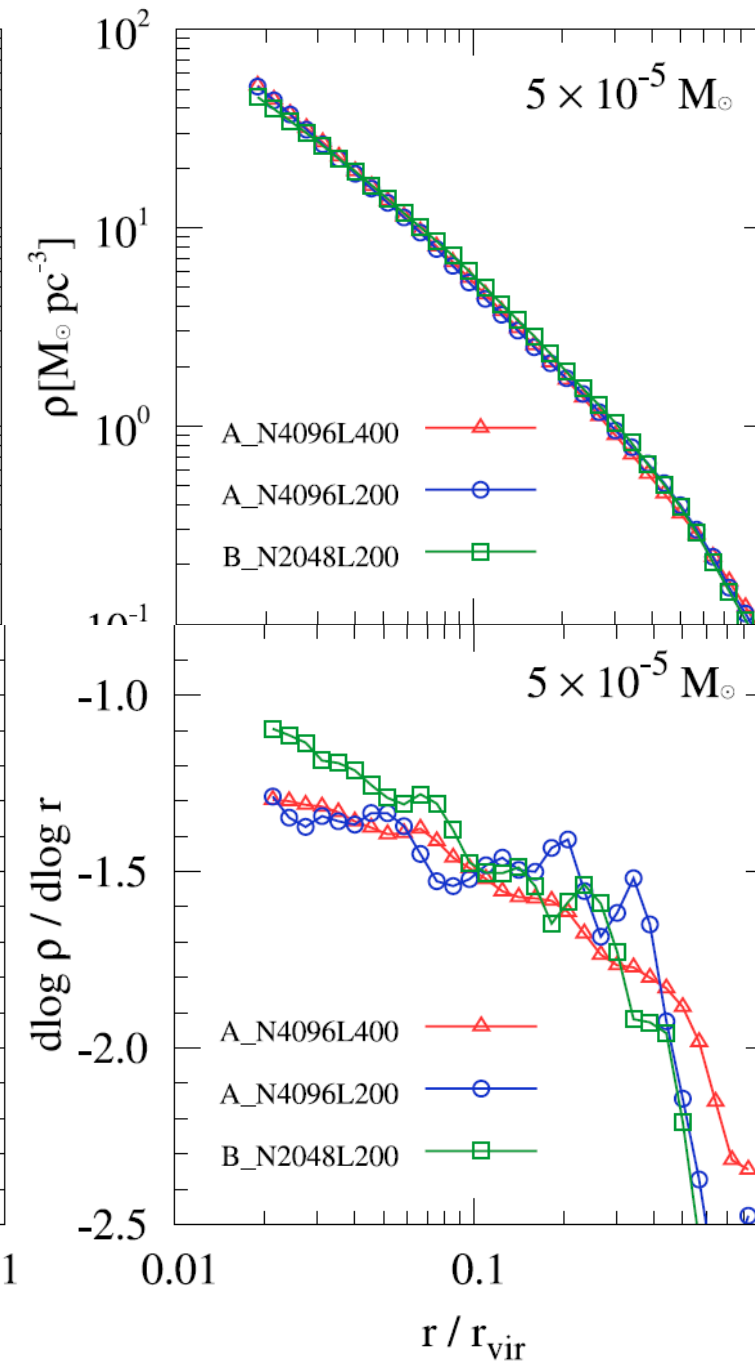
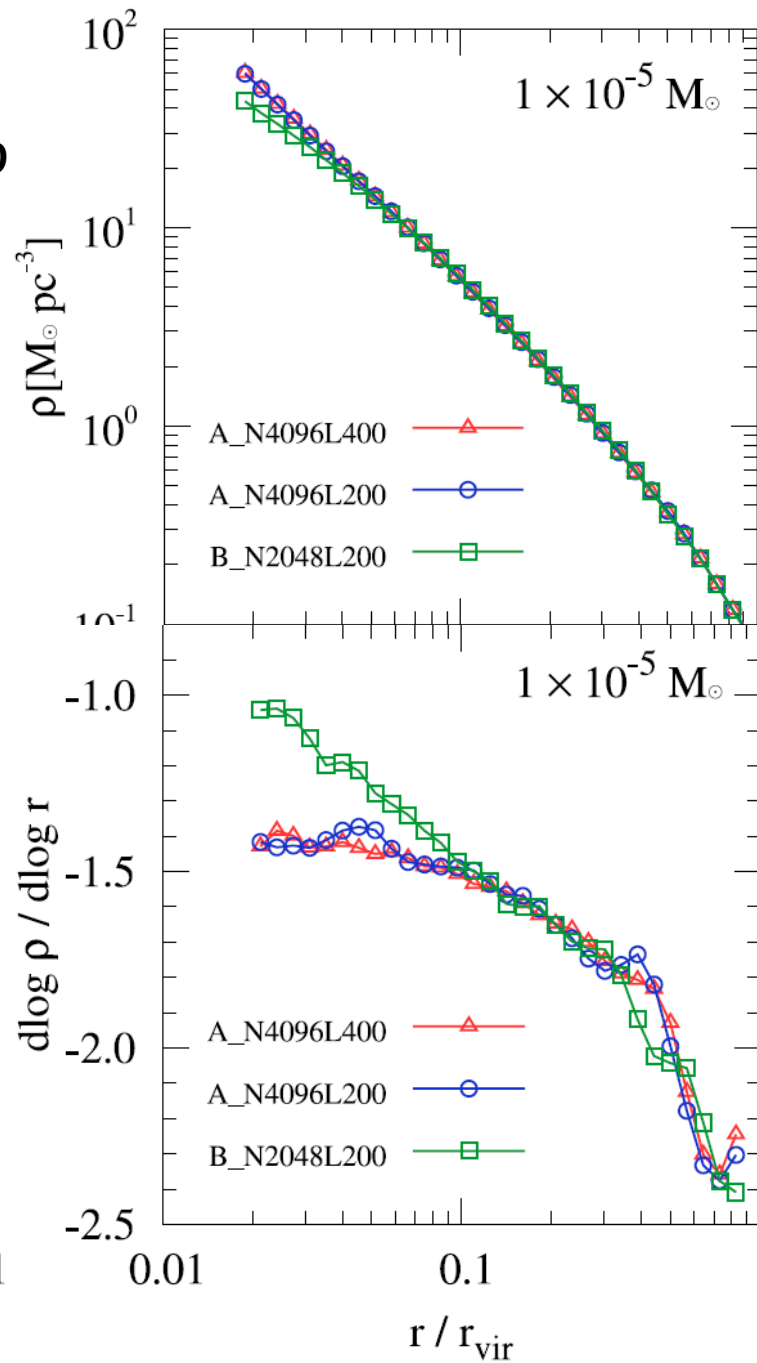
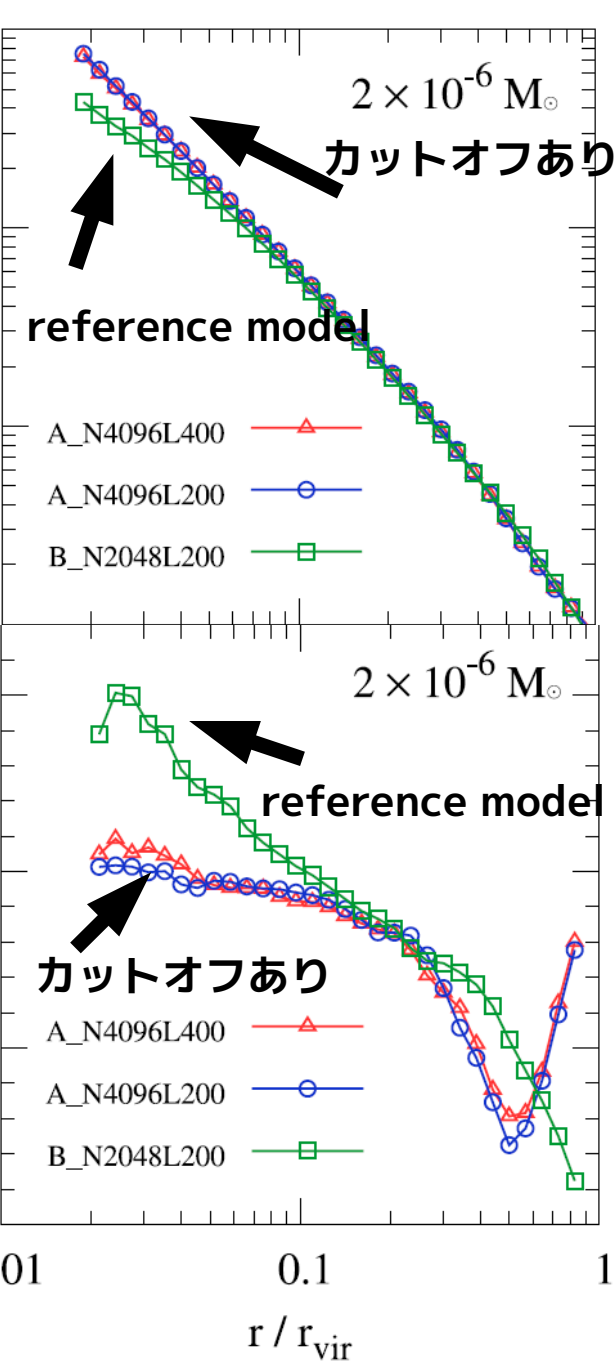
スナップショット



- Ishiyama 2014, ApJ, 788, 27
- $N = 4096^3 = 68,719,476,736$
- $L = 400 \text{ pc}$
- $m_p = 3.4 \times 10^{-11} \text{ Msun}$
- $z=32$

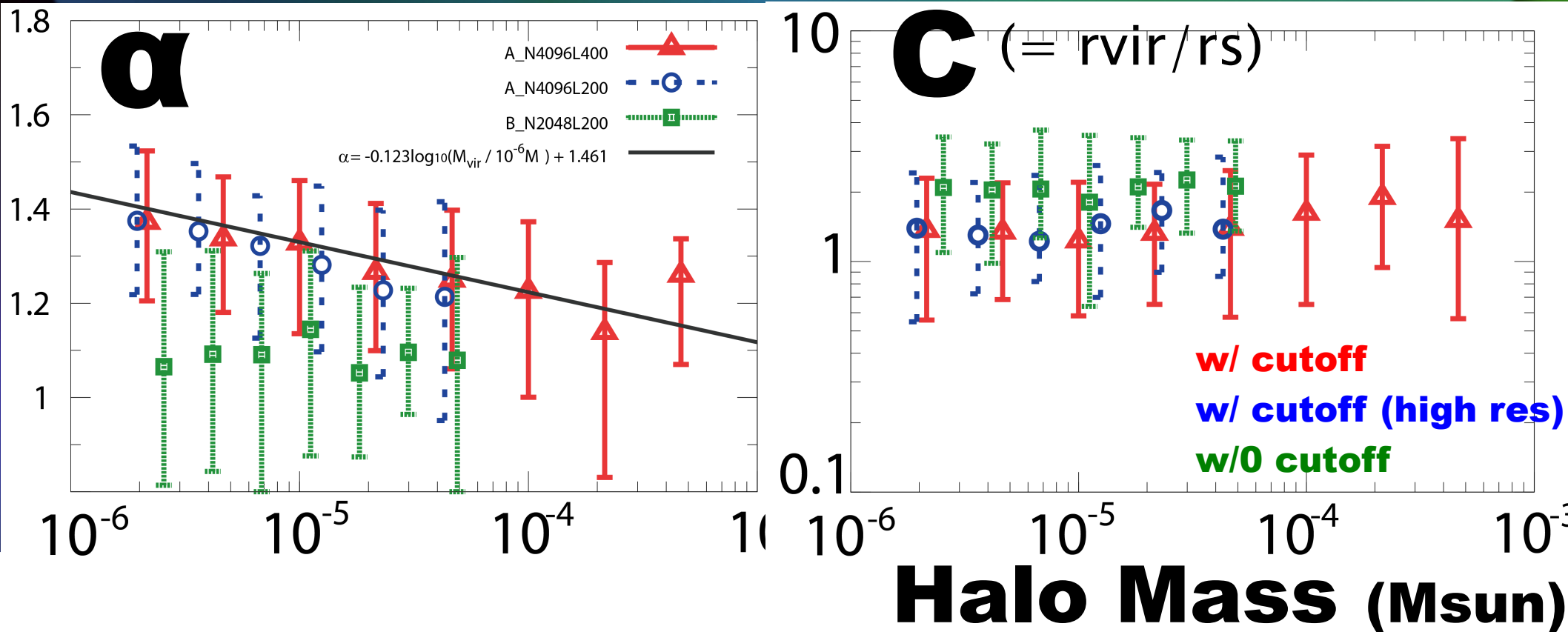
- Ishiyama+ 2015, PASJ in press
- $N = 8192^3 = 549,755,813,888$
- $L = 1.12 \text{ Gpc}/h$
- $m_p = 2.2 \times 10^8 \text{ Msun}$
- $z=0$

密度プロファイル (各質量毎にスタック)



Shape, concentration (z=32)

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)^\alpha (1 + r/r_s)^{(3-\alpha)}}$$



- ハロー質量大 \rightarrow カスプはゆるく $\alpha = -0.123 \log(M_{\text{vir}}/10^{-6} M_\odot) + 1.461$
- $10^{-3} \sim 10^{-2} M_{\text{sun}}$ 程度で NFW に到達か？
- コンセントレーションのハロー質量依存性はほとんどなさそう ($c=1.2 \sim 1.7$)
- ハロー形成時刻が質量にあまり依存しないことを反映 (小スケールでは $P(k) \propto k^{-3}$)

Annihilation boost factor by subhalos

- ひとつのハローを、遠方から見た場合の対消滅ブーストファクター

NFW case (green)

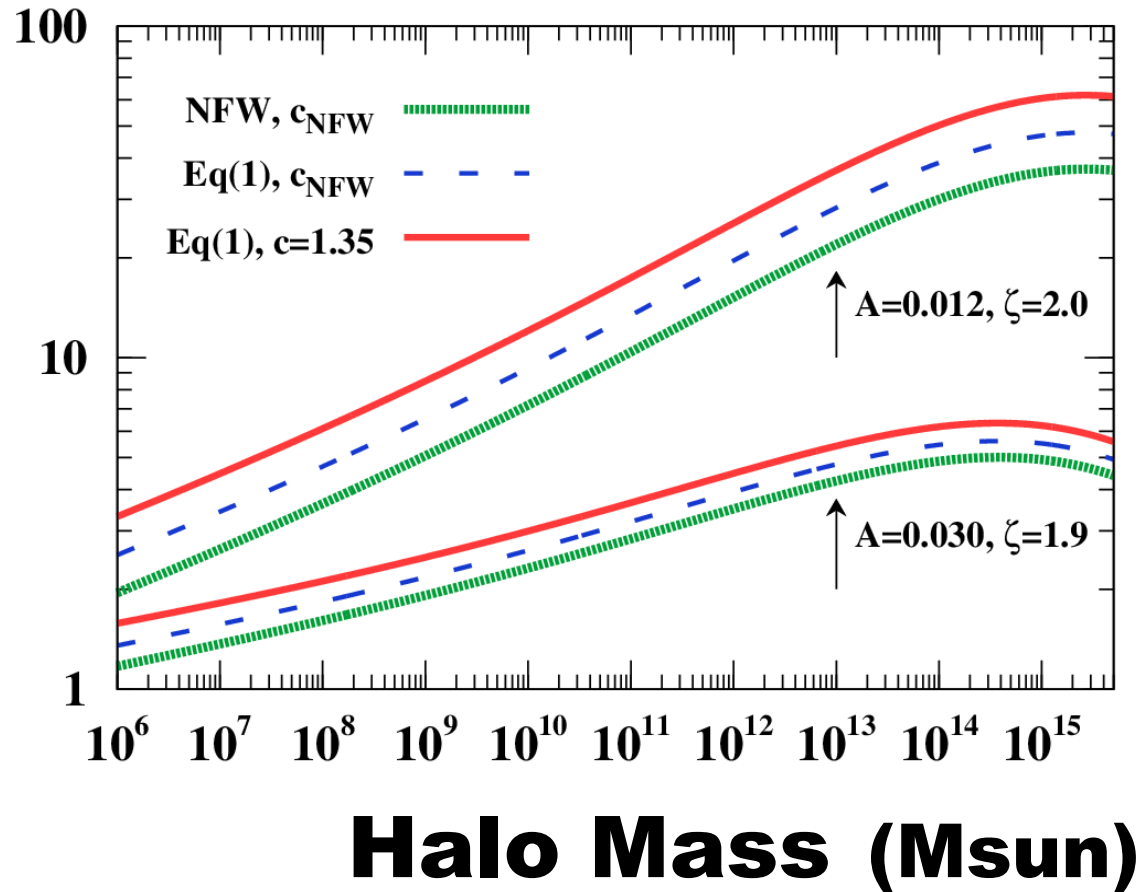
Based on this work

(Red and blue)

- The steeper inner cusps of halos near the free streaming scale enhance the annihilation luminosity of a Milky Way sized halo between **12** to **67%**

- Strongly depending on the subhalo mass function

Boost factor

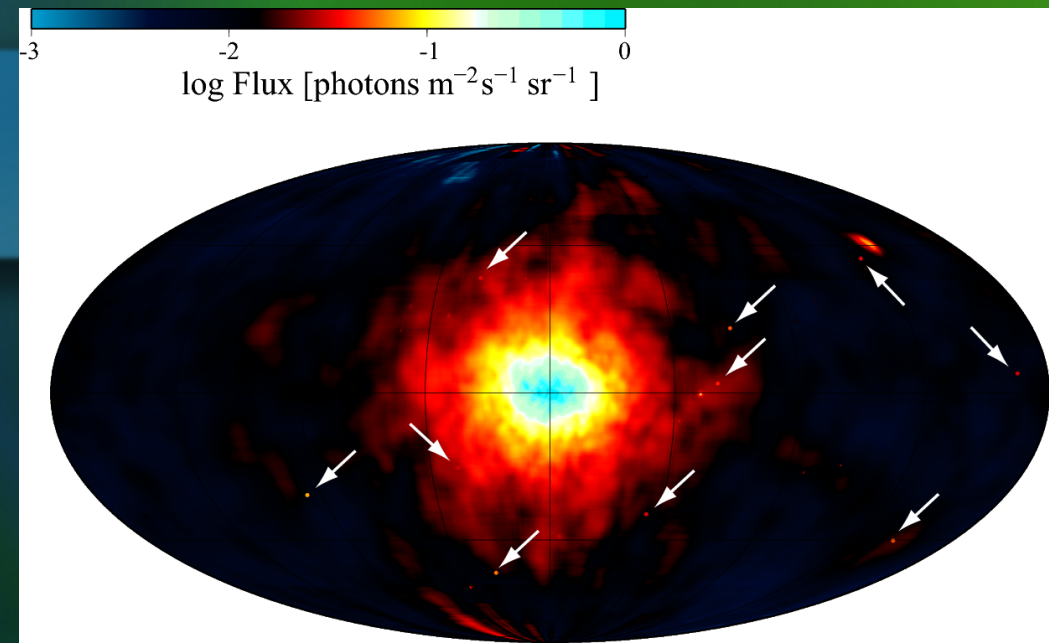


$$B(M) = \frac{1}{L(M)} \int_{M_{\min}}^M \frac{dn}{dm} [1 + B(m)] L(m) dm$$

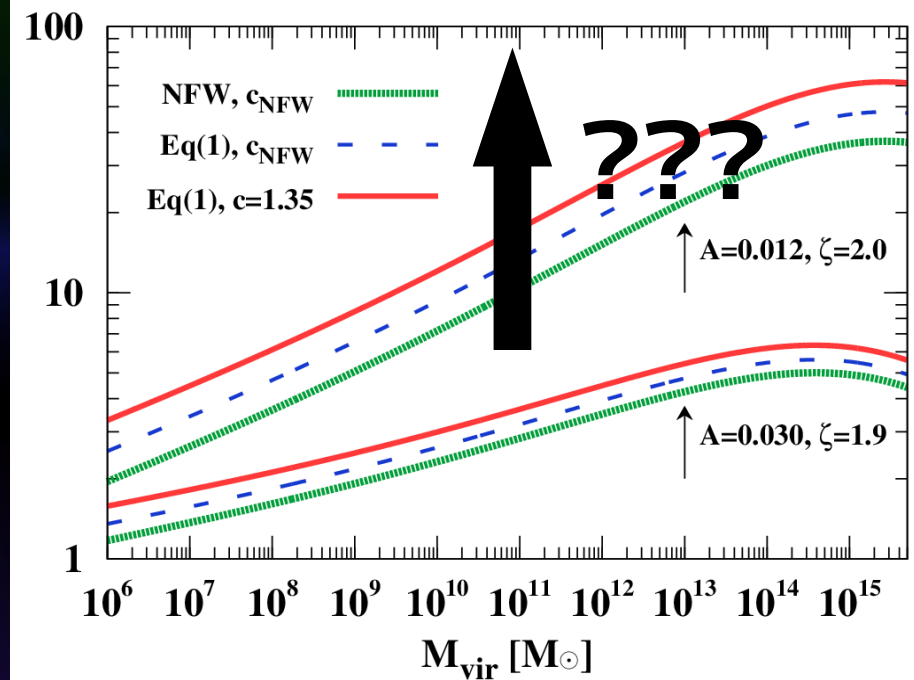
$$dn/dm = A/M(m/M)^{-\zeta}$$

今後の研究

- 小スケールハローの構造は明らかになったが、サブハローとしての空間分布はどうか？
 - 太陽系近傍のダークマター微細構造を決定する
 - 直接・間接検出実験
- 従来は power law を仮定
 - $dn/dm \sim m^{-(1.9-2)}$
- カस्पが急 → より多く生き残る → power law からのずれ？

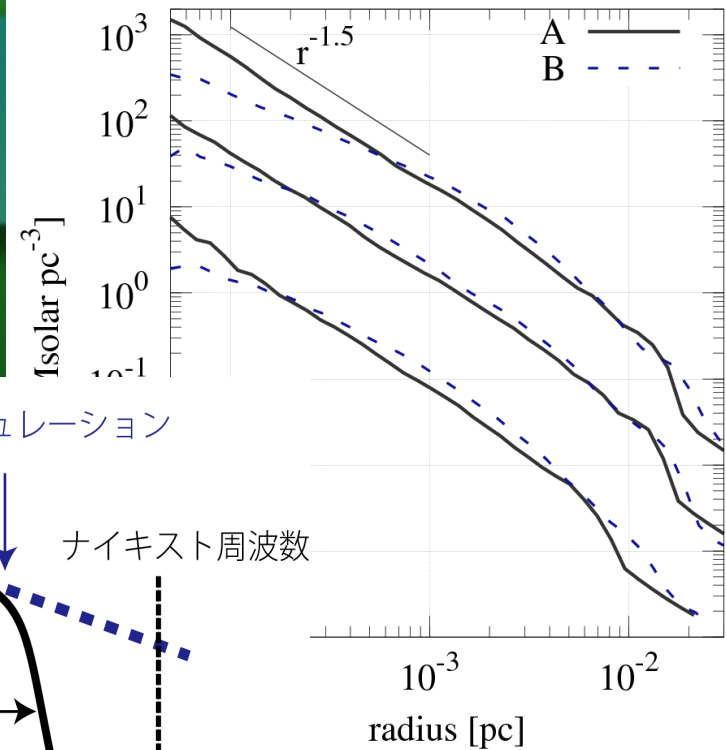
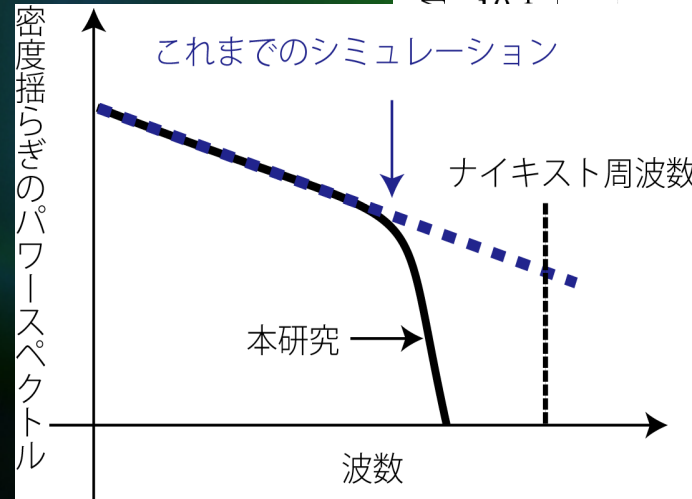


↑ Ishiyama+, 2010, ApJL
 ↓ Ishiyama, 2014, ApJ



何が大変か？

- カットオフ有無で違うのは、極内側のプロファイル
 - 高い空間分解能
- カットオフを正しく分解
 - 高い質量分解能



従来の宇宙論 N 体と比べて、大きい構造を作るのが大変なシミュレーション
(2048³ 粒子で、50x カットオフ質量)
→ **とにかく粒子数を増やすしかない**
2015 年度中に 8192³ 粒子で計算 on 京



まとめ

- カットオフ質量付近のハローの構造は大スケールとは異なり、中心カスプが急になる
 - 太陽系近傍のダークマター微細構造を決定しえる
- 今後は京コンピュータを用いて、より大規模なシミュレーションを行い、太陽系近傍のダークマター微細構造を明らかにする
 - 小スケール側の subhalo mass function
 - 小スケールと銀河スケールを接続するモデルの作成
 - 太陽系近傍の暗黒物質位相空間分布の定量化