

# アンドロメダ銀河 North-Western ストリーム とダークマターサブハローの 相互作用

三木洋平（東京大学・情報基盤センター）

共同研究者：

森正夫（筑波大学），桐原崇亘（千葉大学），  
小宮山裕（国立天文台），千葉栞司（東北大学）

# 学際大規模情報基盤共同利用 共同研究拠点（JHPCN）

- <https://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/ja/>
- 北大・東北大・東大・東工大・名大・京大・阪大・九大の各大型計算機センター
- 公募型共同研究によって、各センターのスパコンを無料で使用可能
  - 筑波大CCSの学際共同利用と同様の制度
  - 11月中旬ぐらいに公募開始，1月上旬に申請締め切り
- 計算科学・計算機科学の分野型横断研究
- 各センター教員との共同研究が多い
- 国際共同研究の制度もあり

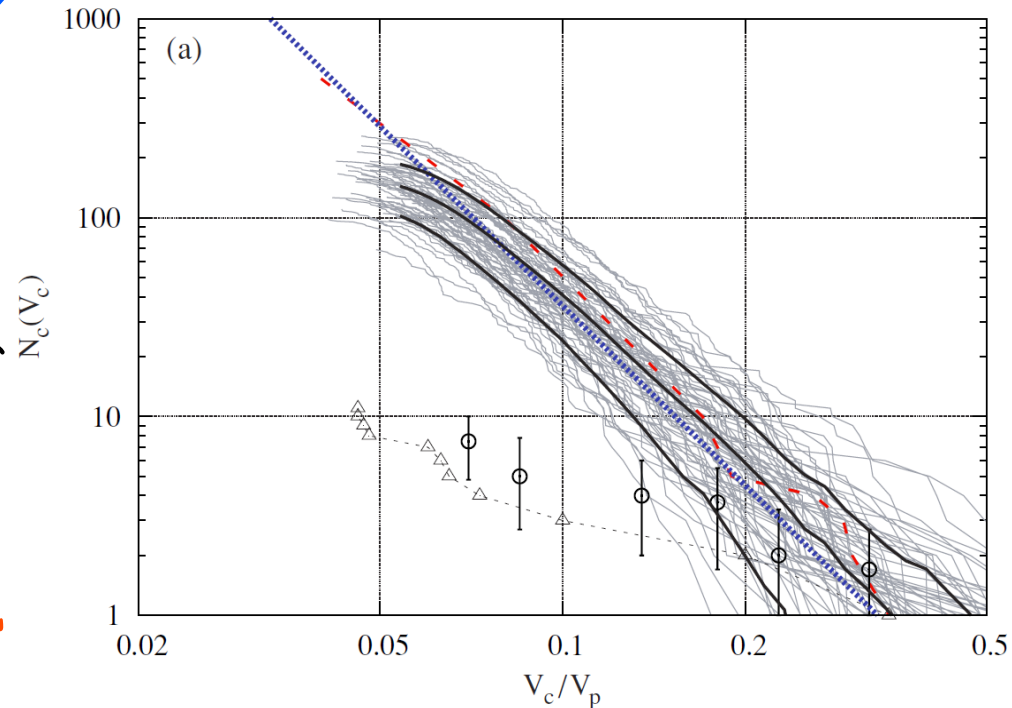
# Contents

- 衛星銀河問題
- North-Western (NW) ストリーム
- NWストリームとダークマターサブハローの衝突実験
  - テスト粒子版の結果
  - NFW球の結果
- 将来展望
- まとめ

# Missing satellite problem (衛星銀河問題)

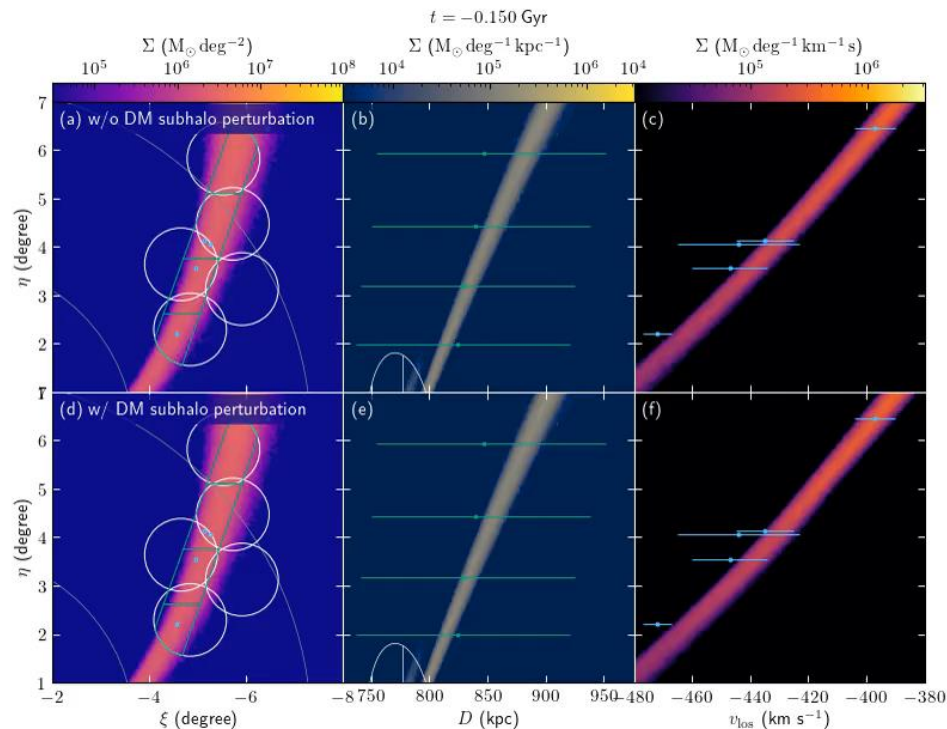
- 宇宙論的N体計算は、  
ダークマター (DM) サブ  
ハローを作りすぎる  
(Moore et al. 1999)
  - サブハローの数:  $\sim 100$
  - 衛星銀河の数:  $\sim 10$
- 問題点: 見えないDMサブ  
ハローの数と見える衛星  
銀河の数を比較している
  - DMサブハローの数を、観  
測的に評価できないか？

Ishiyama et al. (2009)



# Carlberg (2012) の提案

- 恒星ストリーム中をDMサブハローが通過すれば，“ギャップ”を作る
  - 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

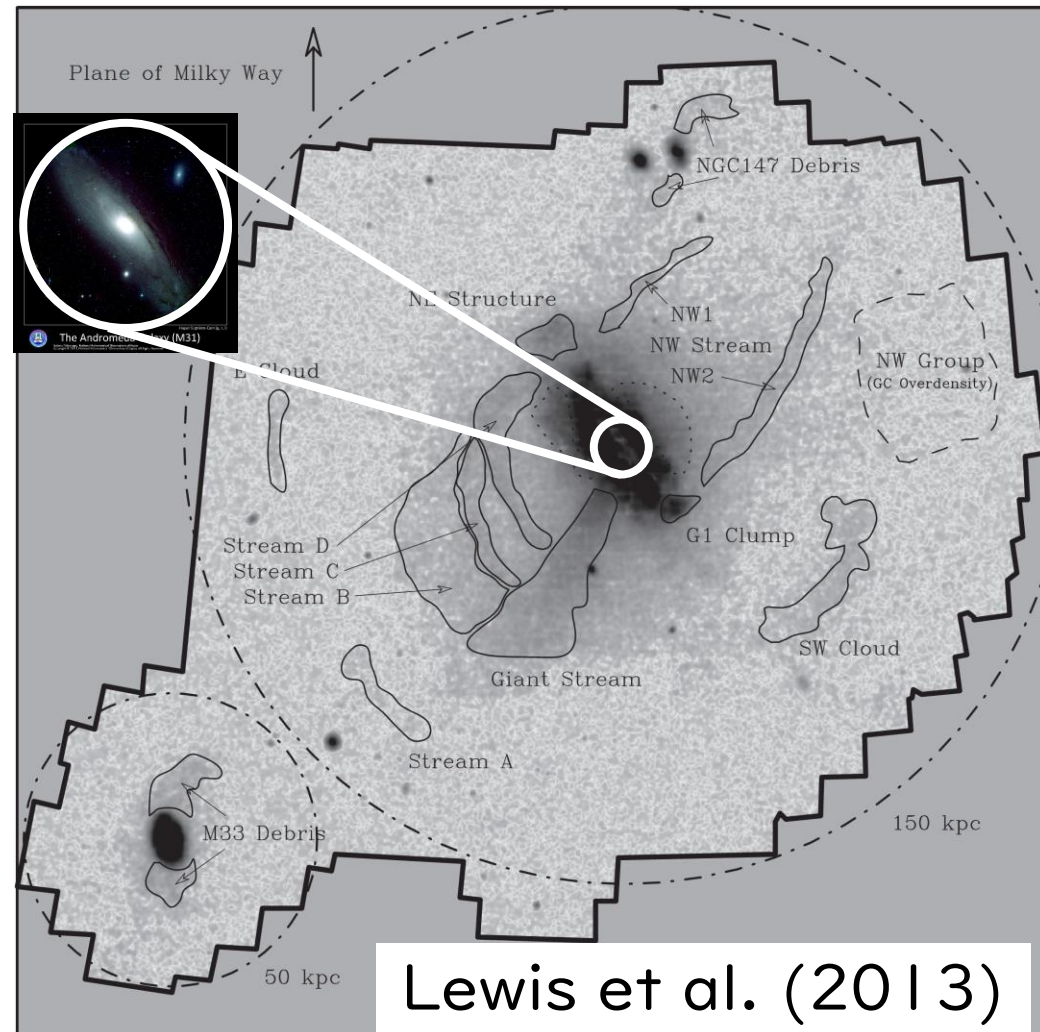


# 候補天体

- 細長い恒星ストリームが望ましい
  - 細い = 内部の運動速度が遅い
  - ギャップが埋まるまでの時間が長い
- 銀河中心から遠い方が望ましい
  - バルジ, 円盤成分からの影響が小さくなる
- Palomar 5 (Odenkirchen et al. 2001)
- GD-1 (Grillmair & Dionatos 2006)
- North-Western stream  
(Richardson et al. 2011)

# M31 周辺の恒星分布

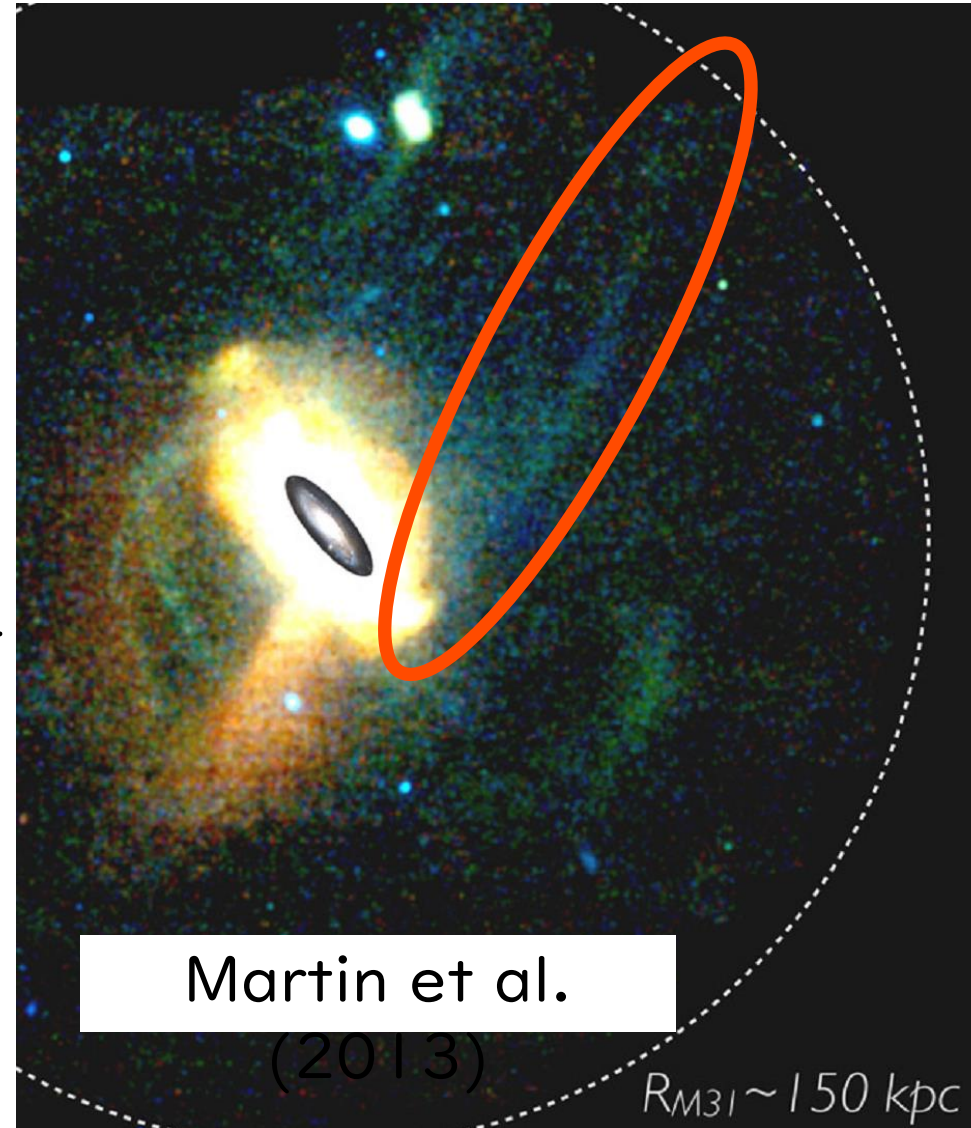
- アンドロメダ銀河 (M31) 周辺の恒星の観測により, 銀河衝突の痕跡が多数見つかった
  - Giant southern stream
  - North-Western stream
  - Stream A, B, C, D
  - E cloud
  - SW cloud





# North-Western 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 の北西方向に 100 kpc以上伸びている
- GSSよりも細い構造
- 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)

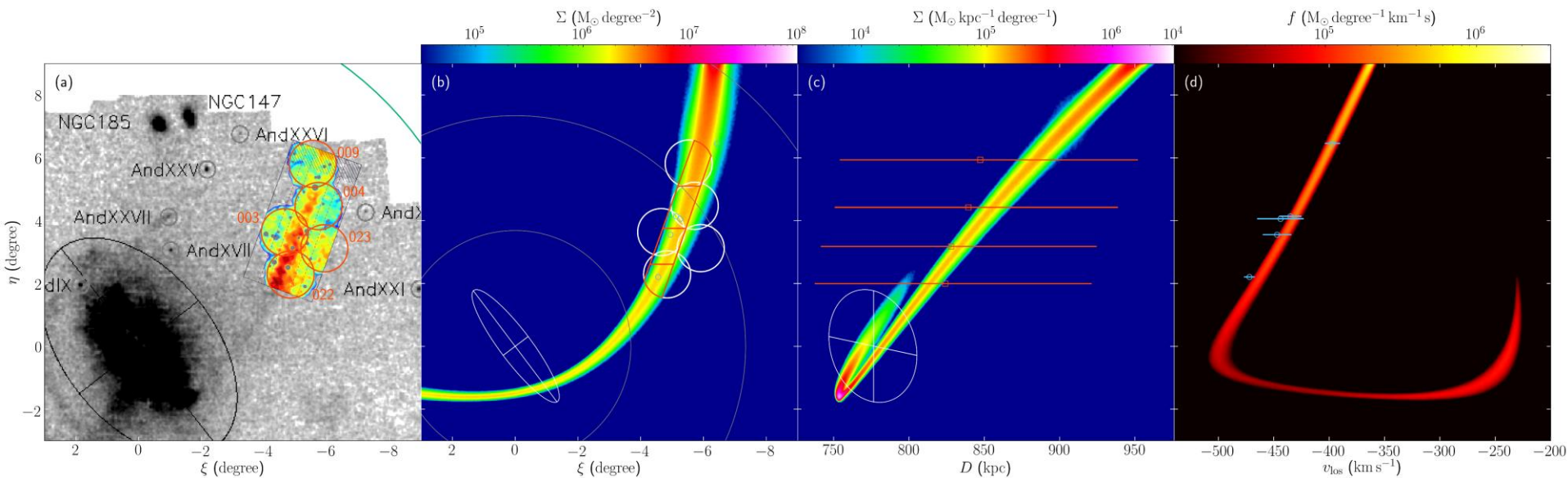




# 我々の戦略

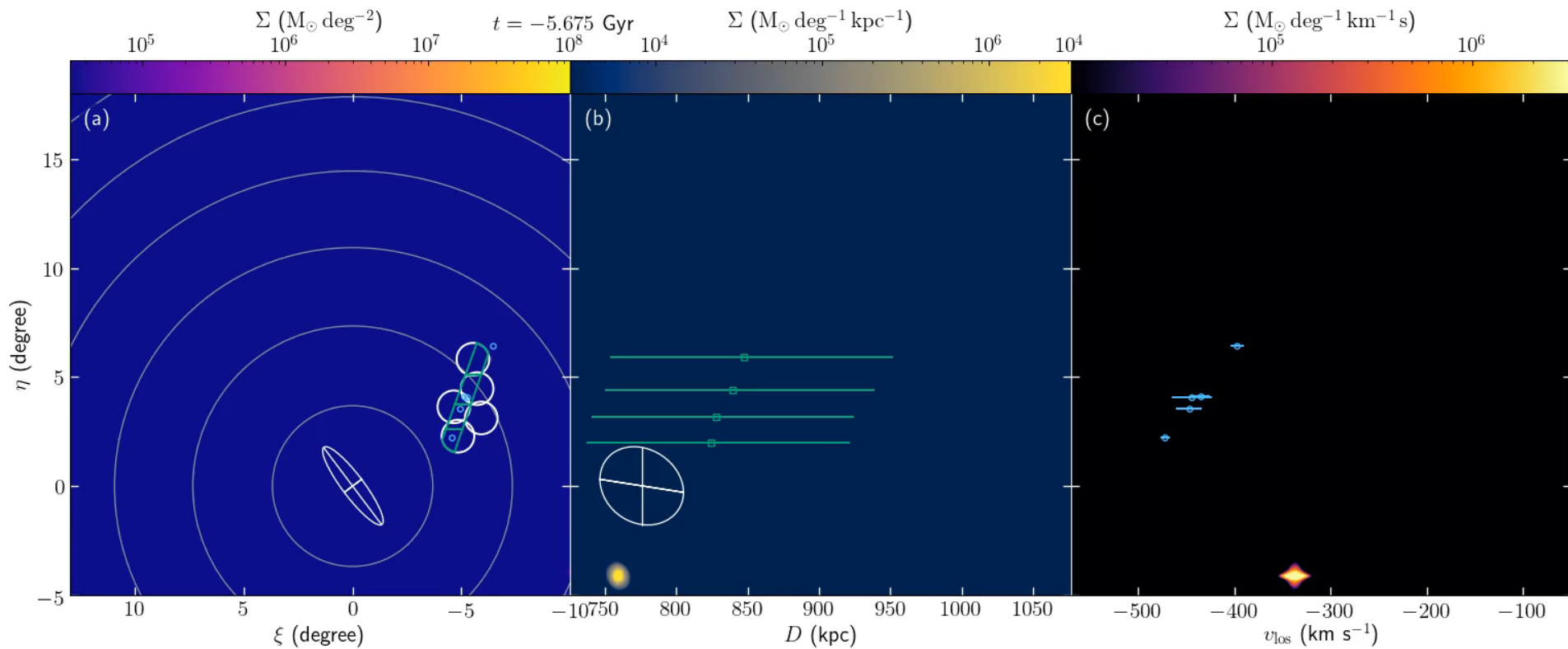
- ゴール: NWストリームをプローブとしてM31ハロー中のDMサブハローの数を評価し，衛星銀河問題の検証を進める
- 1. NWストリームを精密に再現できる軌道，母矮小銀河の質量，サイズに制限をつける
- 2. NWストリームにDMサブハローを衝突させて，ギャップの数を理論的に評価する
- 3. Subaru/HSC, Subaru/PFS を用いてギャップの数を観測的に評価する

# 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

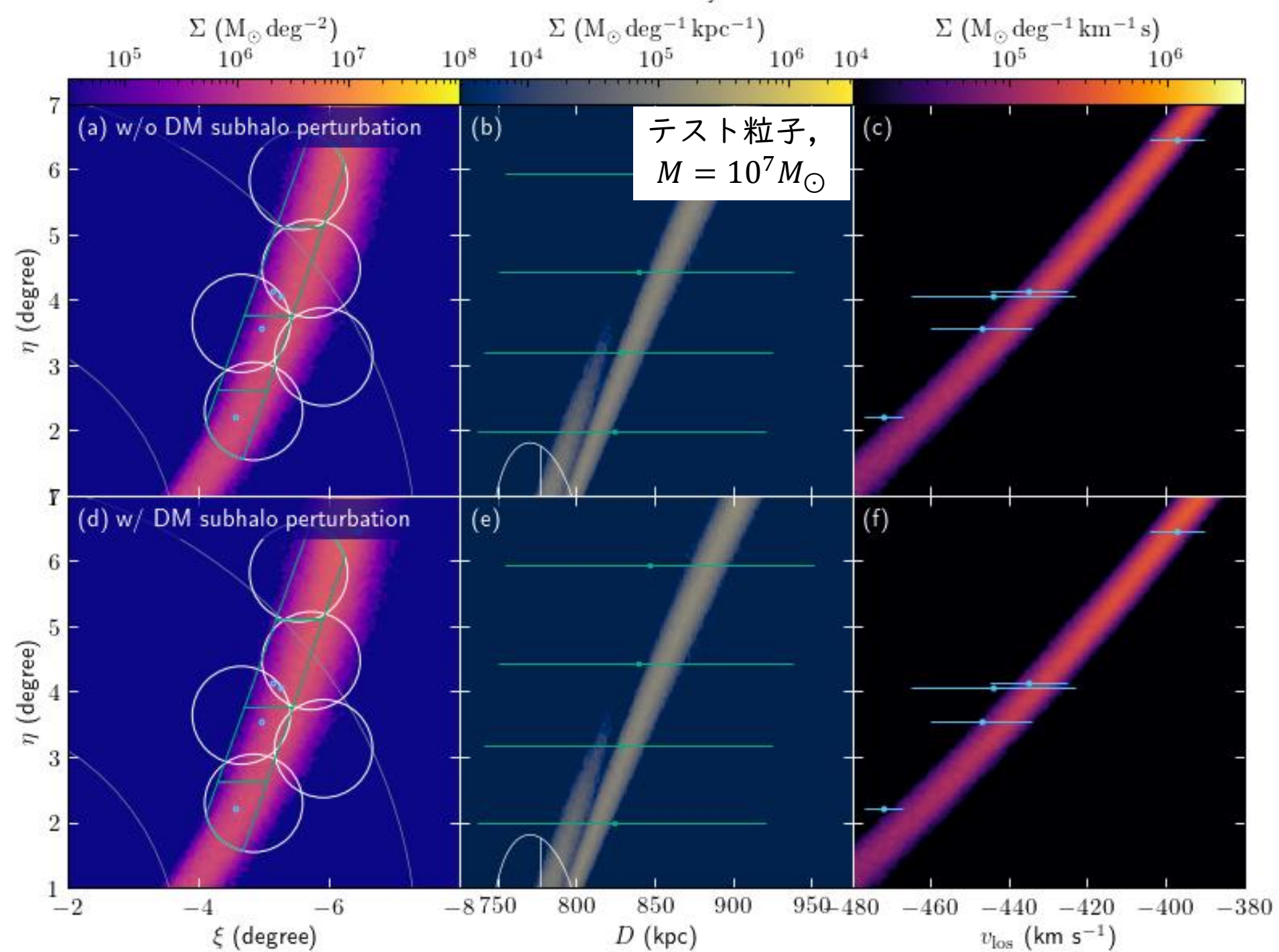
# NWストリームの形成過程



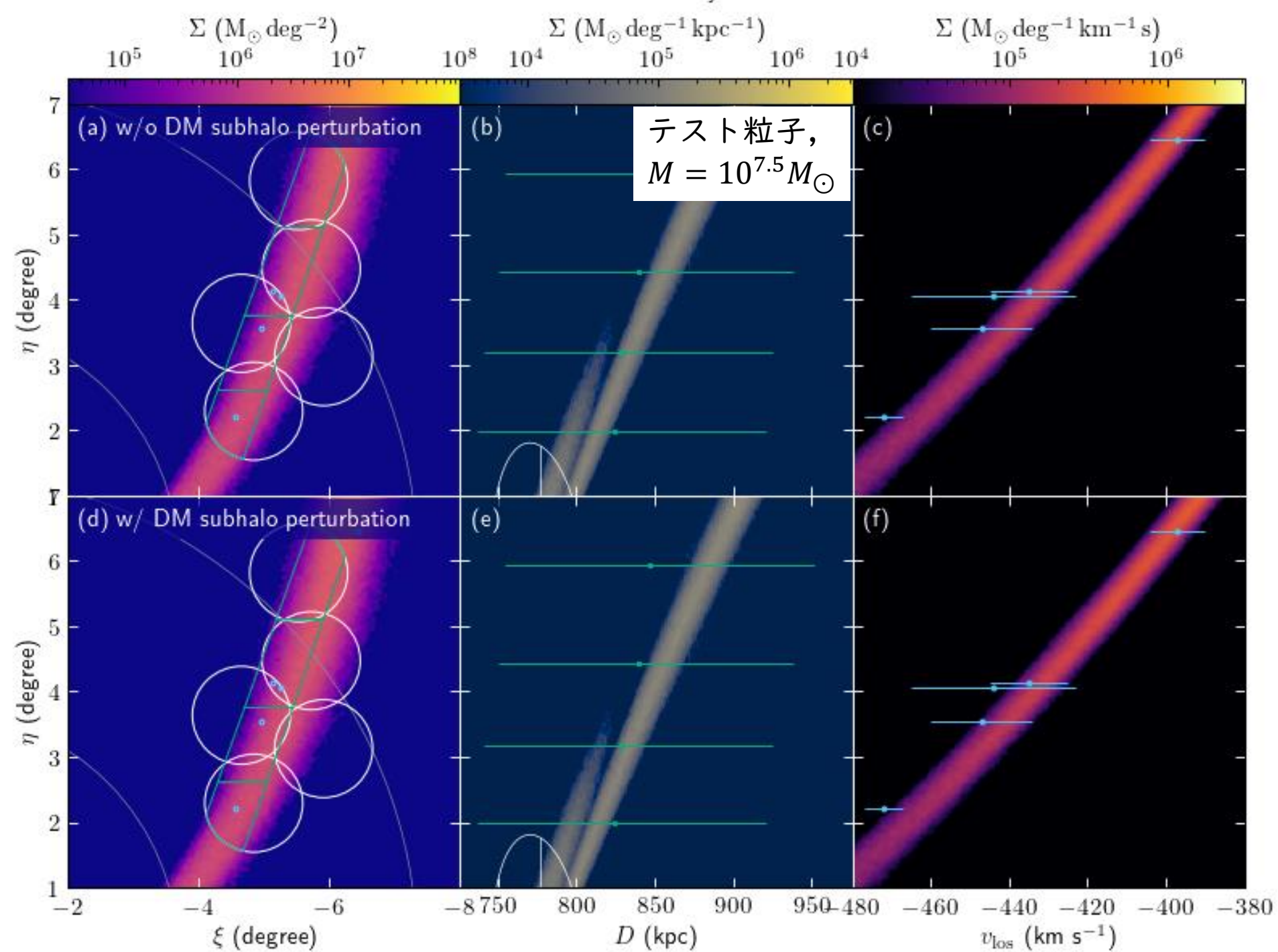
# NWストリームとDMサブハロー (テスト粒子) の相互作用

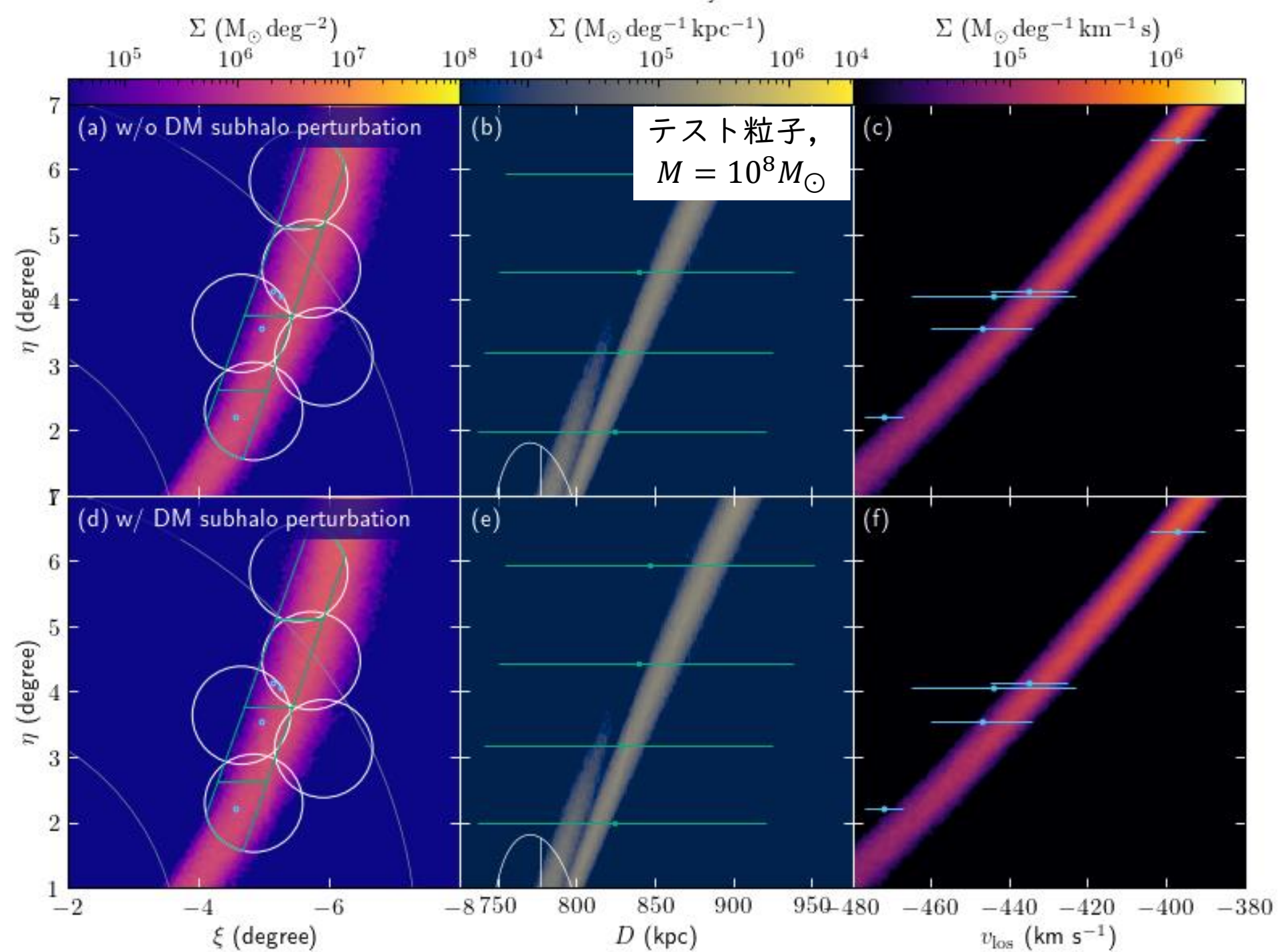
- NWストリーム progenitor
  - Plummer sphere ( $M = 5 \times 10^7 M_{\odot}$ ,  $N = 2^{20}$ )
- DMサブハロー
  - $M = 10^7, 10^{7.5}, 10^8, 10^{8.5}, 10^9, 10^{9.5} M_{\odot}$
  - NWストリームに円軌道で衝突するように投入
- コード
  - MAGI (YM & Umemura 2018)
  - GOTHIC (YM & Umemura 2017, YM2019)
- 計算機
  - Reedbush-L (Tesla P100) @東大ITC
  - TSUBAME3.0 (Tesla P100) @東工大GSIC
  - Cygnus (Tesla V100) @筑波大CCS



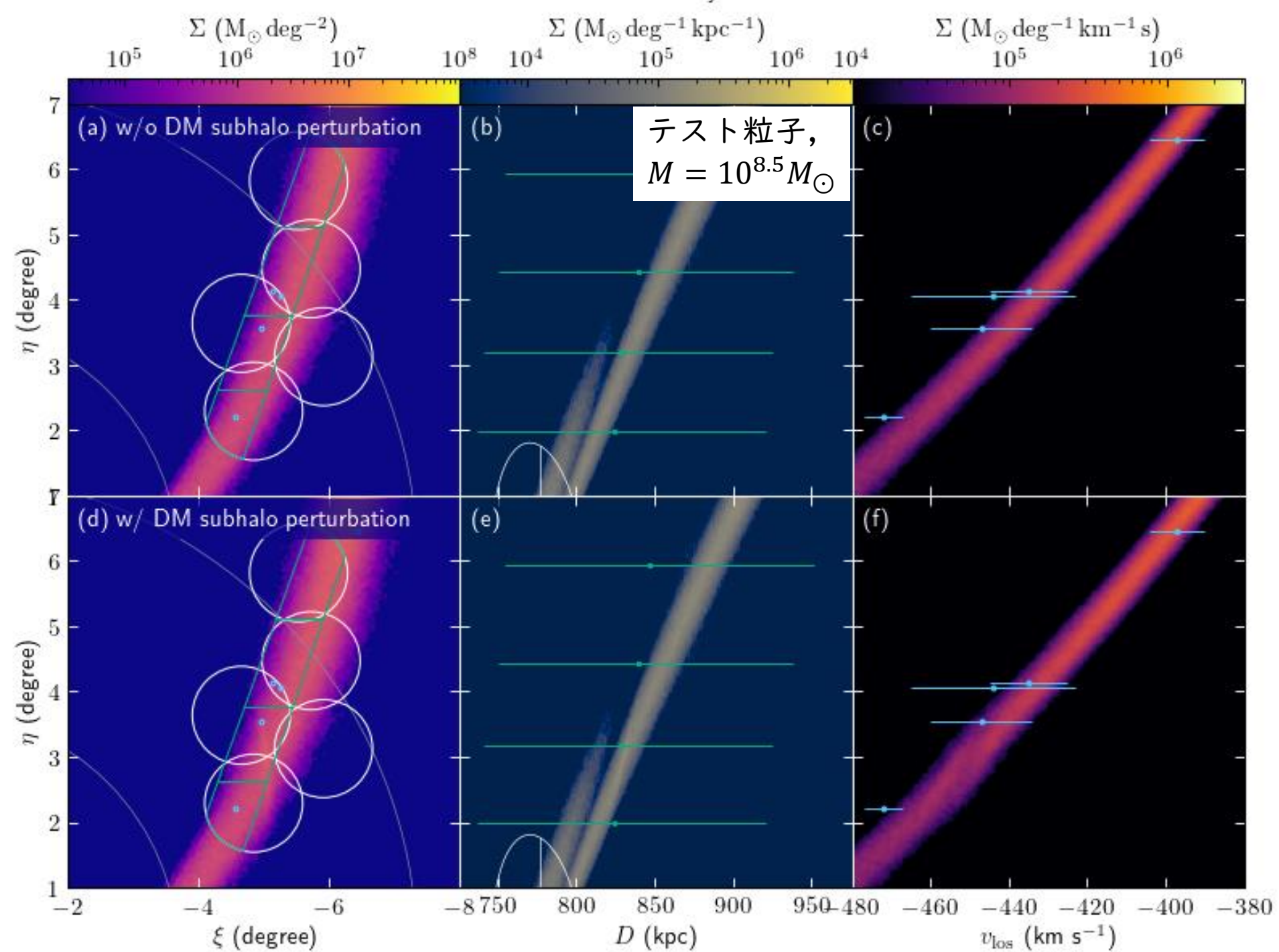


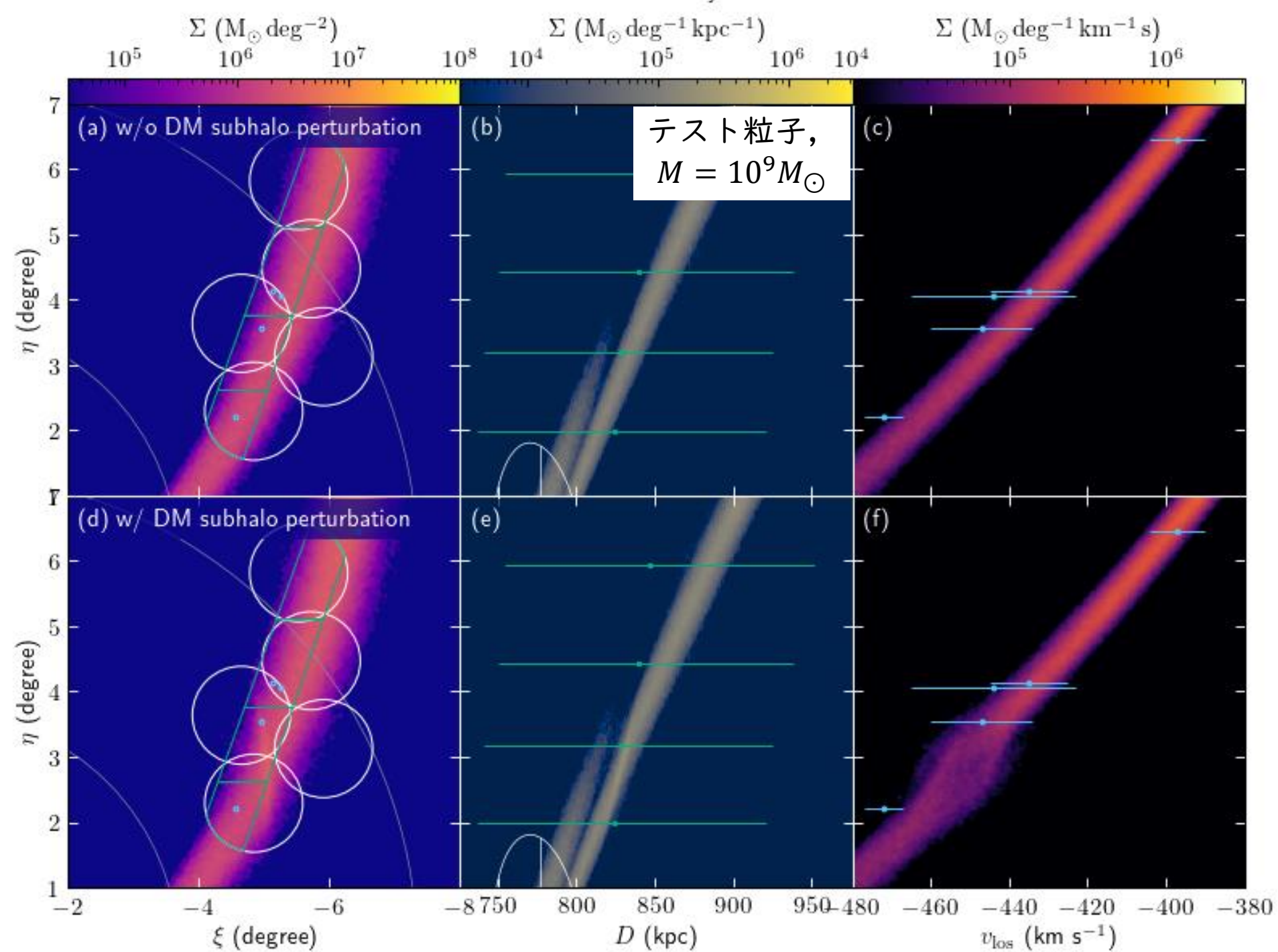


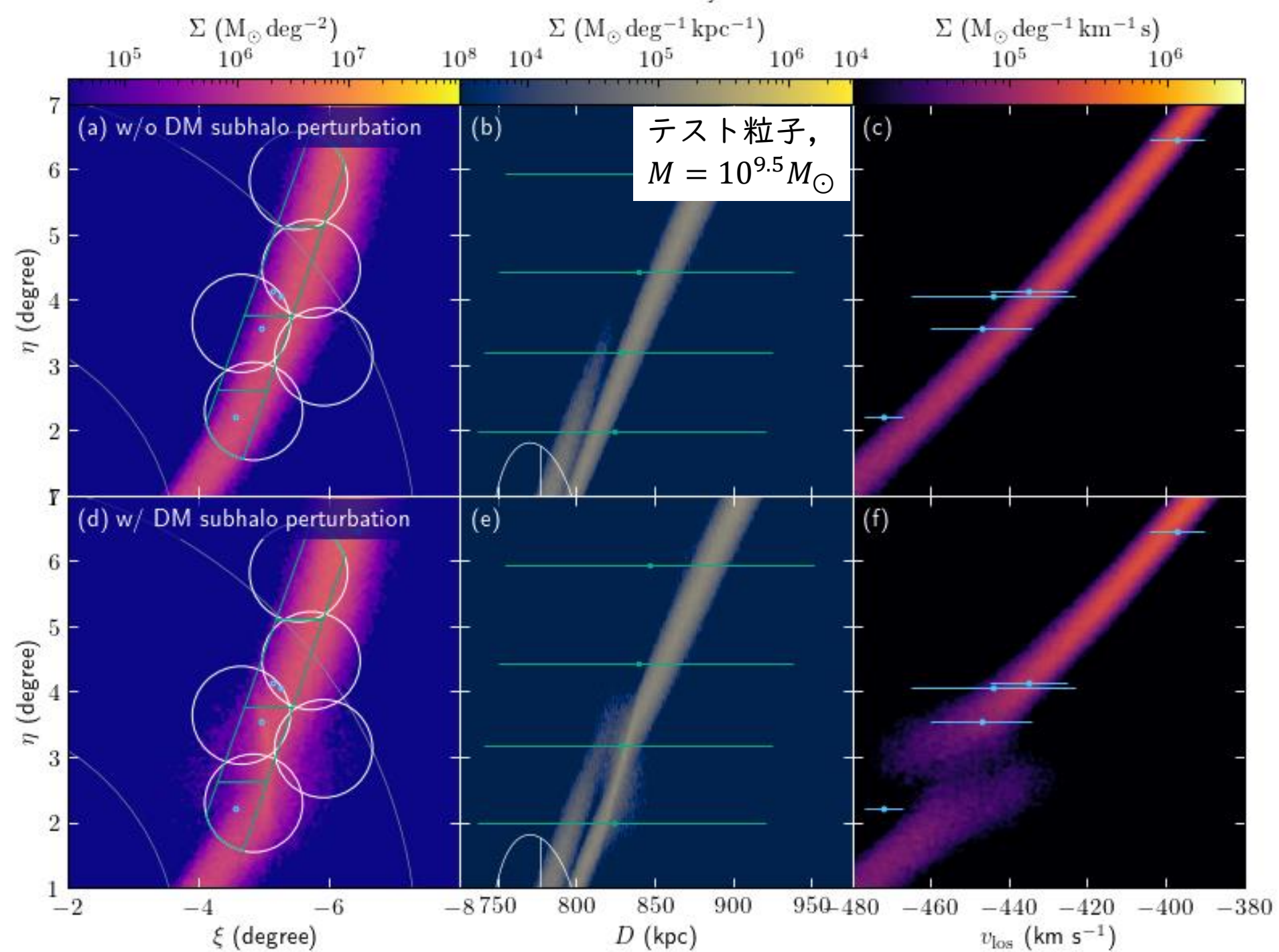














$t = -0.775$  Gyr

$\Sigma$  ( $M_{\odot} \text{ deg}^{-2}$ )

$\Sigma$  ( $M_{\odot} \text{ deg}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ )

$\Sigma$  ( $M_{\odot} \text{ deg}^{-1} \text{ km}^{-1} \text{ s}$ )

$10^5$

$10^6$

$10^7$

$10^8$

$10^4$

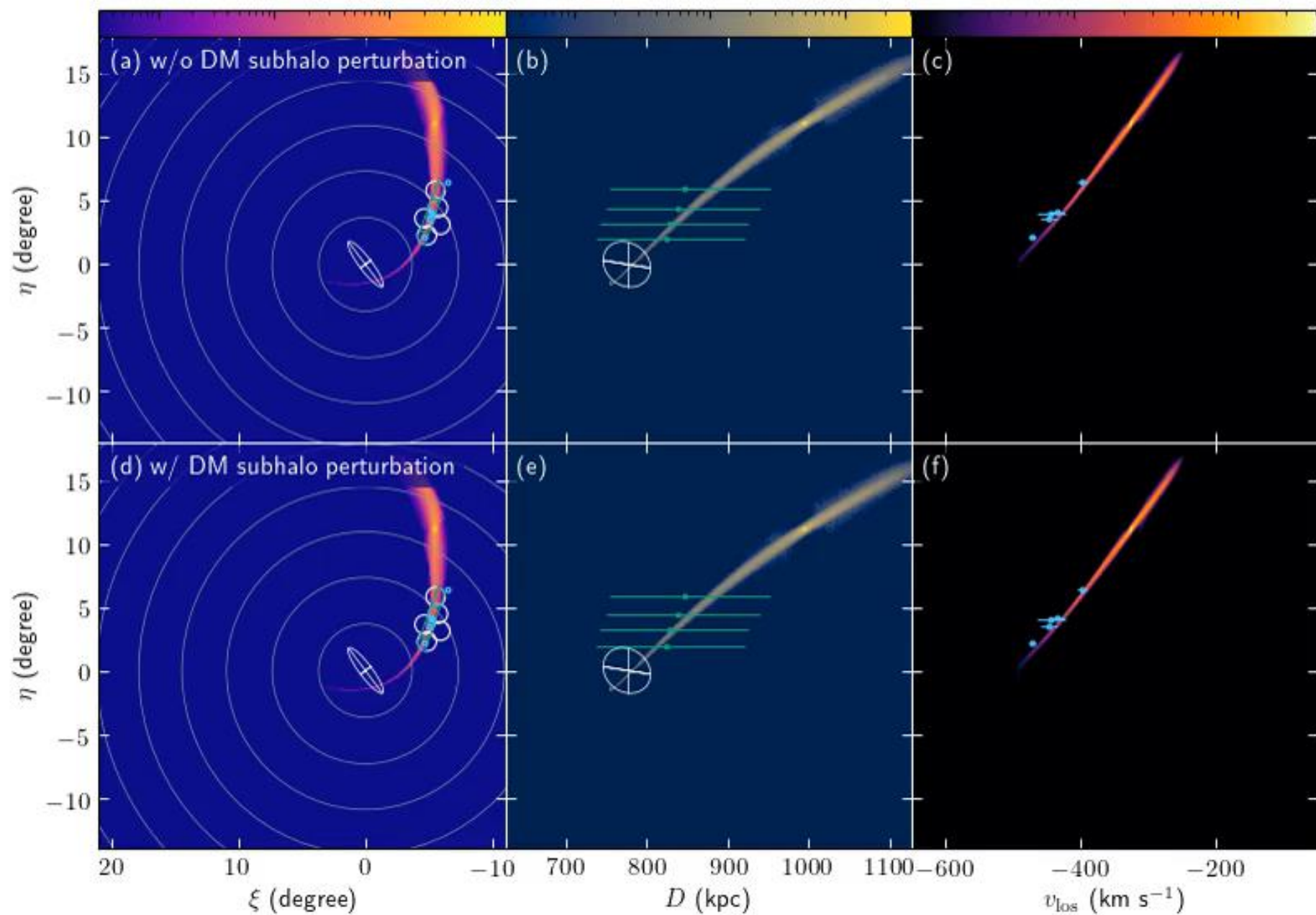
$10^5$

$10^6$

$10^4$

$10^5$

$10^6$



# この段階で言えること

- サブハロー質量が $10^{7-8} M_{\odot}$ 程度であれば、衝突の痕跡を（衝突直後に）検出するのは困難
- 位相空間上での検出のほうがはるかに簡単
- 衝突後、近点通過後 and/or 遠点接近時にギャップが引き伸ばされる
  - 現在解析中
  - ストリームの切断が可能？
  - 衝突の痕跡を検出できる質量の下限值は下がる？

# NWストリームとDMサブハロー (NFW sphere) の相互作用

- 元衛星銀河: Plummer ( $M = 5 \times 10^7 M_{\odot}$ ,  $N \sim 10^6$ )
- DMサブハロー: NFW ( $M = 10^9 M_{\odot}$ ,  $N \sim 2 \times 10^7$ )
  - Prada et al. (2012) による c-M relation を仮定
- M31: ポテンシャル場 (ハロー, バルジ, 円盤)
- コード:
  - MAGI (Miki & Umemura 2018)
  - GOTHIC (Miki & Umemura 2017; Miki 2019)
- 使用システム:
  - Cygnus (Tesla V100) @ 筑波大CCS



$t = -0.775 \text{ Gyr}$

$\Sigma \text{ (M}_\odot \text{ deg}^{-2}\text{)}$

$\Sigma \text{ (M}_\odot \text{ deg}^{-1} \text{ kpc}^{-1}\text{)}$

$\Sigma \text{ (M}_\odot \text{ deg}^{-1} \text{ km}^{-1} \text{ s}\text{)}$

$10^5$

$10^6$

$10^7$

$10^8$

$10^4$

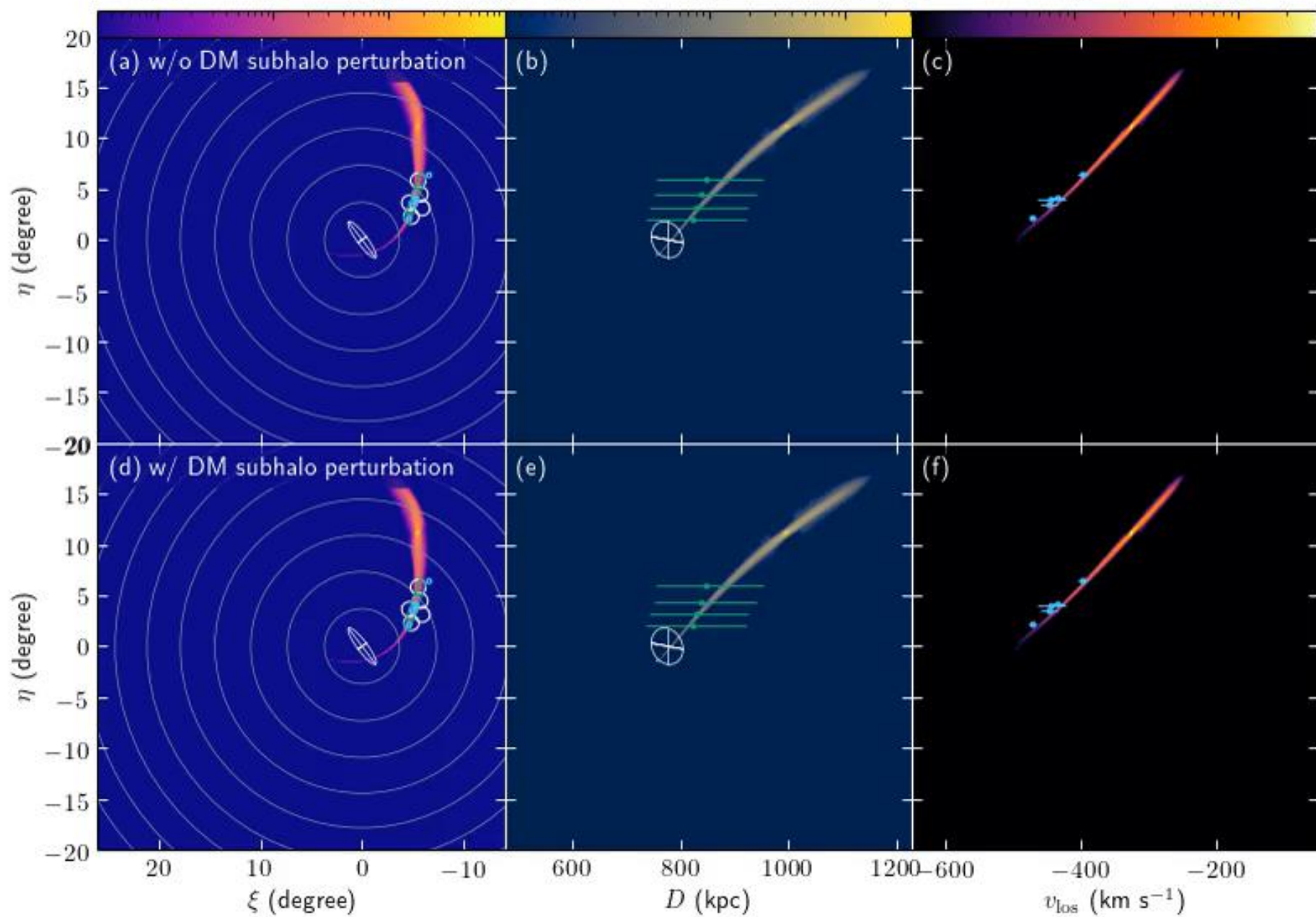
$10^5$

$10^6$

$10^4$

$10^5$

$10^6$





$t = -0.775$  Gyr

$\Sigma$  ( $M_{\odot} \text{ deg}^{-2}$ )

$\Sigma$  ( $M_{\odot} \text{ deg}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ )

$\Sigma$  ( $M_{\odot} \text{ deg}^{-1} \text{ km}^{-1} \text{ s}$ )

$10^5$

$10^6$

$10^7$

$10^8$

$10^4$

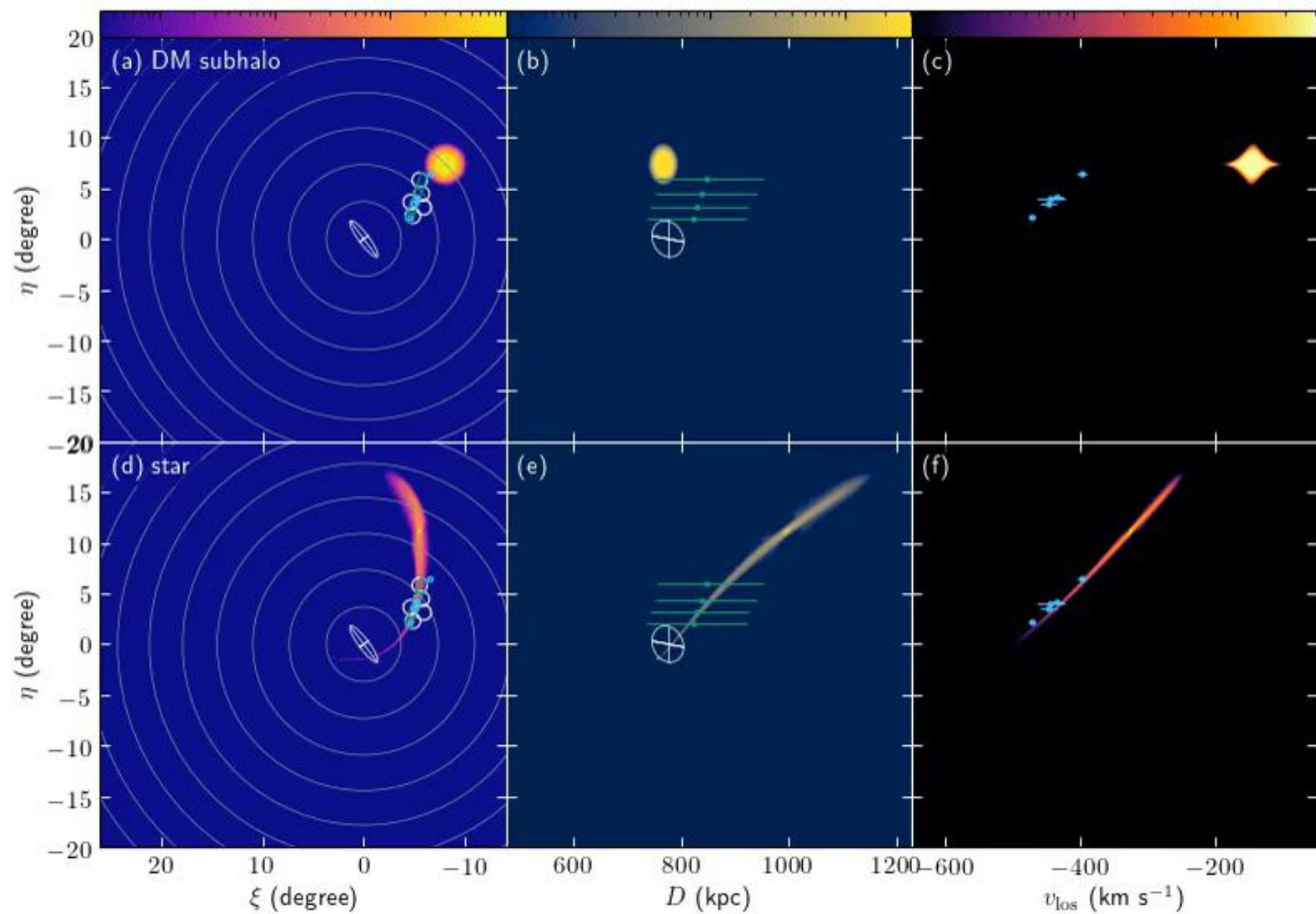
$10^5$

$10^6$

$10^4$

$10^5$

$10^6$



# Future work

- ギャップの形成・進化の解析的モデル化
- すばる望遠鏡のHSC, PFSを用いてのギャップ検出のための予備評価
- DMサブハローを多数衝突させた際のNWストリームの進化
- GSS, NWストリーム以外の構造 (SW and E clouds, stream Aなど) の形成過程の探求 (ストリームの切断で説明可能?)
- 恒星ストリームとDMストリームの相互作用

# まとめ

- 衛星銀河問題を正しく理解するために，銀河ハロー中のDMサブハローの個数を評価したい
- 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
  - 矮小銀河ストリームにギャップを作ることが可能
  - 衝突後の時間発展によって，ストリーム中のギャップは引き伸ばされる
  - DMストリームとの相互作用によって，多数のギャップ構造が形成される