

# 暗黒衛星銀河探査プロジェクト

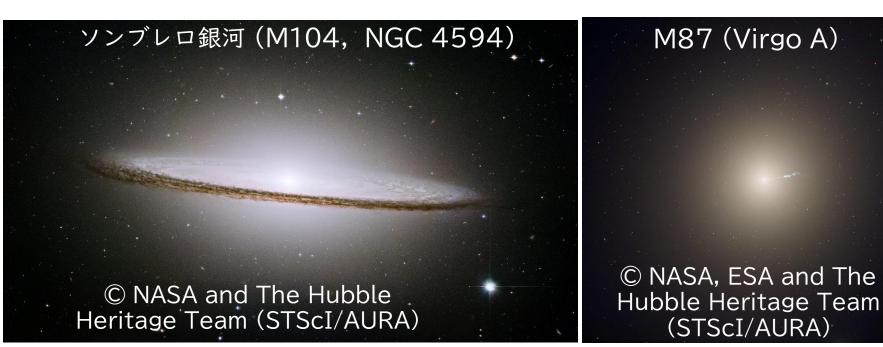
三木 洋平 (東京大学 情報基盤センター)

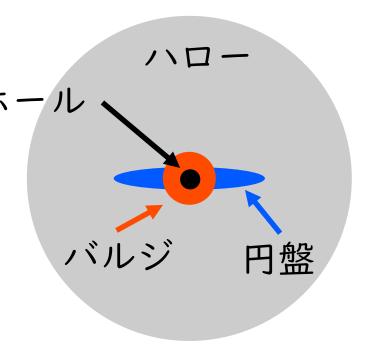
#### 銀河

大質量ブラックホール

- 星, ガス, ダークマターからなる天体
  - ・天の川銀河(銀河系),アンドロメダ銀河など
  - 質量:  $10^{7-13} M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$ は太陽の質量)
  - サイズ: 10<sup>3-6</sup>光年
  - 中心に大質量ブラックホール

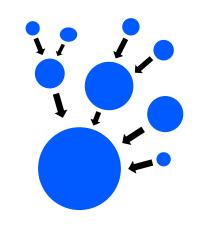






#### 標準的な銀河進化シナリオ

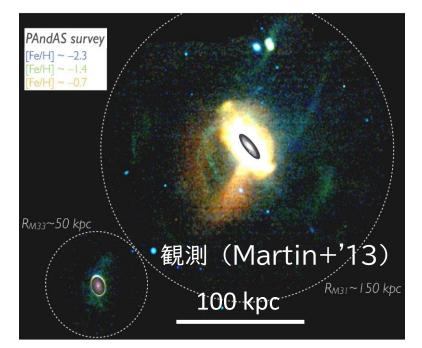
・小さい構造から先にでき, 互いに衝突・合体を繰り 返して銀河や銀河団と いった大きな構造へと成長



- ・銀河の衝突・合体:
  - 銀河進化を考える上で重要な過程
  - ・銀河衝突の痕跡(筋状の構造, 貝殻状の構造など)が多数見つかっている
  - 銀河は成長しきった天体ではなく、 現在も成長を続けている



銀河の周りに残る衝突痕跡

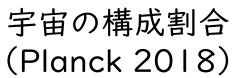


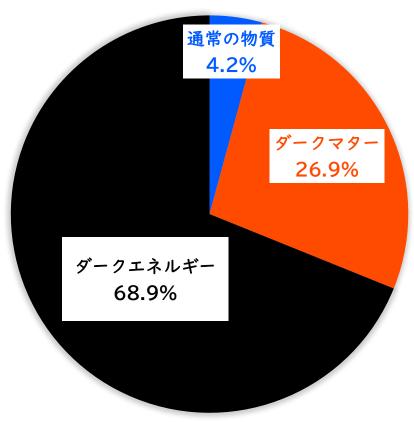
#### 銀河考古学(Galactic archaeology)

- 近傍宇宙論(near-field cosmology)とも言う
- ・近傍銀河の詳細な観測によって得られる"化石情報"を手がかりとして、銀河の形成・進化過程を研究する分野
  - ・観測・理論・計算の融合が必要
- 宇宙論と銀河考古学でのアプローチの違い
  - 宇宙論: (高赤方偏移での) 初代星の観測
  - ・銀河考古学:天の川銀河ハロー内の(超)低金属量星の観測
    - 初代星は重元素汚染が進んでいない宇宙で形成されるため、低金属量
    - (小質量) 初代星の寿命は138億年(=宇宙年齢) よりも長い

#### 暗黒物質 (ダークマター)

- 重力相互作用はするが、電磁相互作用をしない(あるいは極めて弱い)物質
  - 未発見の素粒子や始原ブラック ホールなどが候補
  - ・銀河の回転曲線、X線ハロー、 宇宙の構造形成など傍証は多数
- ・修正重力理論を主張する人たちもいる

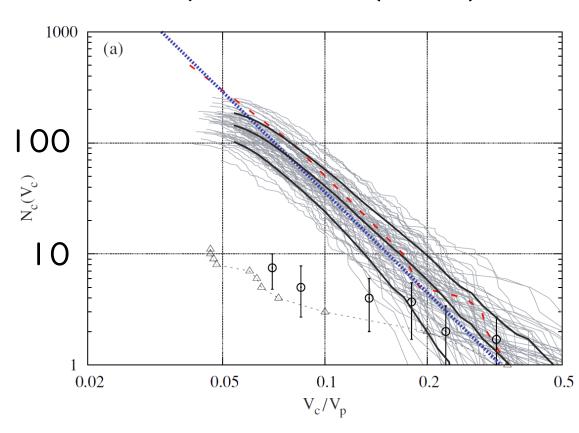




## Missing satellite problem (衛星銀河問題)

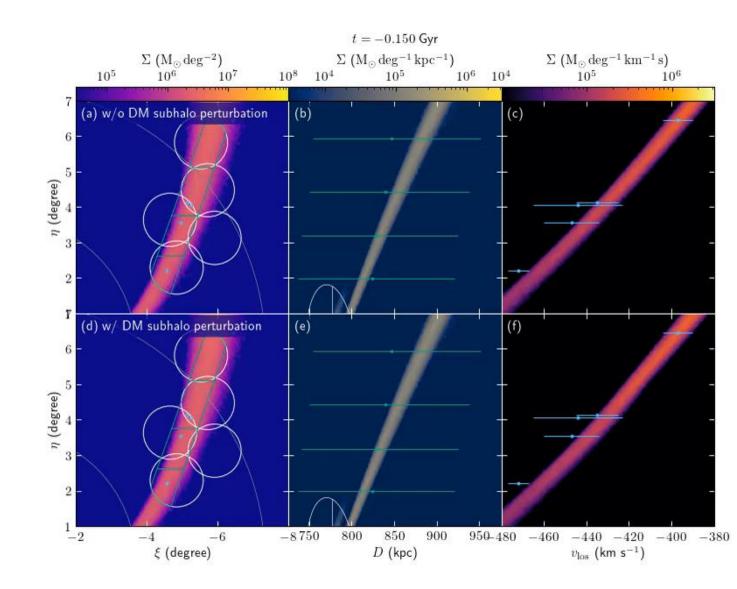
- 宇宙論的N体計算は、ダークマター (DM) サブハローを作りすぎる (Moore et al. 1999)
  - サブハローの数: O(100)
  - 衛星銀河の数:O(10)
- ・以下, DMサブハローのことを 暗黒衛星銀河と呼ぶことにする
- 問題点: 見えない暗黒衛星銀河の数と 見える衛星銀河の数を比較
  - 暗黒衛星銀河の数を、観測的に評価できないか? 見えないものをどうやって「見る」か?

Ishiyama et al. (2009)



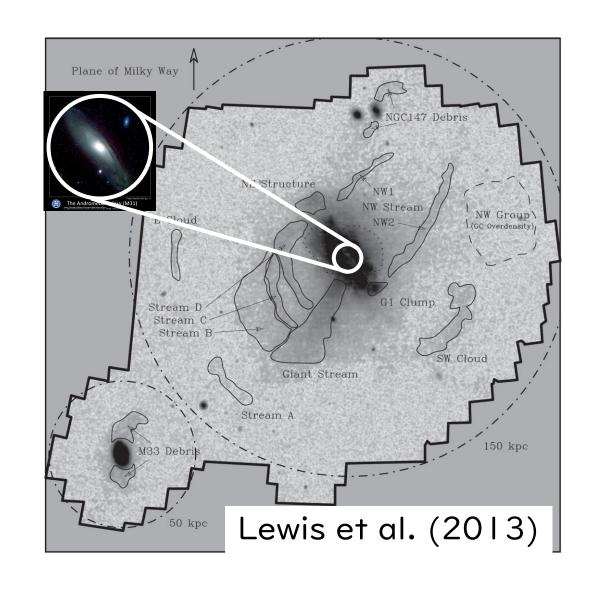
#### 暗黒衛星銀河数の評価手法

- 恒星ストリーム近傍を暗 黒衛星銀河が通過すれば, 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、暗黒衛星銀河の数が見積もれる
- →暗黒衛星銀河数の観測 的な評価



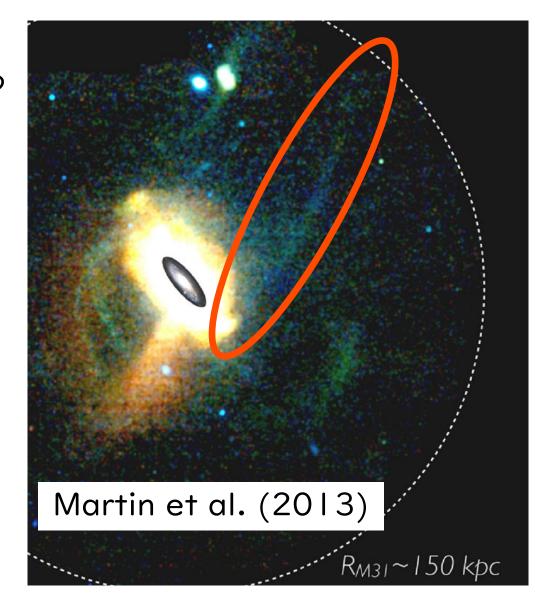
#### M31周辺の恒星分布

- 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 てきた
  - Giant Southern stream
  - North-Western stream
  - Streams A, B, C, D
  - E cloud
  - SW cloud



#### North-Western (NW) ストリーム

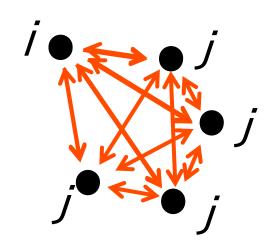
- PAndAS プロジェクトによって新たに見つかった構造 (McConnachie+09; Richardson+11)
- M31北西方向に100 kpc以上伸びている
- M31ハロー内でも特に細い構造
- M31本体よりも奥側に分布 (Komiyama+18)
- NWストリームに沿って球状星団が分布 (Veljanoski+14)
- HSC観測によって面密度分布にギャップ状構造を検出(Komiyama+18)
  - ストリームの端という可能性もある



#### N体計算(重力多体計算)

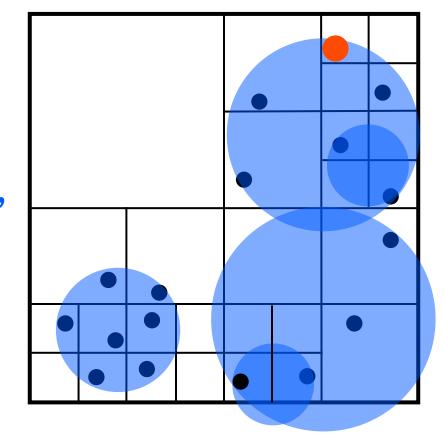
- ・注目している系を多数の粒子(N体粒子)の分布で表現
- 粒子どうしに働く自己重力による系の時間進化を,運動方程式 に基づいて計算 N-1 Q Q
  - データ量: O(N)
  - 重力計算:  $O(N^2)$
  - 時間積分: O(N)
- 業界的によく使う用語
  - i-粒子: 重力を受ける粒子
  - j-粒子: 重力を及ぼす粒子

$$oldsymbol{a}_i = \sum_{\substack{j=0\j
eq i}}^{N-1} rac{Gm_j \left(oldsymbol{x}_j - oldsymbol{x}_i
ight)}{\left(\left|oldsymbol{x}_j - oldsymbol{x}_i
ight|^2 + \epsilon^2
ight)^{3/2}}$$



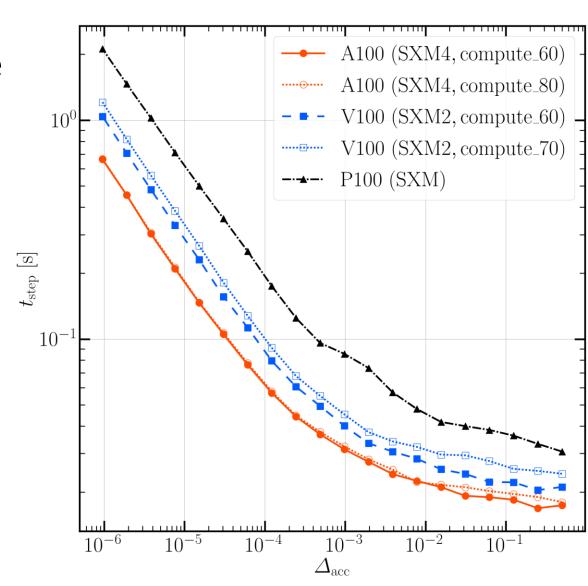
#### N体計算の高速化

- ツリー法(Barnes & Hut 1986)がよく使われる
  - 近似計算(多重極展開)を用い、実効的なj-粒子数を減らす
  - $\mathcal{O}(N_i N_j) \rightarrow \mathcal{O}(N_i \log N_j)$
  - GADGET criterion (Springel '05) :  $\frac{Gm_J}{d_{iJ}^2} \left(\frac{b_J}{d_{iJ}}\right)^2 \le \Delta_{\rm acc} |a_i^{\rm old}|$
- 粒子数を増やして系をなめらかにするか, 個々の重力相互作用を正確に計算するか
  - ・銀河などの無衝突系の場合には、粒子数を 増やしてなめらかな質量分布に近づける方 が優先度が高い(=ツリー法が有効)

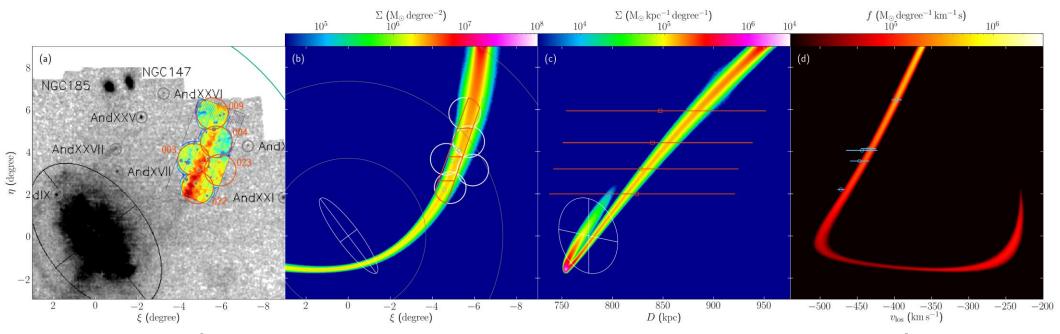


#### N体計算コード: GOTHIC

- Gravitational Oct-Tree code accelerated by HIerarchical time step Contolling
  - YM & Umemura (2017)
  - YM (2019)
  - 三木(2021)
  - 右図: M31 model, N = 8M
- Block time stepを採用
- 幅優先探索を採用
- 動的な最適化を実装
- GPU向けに最適化したコード
- ・A100向けの最適化も完了
  - Wisteria/BDEC-01 (Aquarius)に 全360基のA100が搭載されている

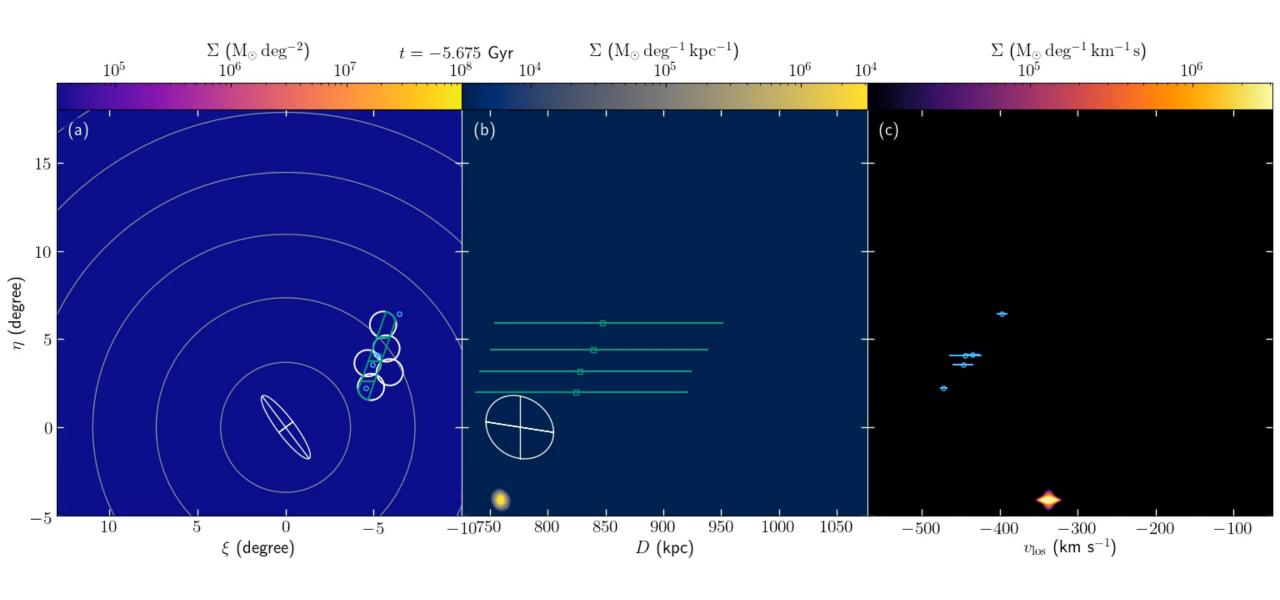


#### N体計算による再現結果



- 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ストリームと暗黒衛星銀河 (テスト粒子)の相互作用

- NWストリームを作った元衛星銀河
- 暗黒衛星銀河
  - $M = 10^7, 10^{7.5}, 10^8, 10^{8.5}, 10^9, 10^{9.5} M_{\odot}$
  - NWストリームに円軌道で衝突するように投入
- 使用したコード
  - 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

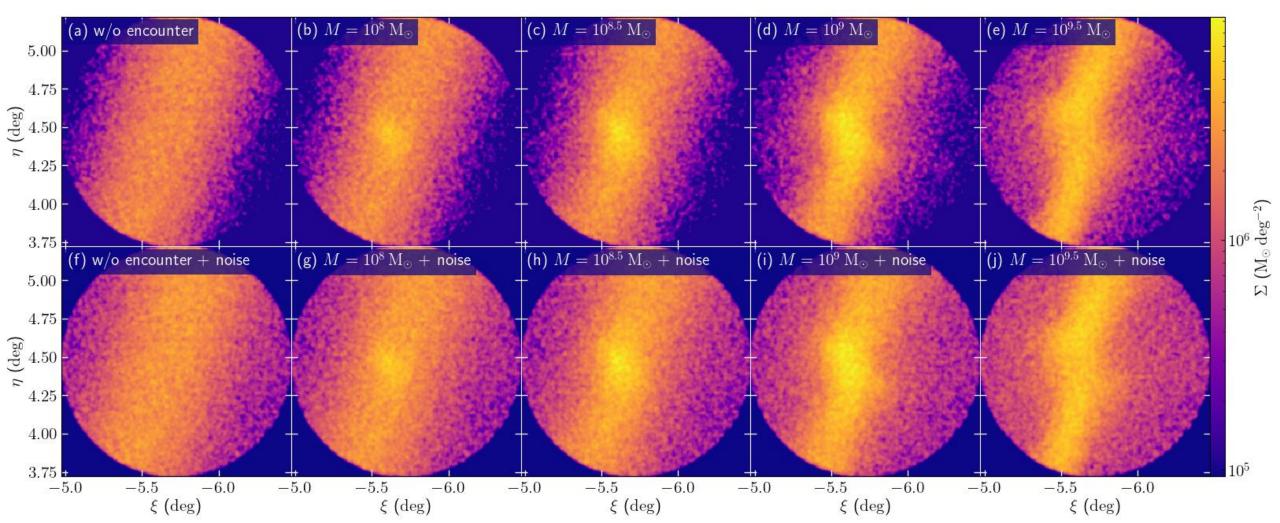






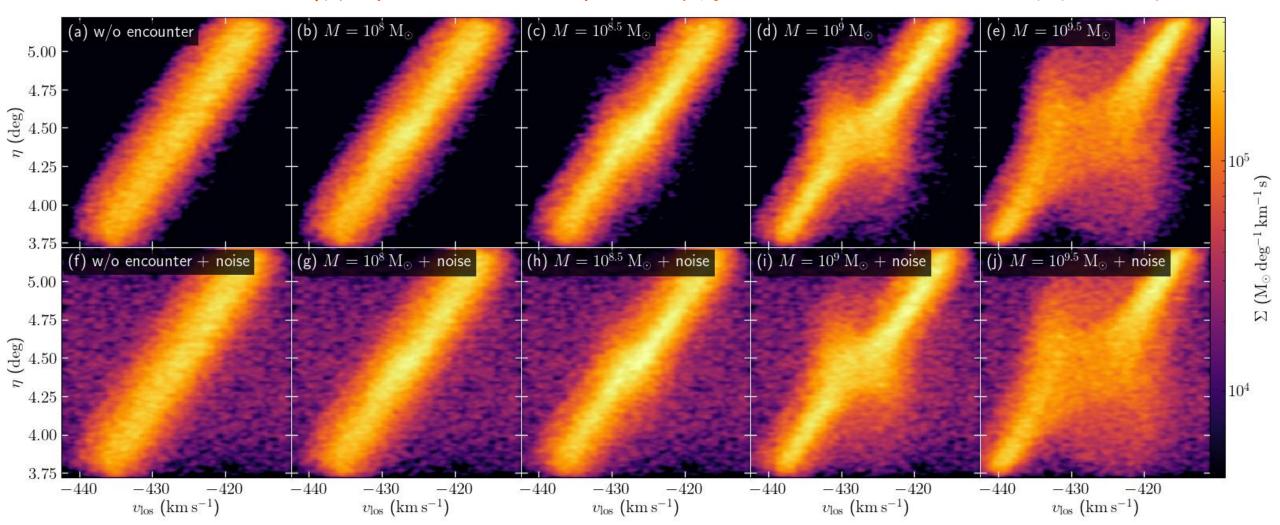
#### HSC視野内の空間分布(下段はS/N=3)

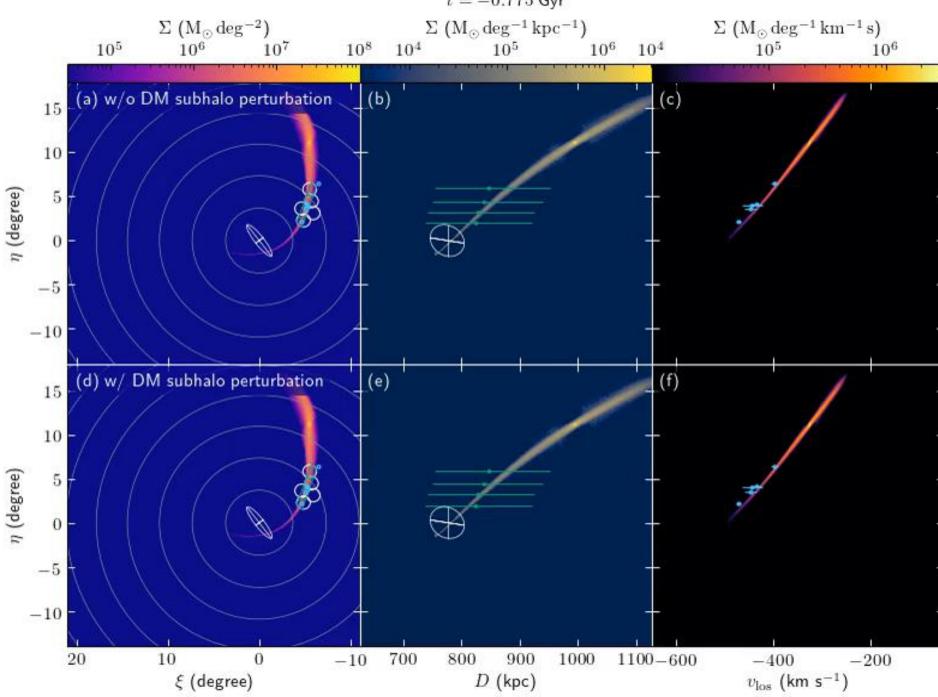
• S/N: ストリーム成分と背景・前景成分の比



#### PFS視野内の速度構造(下段はS/N=3)

• ストリーム幅 (~ 10 km s<sup>-1</sup>) が解像できればギャップ検出可能





#### まとめ

- ・衛星銀河問題の解決に向けて、銀河ハロー中の暗黒衛星銀河の個数 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ストリームと暗黒衛星銀河の衝突実験
  - 暗黒衛星銀河の質量が≤ 10<sup>8</sup>M<sub>☉</sub>では、衝突痕跡の検出は困難
  - 暗黒衛星銀河の質量が≥ 10°M<sub>☉</sub>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~ 1.25 deg<sup>2</sup>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
  - 暗黒衛星銀河衝突の痕跡検出に威力を発揮すると期待できる
- Wisteria/BDEC-01 の Aquarius 上で更なる研究が進行中