

高精度・高分解能  
シミュレーションを用いた  
銀河の形成・進化史の探求

jh190057-NAJ

三木洋平（東京大学・情報基盤センター）

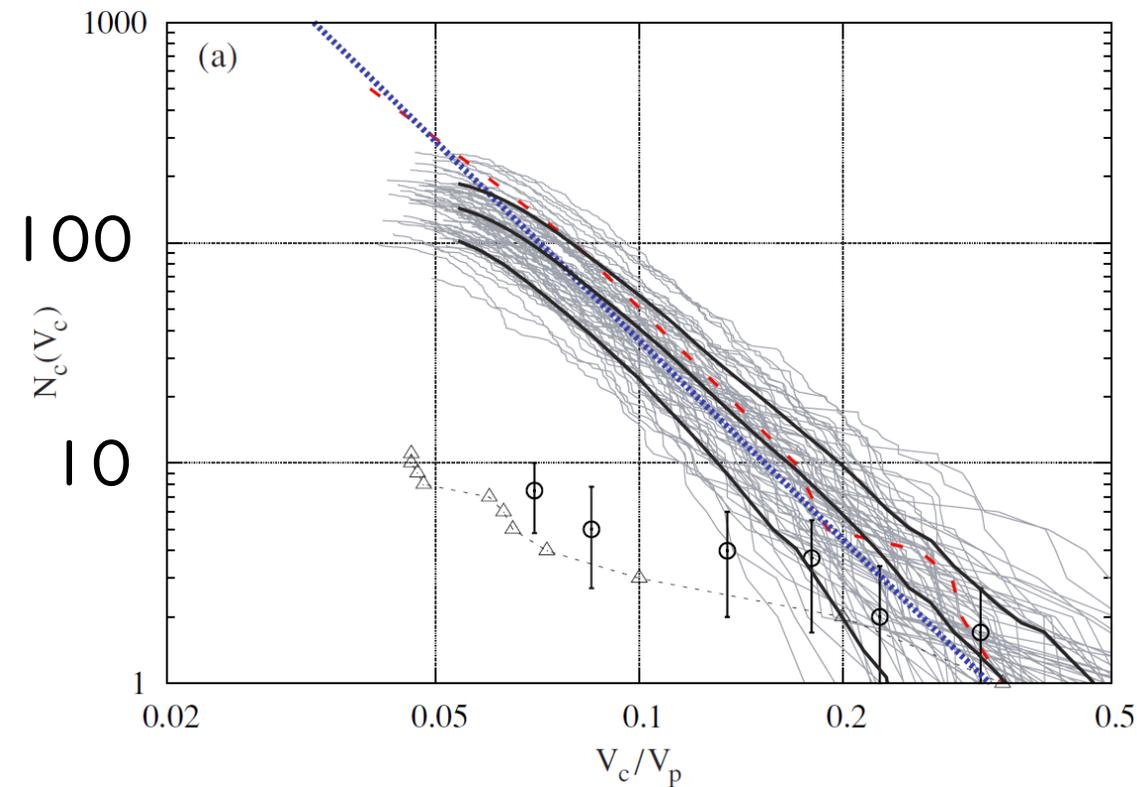
# 概要

- 近年の観測機器の高性能化に伴い，従来観測では検出できなかったような非常に暗い構造が多数発見され，今までよりも10倍以上質量分解能の高いシミュレーションを遂行する必要性が生じてきた
  - 本課題では，こうした高精度・高分解能シミュレーションを遂行可能なコードを開発し，宇宙物理学の研究に適用していく
- アンドロメダ銀河北西領域のストリーム構造とダークマターサブハローの衝突実験を行った
  - $10^9 M_{\odot}$  程度以上のサブハローとの衝突痕跡がすばる望遠鏡に搭載予定の超広視野分光器 PFS を用いて検出可能であることが分かった
- 低質量矮小銀河において，始原ブラックホールによる2体緩和がカスプ・コア遷移を引き起こす可能性を示した
- 運動量・角運動量を保存できる軌道積分法である hierarchical Hamiltonian Splitting 法の高次精度化に成功した

# Missing satellite problem (衛星銀河問題)

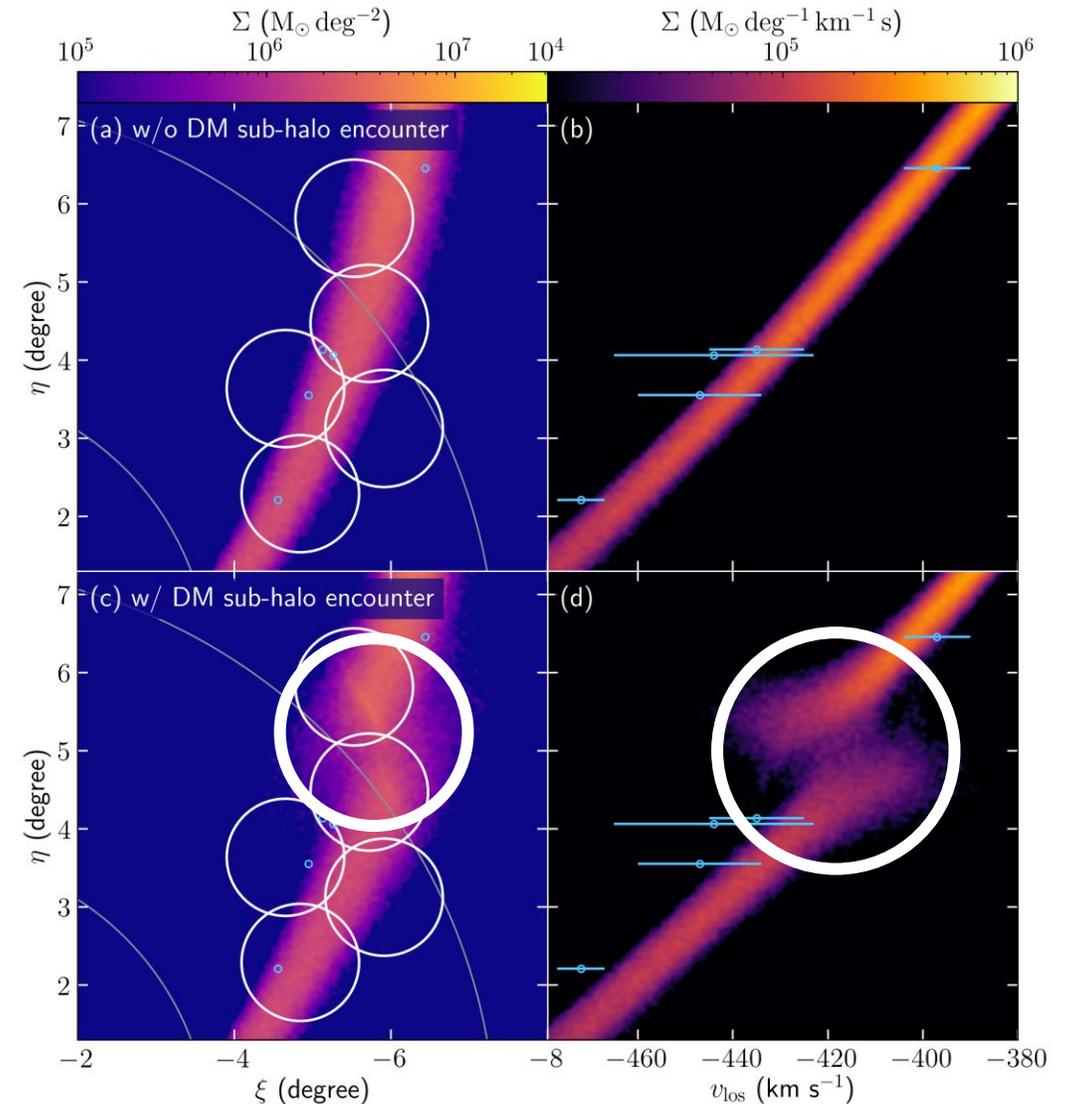
- 宇宙論的N体計算は，ダークマター (DM) サブハローを作りすぎる (Moore et al. 1999)
  - サブハローの数:  $O(100)$
  - 衛星銀河の数:  $O(10)$
- 問題点: 見えないDMサブハローの数と見える衛星銀河の数を比較
  - DMサブハローの数を，観測的に評価できないか？

Ishiyama et al. (2009)



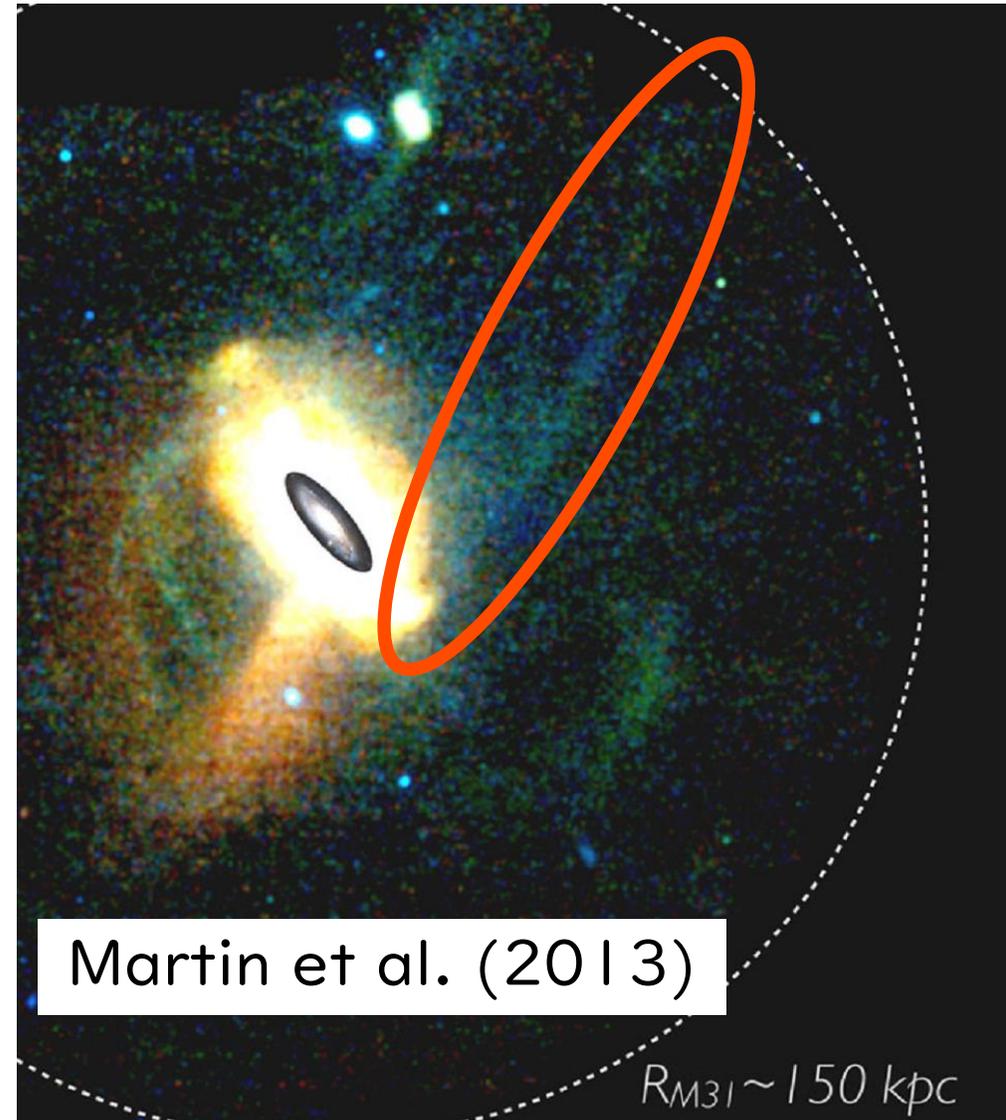
# DMサブハロー数の評価手法

- 恒星ストリーム近傍をDMサブハローが通過すれば、近接遭遇の痕跡（ギャップ）が残る (Carlberg 2012)
- ギャップの数を用いることで、DMサブハローの数が見積もれる
- → DMサブハロー数の観測的な評価

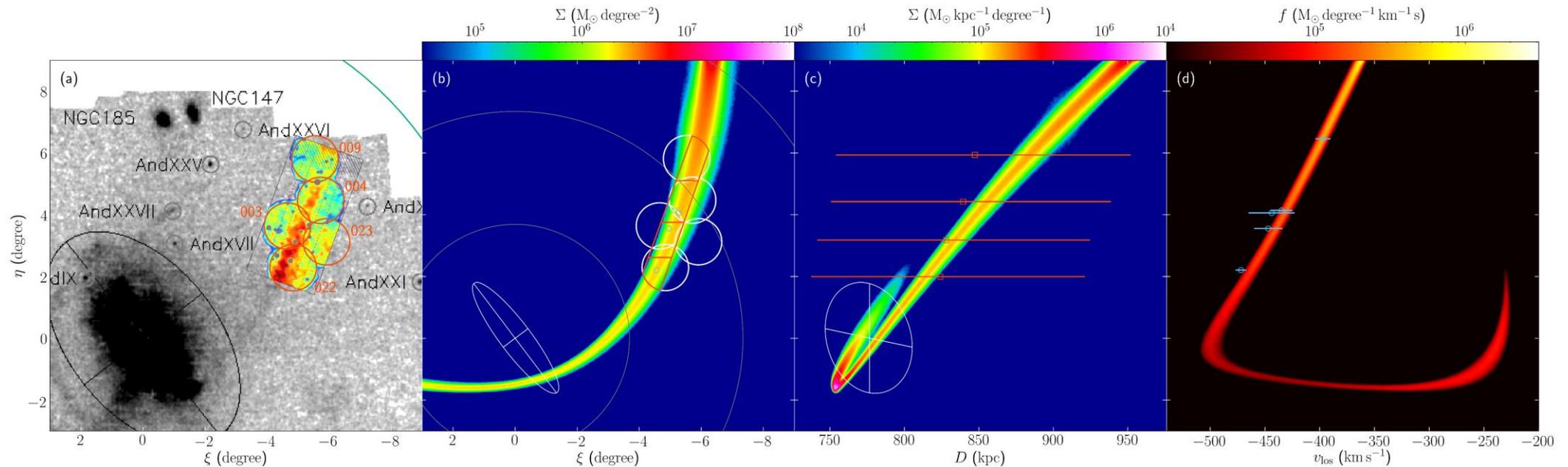


# North-Western (NW) ストリーム

- PAndAS プロジェクトによって新たに見つかった構造 (McConnachie+09; Richardson+11)
- M31 北西方向に 100 kpc 以上伸びている
- M31 ハロー内でも特に細い構造
- M31 本体よりも奥側に分布 (Komiyama+18)
- NW ストリームに沿って球状星団が分布 (Veljanoski+14)
- HSC 観測によって面密度分布にギャップ状構造を検出 (Komiyama+18)
  - ストリームの端という可能性もある



# N体計算による再現結果



- PAndAS (Richardson+11, McConnachie+18), Subaru/HSC (Komiyama+18)による観測結果を概ね再現
- NWストリームに沿って分布する球状星団の視線速度分布 (Veljanoski+14) をトレース

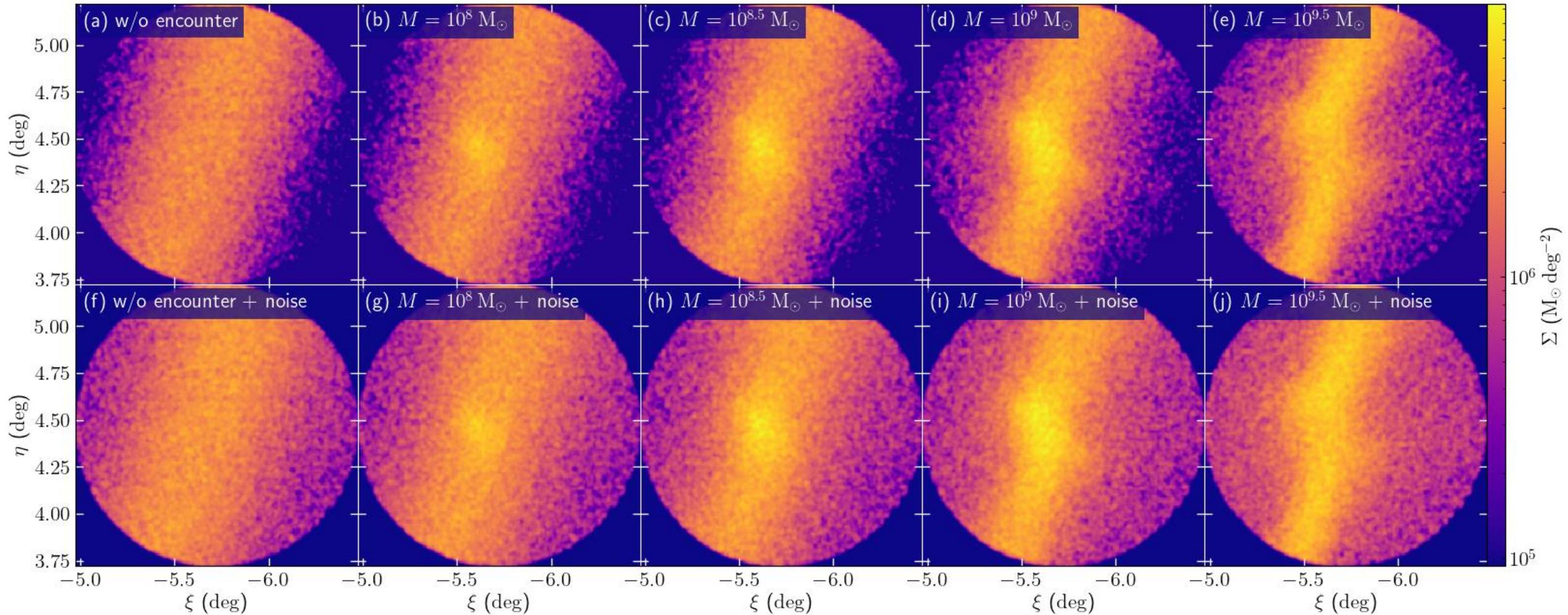
# NWストリームとDMサブハロー (テスト粒子) の相互作用

- NWストリーム progenitor
  - Plummer sphere ( $M = 5 \times 10^7 M_{\odot}, N = 2^{20}$ )
- DMサブハロー
  - $M = 10^7, 10^{7.5}, 10^8, 10^{8.5}, 10^9, 10^{9.5} M_{\odot}$
  - NWストリームに円軌道で衝突するように投入
- コード
  - MAGI (YM & Umemura 2018)
  - GOTHIC (YM & Umemura 2017, YM 2019)
- 計算機
  - Reedbush-L (Tesla P100) @東大ITC
  - TSUBAME3.0 (Tesla P100) @東工大GSIC
  - Cygnus (Tesla V100) @筑波大CCS



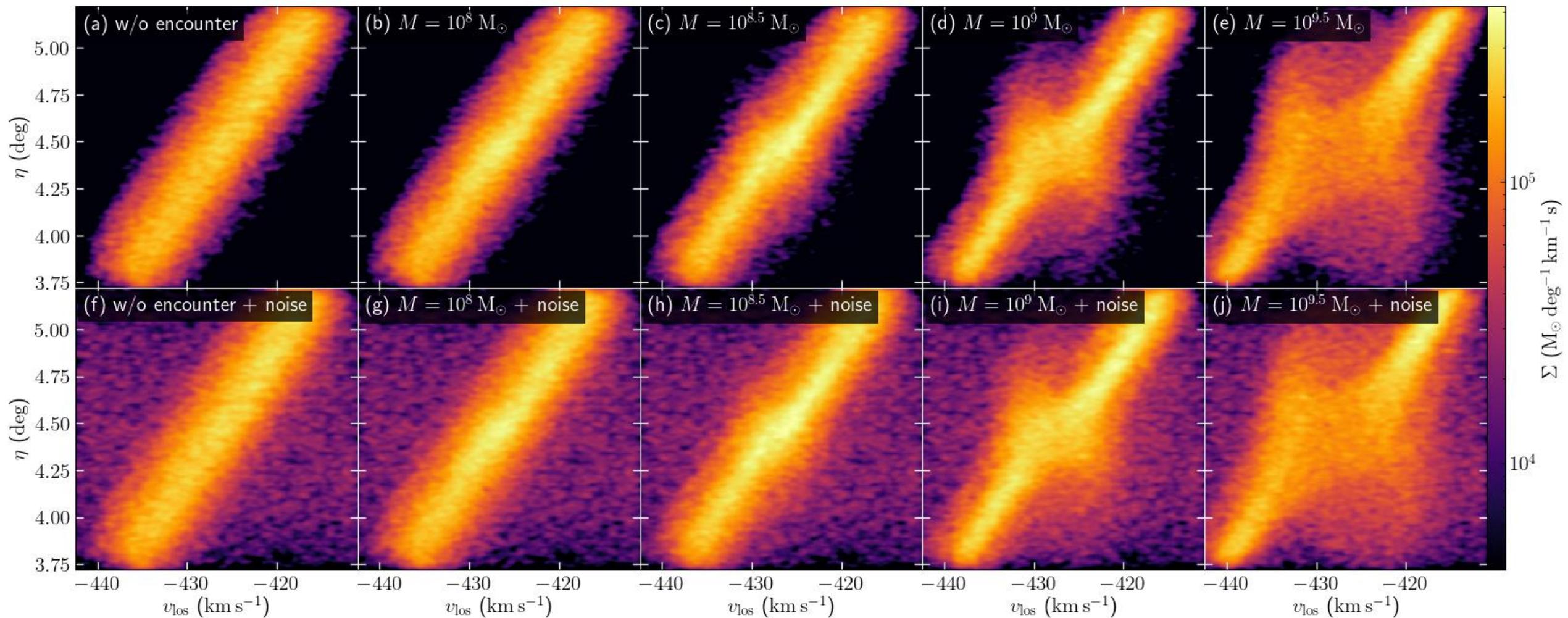
# HSC視野内の空間分布（下段はS/N = 3）

- S/N: ストリーム成分と背景・前景成分の比



# PFS視野内の速度構造（下段はS/N = 3）

- ストリーム幅（ $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ ）が解像できればギャップ検出可能



# まとめ (NWストリーム)

- 衛星銀河問題の検証には、銀河ハロー中のDMサブハローの個数評価が必要
  - M31ハロー中のNWストリームをプローブとした研究が進行中
- NWストリームとDMサブハローの衝突実験
  - DMサブハロー質量が $\lesssim 10^8 M_{\odot}$ では、衝突痕跡の検出は困難
  - DMサブハロー質量が $\gtrsim 10^9 M_{\odot}$ では、衝突痕跡の検出が可能
  - 特に位相空間上では明確な痕跡が残る
  - $S/N = 3$ 程度の観測であっても構造の検出は可能
- すばるPFSは $\sim 1.25 \text{ deg}^2$ の2400天体の視線速度を測定可能
  - 位相空間上における構造探査に好適
  - DMサブハロー衝突の痕跡検出に威力を発揮すると期待できる
- 今後: DMサブハロー数と観測される衝突痕跡数の関係構築を目指す

# 始原ブラックホール (PBH) による カスプ・コア遷移

- 始原ブラックホール (原始ブラックホール)
  - Primordial Black Hole (PBH)
  - ビッグバン直後に形成された可能性のある仮説上のブラックホール
  - ダークマター候補として許される質量レンジ：  
 $m_{\text{PBH}} \sim 4 \times 10^{-17} M_{\odot}, 2 \times 10^{-14} M_{\odot}, 25 M_{\odot} - 100 M_{\odot}$  (Carr+17)
- コア・カスプ問題
  - 標準理論が预言するダークマターハローの密度分布：中心で発散 (カスプ)
  - 近傍宇宙における矮小銀河の観測から示唆される密度分布：中心でコア構造
  - 理論と観測の不一致 (コア・カスプ問題) の解決策として、中心部の力学的な加熱 (e.g. 周期的な重力ポテンシャルの変動) が考えられている
- 本研究では、PBHによるカスプ・コア遷移が可能かを調べた
  - 恒星成分・ガス成分を一切含まない系についても適用可能

# 状況設定

- ハローモデル：  $M = 10^7 M_{\odot}$  @  $z = 2$ 
  - NFWモデル (Navarro et al. 1996)
  - PBH粒子の質量：  $m_{\text{PBH}} = 25 M_{\odot}, 50 M_{\odot}, 100 M_{\odot}$  の3通り
  - その他のダークマター粒子の質量：  $m_{\text{CDM}} = 1 M_{\odot}$
  - 全ダークマター質量に対するPBHの割合：  $f_m = 0.01, 0.1, 0.5$  の3通り
  - 通常のダークマター成分のスケール長：  $r_s^{\text{CDM}} = 314 \text{ pc}$  (Prada+12)
  - PBH成分のスケール長：  $r_s^{\text{PBH}} = r_s^{\text{CDM}}, r_s^{\text{CDM}}/2$  の2通り
- N体計算
  - MAGI (Miki & Umemura 2018) を用いて初期条件を生成
  - GOTHIC (Miki+2017; Miki19) を用いて11 Gyrの時間発展を計算

# コア形成時間と2体緩和による緩和時間

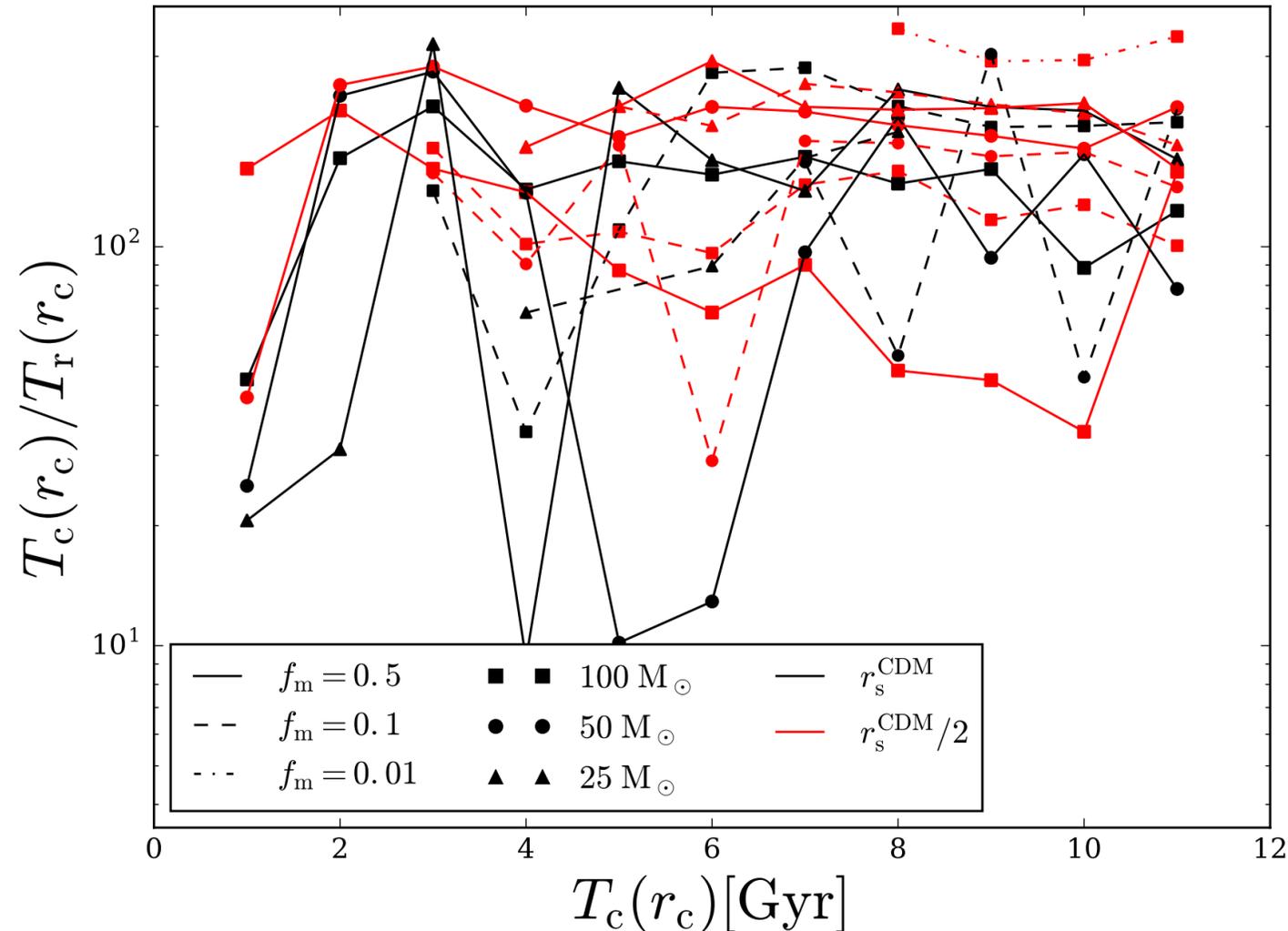
Boldrini, Miki, et al. (2020), MNRAS, 492, 5218

- コア形成時間  $T_c(r_c)$  :  
コア半径が  $r_c$  となる時刻
- 2体緩和による緩和時間  $T_r(r)$  :

$$\frac{M^2(r)}{N_{\text{PBH}}(r)m_{\text{PBH}}^2 + N_{\text{CDM}}(r)m_{\text{CDM}}^2} \frac{t_{\text{ff}}(r)}{32 \ln \Lambda}$$

- $T_c(r_c)/T_r(r_c)$  があまり時間変動せず、各パラメータへの依存性も小さいことが分かった

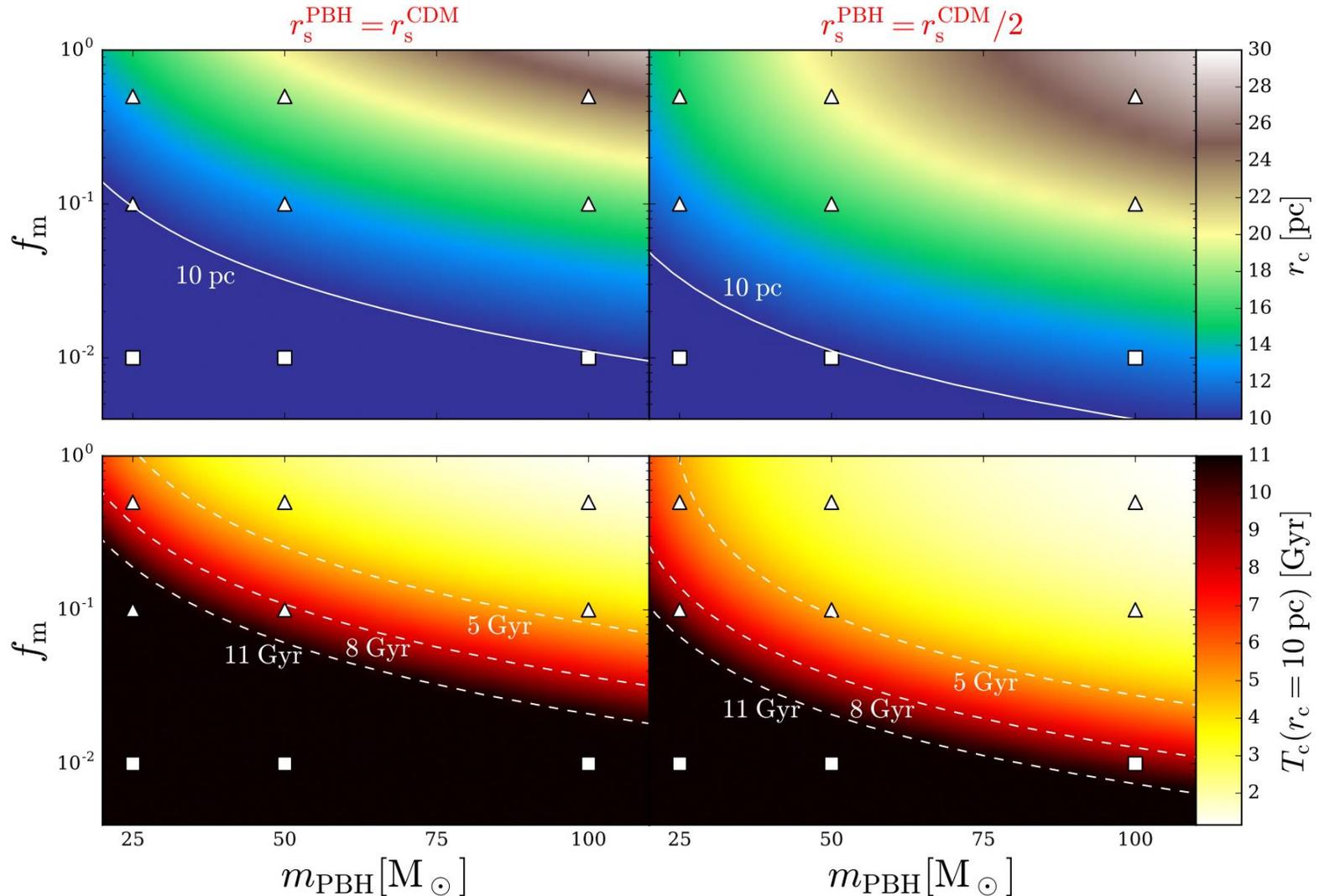
- 2体緩和によってカスプ・コア遷移が起きていることを示唆
- コア形成時間は  $T_c(r_c) \sim 300T_r(r_c)$  と予測可能



# 理論予測と計算結果の比較

Boldrini, Miki, et al. (2020), MNRAS, 492, 5218

- 理論予測：背景マップ
- 計算結果：シンボル
  - $\triangle$ ：コアへと遷移した
  - $\square$ ：遷移しなかった
- 理論予測と計算結果はよく対応している
  - 解析時の空間分解能は10 pc
  - 計算時間は11 Gyr
- カスプ・コア遷移が2体緩和による力学的な加熱によって起こっているという解釈を支持する結果



# N体計算コードの高次精度化

- 独立時間刻み法や階層化時間刻み法の欠点：  
系の運動量や角運動量が保存しなくなる
- HHS(hierarchical Hamiltonian splitting)法は、  
系のHamiltonianを時間進化の速さに応じて分割  
することで、**運動量・角運動量が保存する階層化  
時間刻み法**を実現 (Pelupessy et al. 2012)
  - 時間2次精度のスキームのみが提案されていた
- 本研究では、**Yoshida (1990)による高次精度シ  
ンプレクティック法の適用により、時間4次精度  
への拡張が可能であることを示した (右図)**
  - 計算時間が増大するものの、時間6次精度も達成可能

