

天体形成研究会

IC10のHI gas streamから 探るdark satelliteの存在

宮川銀次郎

筑波大学 数理物質科学研究科 物理学専攻 宇宙理論研究室 M2

Collaborators

筑波大学	森 正夫
東京大学	三木 洋平
千葉大学	桐原 崇宣

目次

1. イントロダクション

- a. Missing satellite problem
- b. IC10のHI gas streamの観測

2. 手法

- a. N体シミュレーション
- b. Smoothed Particle Hydrodynamics
- c. Test particleシミュレーションによるdark satelliteの
軌道探査

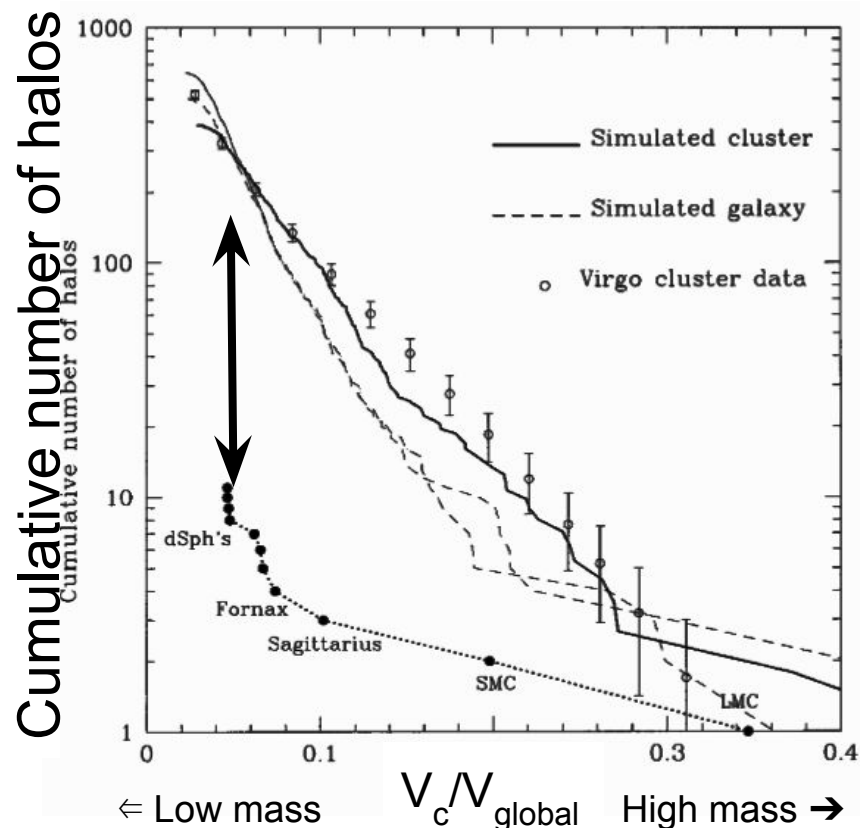
3. 結果・議論

- a. 銀河モデルの作成
- b. シミュレーション結果(preliminary result)

4. Summary・Future work

Missing satellite problem

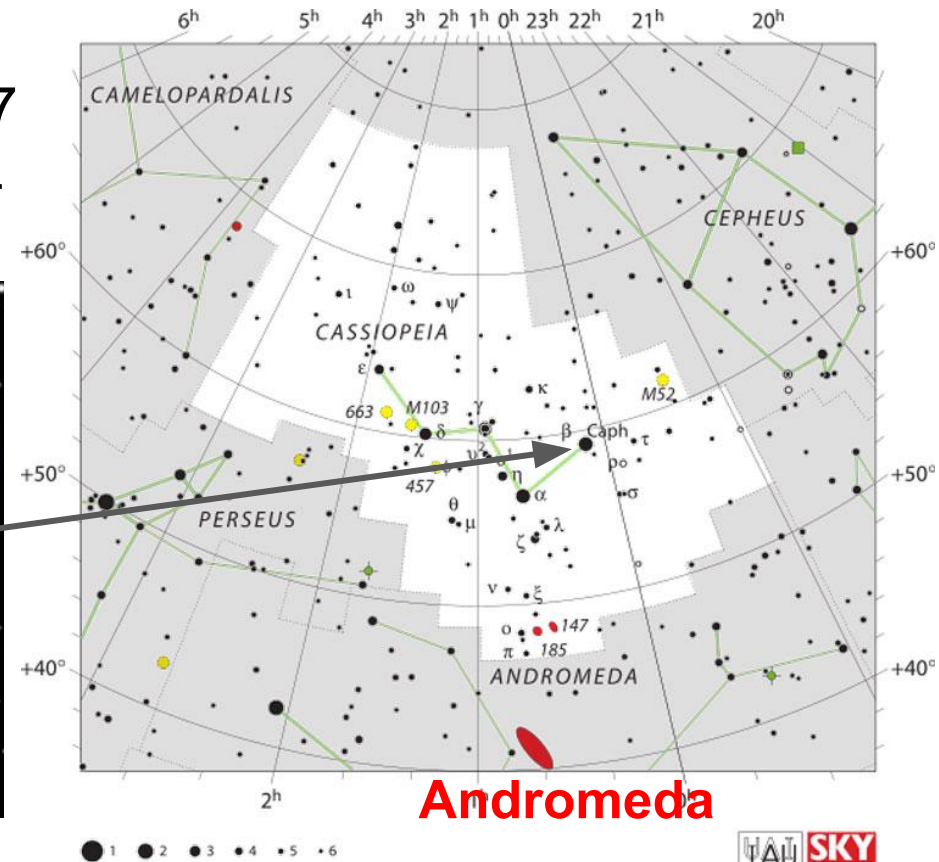
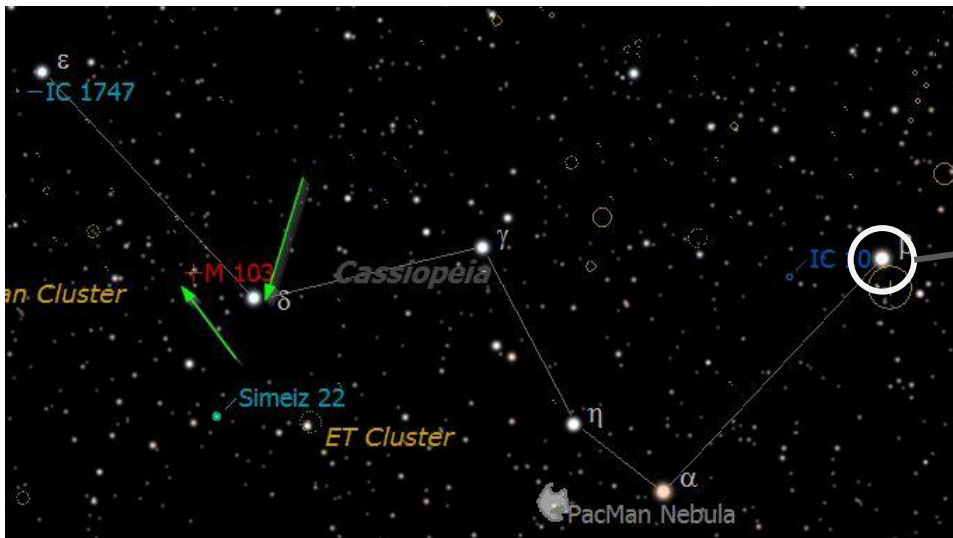
- 近傍銀河群で観測されている矮小銀河の数が、宇宙論の理論モデルに基づくcosmological simulationで予想されるsub dark matter halo(DMH)の個数に比べて非常に少ない (Klypin et al. 1999, Moore et al. 1999).



- ↓
- DMHとガス/DMHのみで構成された“**dark satellite**”の存在が示唆(Gnedin 2000).
- 暗すぎて観測できない矮小銀河が多数存在していることで観測個数のギャップを埋められる？ (Sawara et al. 2013)

Local groupのstarburst銀河: IC10

- IC10の基本情報(Sanna et al. (2008), Nidever et al. (2012), Brunthaler et al. (2007))
 - Proper motion :
 $(v_{\text{LoS}}, v_{\text{E}}, v_{\text{N}}) = (-148 \text{ km/s}, -39 \mu\text{sec}, 31 \mu\text{sec})$
 - Distance : 805 kpc
 - Galactic longitude : $118^\circ.87$
 - Galactic latitude : $-3^\circ.334$



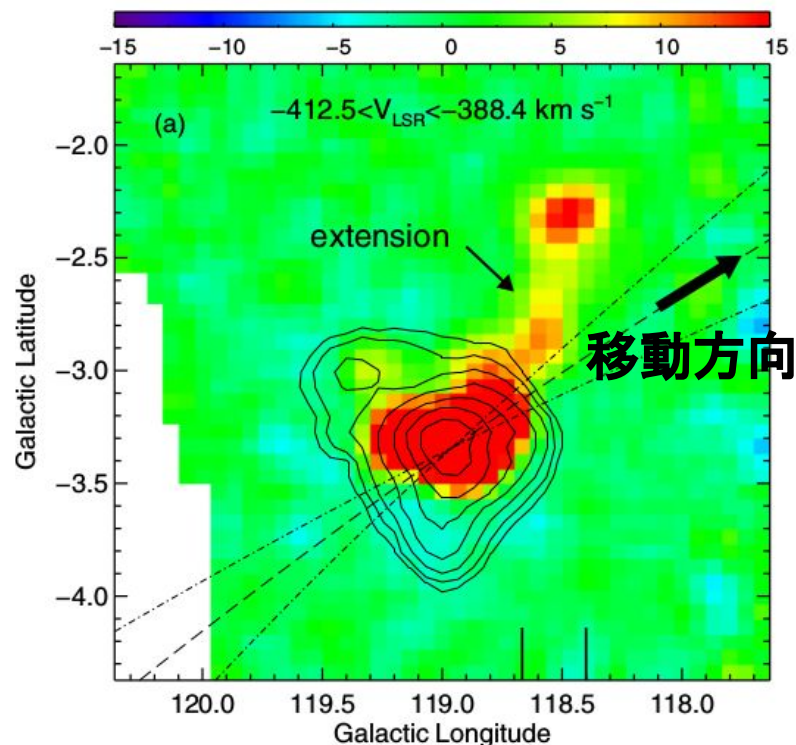
IC10 HI gas streamの起源とは？

IC10 : **Starbursting**-Irr galaxy in M31 system (**~250 kpc from M31**)

- IC10には北西方向に伸びるHI gas streamが付随する
(Nidever et al. 2013; Ashley et al. 2014).
- HI gas streamの起源説はいくつか予想されている
 - a. 銀河間ガスとの相互作用 → streamの伸びる方向が逆
(Proper motion)
 - b. M31との潮汐相互作用**
 - c. IC10近傍の矮小銀河との相互作用**

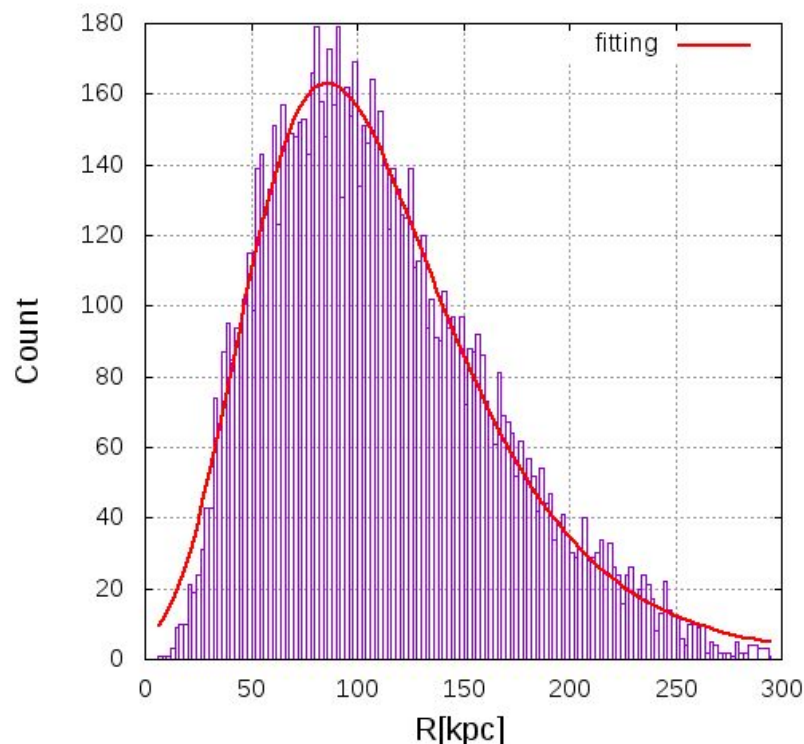
Properties of IC 10 and New HI Extension

Parameter	Value
IC 10 galaxy	
Coordinates (J2000)	$\alpha = 00:20:23.16, \delta = +59:17:34$
Coordinates (Galactic)	$l = 118^\circ 97', b = -3^\circ 33'$
Distance	805 kpc
M_{HI}	$9.5 \times 10^7 M_\odot$
New northern extension	
Length	$\sim 1^\circ 3', \sim 18.3 \text{ kpc}$
Width	$\sim 0^\circ 37', \sim 5.2 \text{ kpc}$
Orientation	$\sim 25^\circ$ west of north
Velocity offset	$\sim 65 \text{ km s}^{-1}$ below systemic
$\langle N_{\text{HI}} \rangle$	$\sim 7 \times 10^{17} \text{ atoms cm}^{-2}$
M_{HI}	$\sim 7.1 \times 10^5 M_\odot$



StreamはM31の潮汐力が働いた結果？

- Brunthaler et al. (2007)によってIC10のproper motionが観測されている.
 - IC10の過去の近点の位置と時間がわかる.
 - M31の潮汐力の寄与を評価できる.
- 近点は現在から1.9Gyr前でM31から約80kpcの距離.



- Hill radius
 - 中心天体の周囲を軌道運動する衛星のポテンシャルが支配的な半径

$$r_{\text{hill}} = \left(\frac{M_{\text{IC10}}}{3M_{\text{M31}}} \right)^{1/3} R_{\text{M31} \rightarrow \text{IC10}}$$

- $r_{\text{Hill}} \sim 5.2$ kpcはHI gas diskの半径 ~ 1 kpcに比べて大きい
 - M31の潮汐力で中心部に大きな影響は出にくい

IC10 HI gas streamの起源とは？

- IC10には北西方向に伸びるHI gas streamが付随する
しかしIC10のHI gas streamに沿った方向に
counterpart(星成分)が見つからない。

c. IC10近傍の矮小銀河

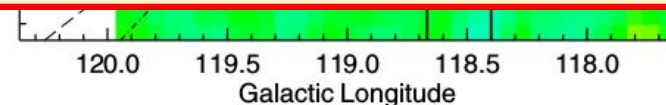
相互作用

● 研究手法：目的

- N 体+SPH(流体) simulationを用いて、
dark satelliteとの衝突によってIC10のHI gas streamを再現し、dark satelliteの存在を示唆する。
- Dark satellite仮説がmissing satellite problemにどの程度影響するかを検証する。

M_{HI}

$\sim 7.1 \times 10^5 M_{\odot}$



研究手法

1. N体シミュレーション
2. Smoothed Particle Hydrodynamics
3. Test particleシミュレーションによる
dark satelliteの軌道探査

N体シミュレーション

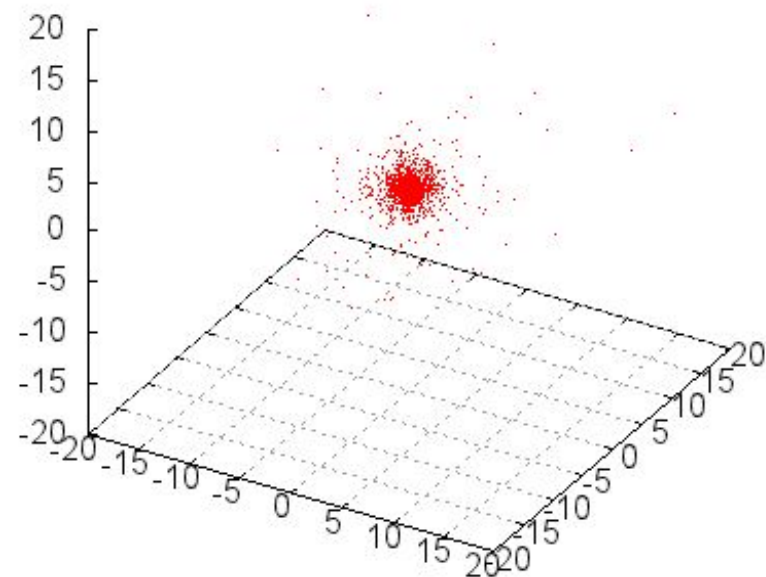
- 連続体を有限粒子数に離散化して、離散点間の重力相互作用を計算して時間発展を追うLagrange法.
- 衝突や合体といった変形問題に強みがある.
- Framework for Developing Particle Simulators (FDPS)を用いた実装を行った(Iwasawa et al. 2016).

相互作用の形式

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i}^N G m_j \frac{(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)}{((\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)^2 + \epsilon^2)^{3/2}}$$

ϵ : Softening parameter
(最近接相互作用の大きさを決める)

力学平衡解(Plummer球)の計算例



SPH法の基礎方程式

- Lucy(1997)とGingold & Monaghan(1977)によって宇宙物理の問題を解くために開発された
流体力学の数値解法.

p	: 密度
\mathbf{v}	: 速度
p	: 圧力
A	: 状態方程式の係数
γ	: 比熱比

1. 密度

$$\rho_i(\mathbf{r}_i) = \sum_j m_j w_{ij}$$

2. 運動方程式

$$\frac{dv_i}{dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} \nabla w_{ij} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \nabla w_{ij} \right)$$

3. エネルギー方程式 $\frac{dA_i}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\gamma - 1}{\rho_i^{\gamma-1}} \sum_j m_j \Pi_{ij} \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i \bar{w}_{ij}$

4. 状態方程式

$$p_i = A_i \rho_i^\gamma$$

$$w_{ij} = w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|, h_i), \bar{w}_{ij} = (w_{ij}(h_i) + w_{ij}(h_j))/2$$

: Kernel function

Dark satelliteの軌道を決めるパラメータ

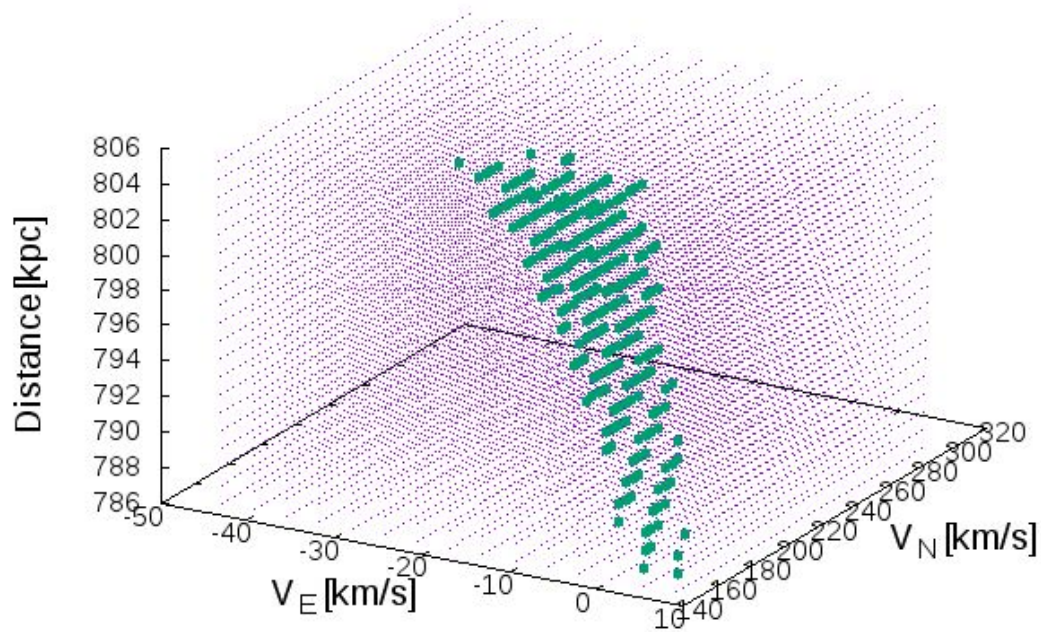
- 6D位相空間(位置3D+速度3D)の情報が必要
 - HI gas streamの先端の現在の位置
 1. 銀経 : $118^{\circ}.53$ (Nidever et al. 2013)
 2. 銀緯 : $-2^{\circ}.35$ (Nidever et al. 2013)
 3. 視線速度 : -65.0 km/s (Nidever et al. 2013)
- Dark satelliteの軌道を一つ決めるためのパラメータ
 4. 地球からの距離 : D
 5. East方向のproper motion : V_E
 6. North方向のproper motion : V_N
- 軌道に要求する条件
 - ✓ M31のDMHに束縛されていること.
 - ✓ IC10の重心から半径1kpc(~星分布のeffective radius)以内に接近すること.
 - ✓ [0, 10Gyr]まで遡ること.

結果・議論

1. IC10とdark satelliteとの衝突時期
2. 銀河モデルの見積もりと作成
3. シミュレーション結果
4. ガス入りdark satelliteの重要性

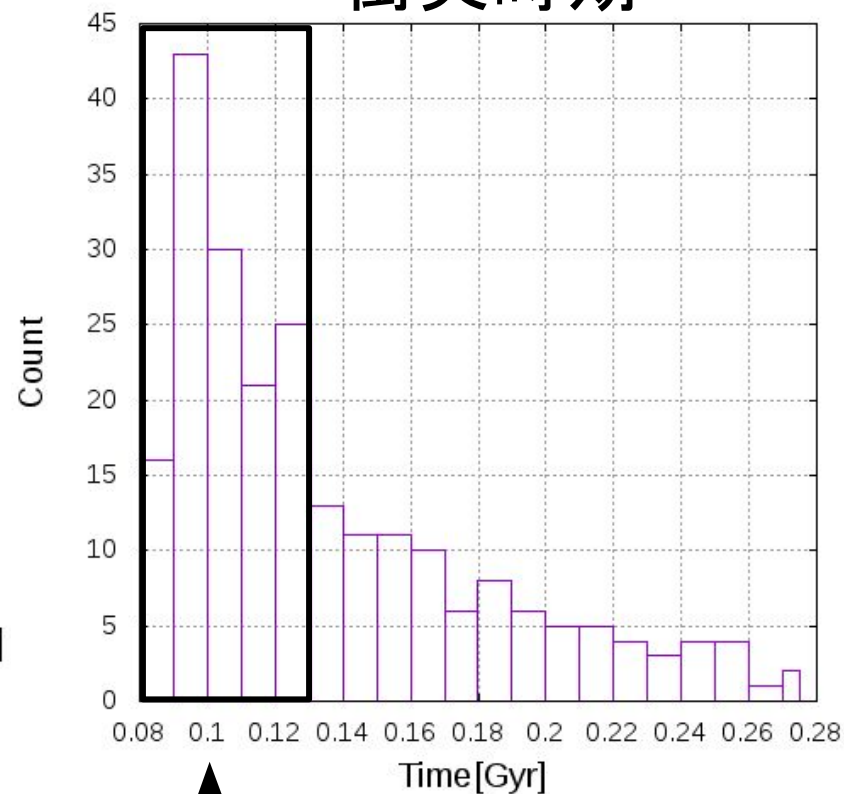
軌道パラメータサーベイの結果

- 全部で12000軌道を探索



- 228軌道/12000が条件をパス
- 衝突時期は100 Myrの時点に多く分布しており, 300 Myrよりも過去に衝突する軌道はなかった.

衝突時期



↑ ~100 Myr

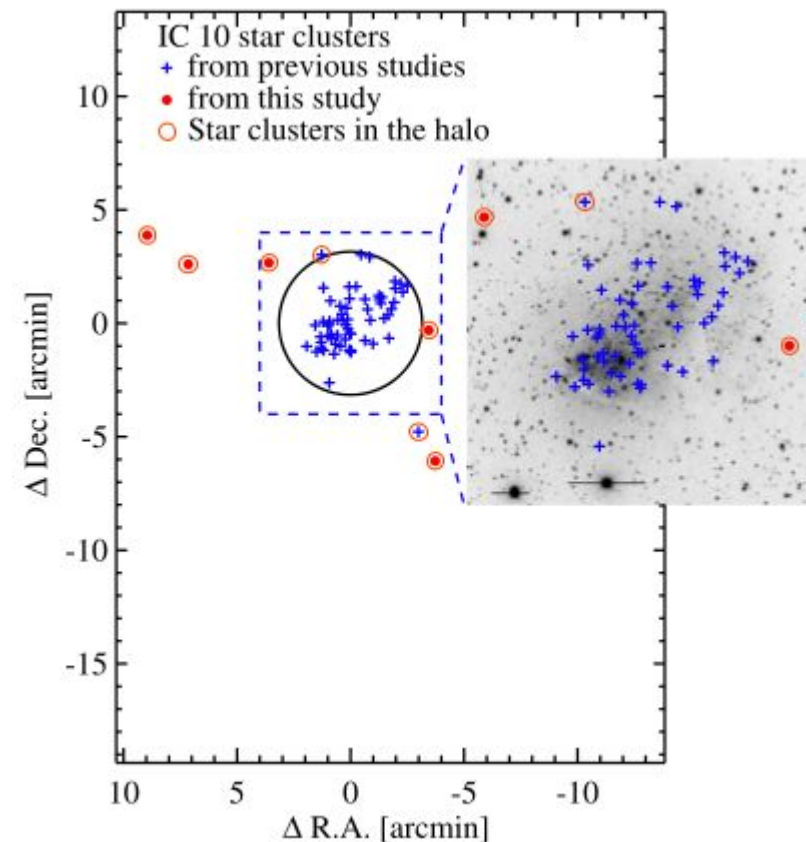
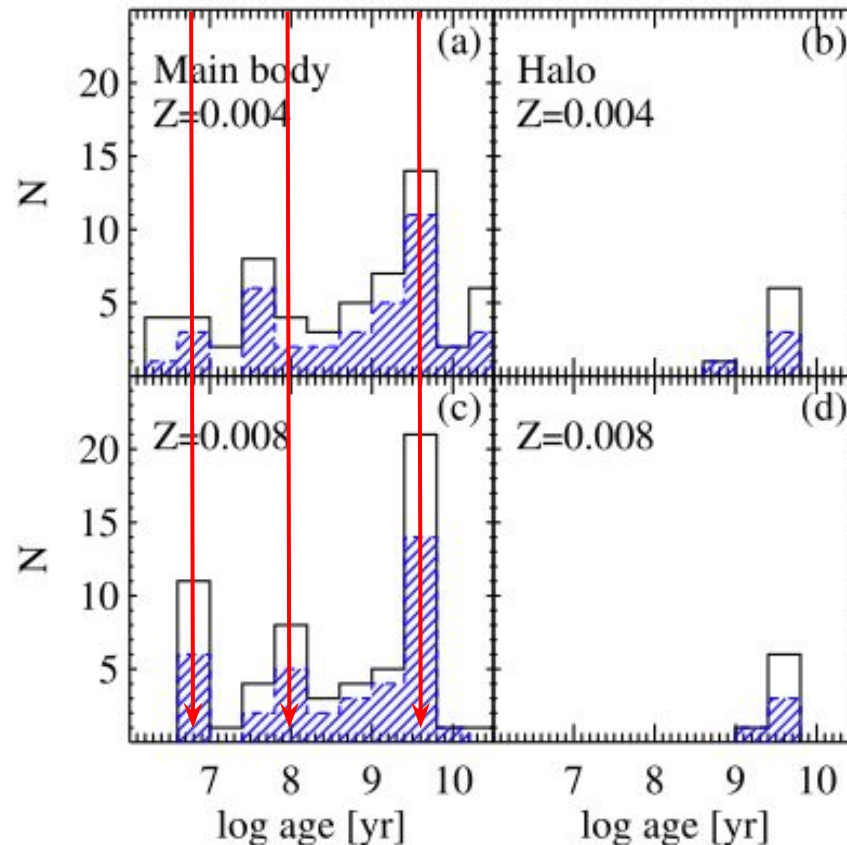
IC10内のstar clusterの年齢

Lim et al. (2015)

- IC10の**main body**と**halo**に付随するstar clusterの年齢分布を計算した(Lim et al. 2015).

→ 100 Myrのピークはsatelliteとの衝突と同時期.

6Myr 100Myr 4Gyr



IC10内のstar clusterの年齢別空間分布

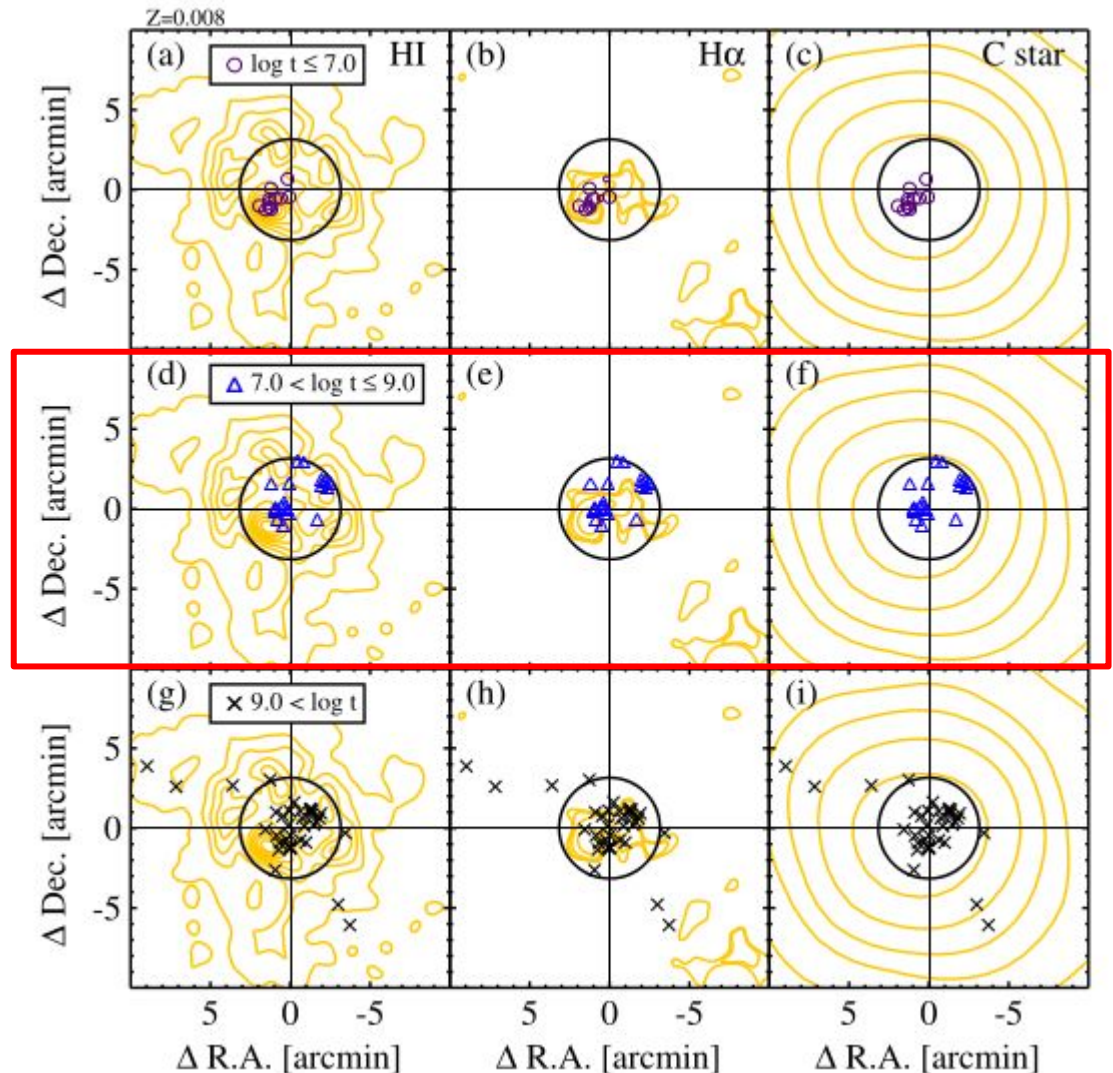
Lim et al. (2015)

100 Myr前に生まれた星は、**2つの領域**に分布している。

1. 銀河中心部
2. **Northwest方向**

→ **Dark satelliteが衝突してきたと予想した方向と同じ方向で星形成がenhanceされている**

→ Disk 1回転にかかる時間 $1.3 \text{ Gyr} > 100 \text{ Myr}$ (projectionされた視線速度を使って)



Gas成分を持ち去るための条件 Mori & Rich (2008)

- Dark satelliteの運動エネルギーが全て円盤を厚くする(速度分散を大きくする)ことに使われたとすると

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \left(\frac{8\pi G^2 \Sigma M_s^2}{M_d v_s^2} \right)^{1/2} \\ &= 34.3 \text{ km/s} \left(\frac{M_s}{10^8 M_\odot} \right) \left(\frac{v_s}{10^2 \text{ km/s}} \right)^{-1} \left(\frac{\Sigma}{10^8 M_\odot / \text{kpc}^2} \right)^{1/2} \left(\frac{M_d}{4 \times 10^7 M_\odot} \right)^{-1/2}\end{aligned}$$

- Scale radiusにおけるガスの脱出速度は

$$v_{\text{esc}}(r) = \left(\frac{2GM(r)}{r} \right)^{1/2} \simeq 81.89 \text{ km/s} \left(\frac{M}{10^9 M_\odot} \right) \left(\frac{r}{1.35 \text{ kpc}} \right)^{-1}$$

ポテンシャルのみでstreamとblobを作ることができるか
→ まずは極端に大きい銀河を衝突させる

IC10とdark satellite, 軌道のモデル

IC10

(Sérsic 1963; Burkert et al. 1995)

- **DMH : Burkert profile**
 - Mass : $5.54 \times 10^8 M_{\odot}$
 - Core radius : 0.51 kpc
 - # of particles : $2^{16}=65536$
(Oh et al. 2015)
- **Stellar disk : Sérsic law**
 - Sersic index : $n = 0.75$
 - **Stellar mass** : $4 \times 10^8 M_{\odot}$
 - Effective radius : 1.35 kpc
 - **Scale height** : 0.27 kpc
 - **Toomre Q-value** : 1.0
 - # of particles : $2^{18}=65536$
(Stephanie et al. 2015)
- **Gas disk : Sérsic law**
 - **Gas mass** : $4 \times 10^7 M_{\odot}$
 - # of particles : $2^{18}=65536$

Dark satellite

(Navarro et al. 1996)

- **DMH : NFW profile**
 - **Mass** : $10^9 M_{\odot}$
 - **Scale radius** : 0.1 kpc
 - # of particles : $2^{16}=65536$
 - Softening length : 7.8125 pc

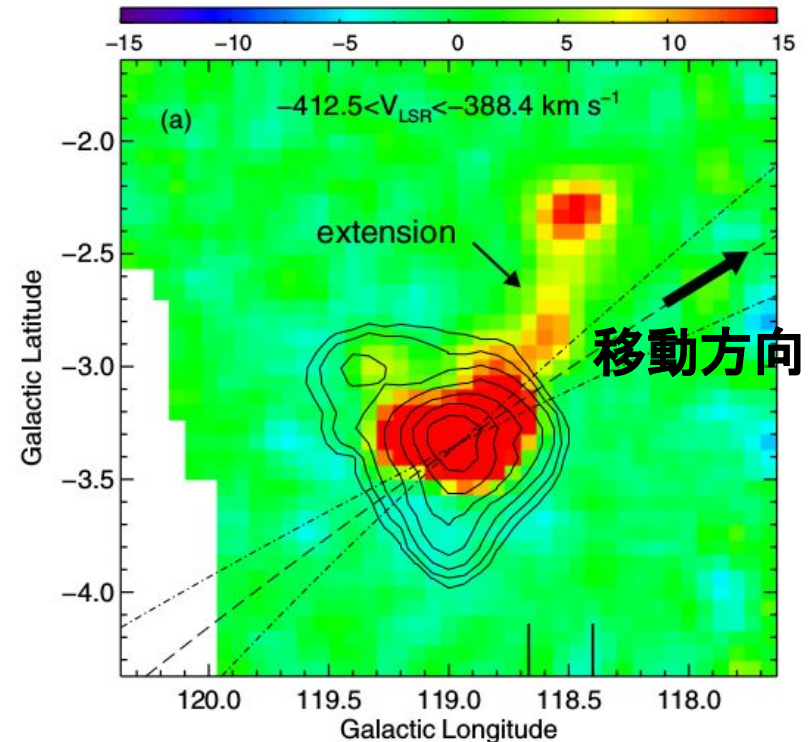
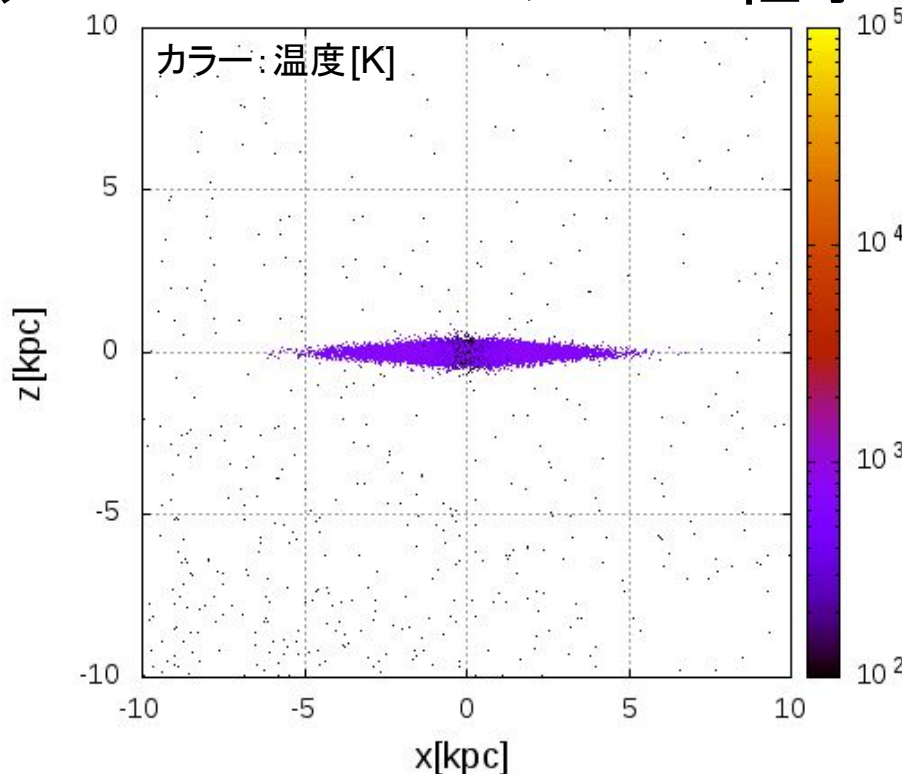
軌道

- IC10 : Disk中心静止
- Dark satellite :
 - ~100 km/sの初期速度
 - 過去0.8Gyr~未来0.2Gyrの計算

銀河初期条件にはMAGI:
many-component galaxy
initializer (Miki & Umemura 2018)
を用いた.

ポテンシャルだけでstreamは作れるか？

黒 : Dark satelliteのDMH粒子



Stream構造が希薄でIC10の本体(Disk)を壊してしまう.

+ Dark satelliteの中にgas blobがみられない.

→ Dark satelliteにもガス成分が必要である.

Ram-pressure-strippingが効くガス質量

Mori & Burkert (2000)

- ホスト銀河中に分布するガスによって、衝突してきた矮小銀河中のガスが剥ぎ取られる条件を求める
- 静水圧平衡ガスの温度, 密度, 圧力はDMH質量 M_0 とスケール半径 r_0 , ポテンシャル $\Phi(r)$ を用いて

$$T = \frac{\mu m_p}{3k_B} \frac{GM_0}{r_0},$$

$$\rho_g(r) = \rho_{g0} \left[-\frac{\mu m_p}{k_B T} [\Phi_d(r) - \Phi_d(0)] \right],$$

$$P = \frac{\rho_{g0} k_B T}{\mu m_p}.$$

Ram-pressure-strippingが効くガス質量

Mori & Burkert (2000)

- Burkert profile中に分布するガスによって，衝突してきた矮小銀河中のガスが剥ぎ取られる条件を求める
- Ram pressureの大きさはホスト銀河と矮小銀河との相対速度 v_s と矮小銀河のガス密度 ρ_s を使って $\rho_s v_s^2$
- Ram pressureがホスト銀河の圧力勾配力よりも大きければram pressureが効く

$$\rho_s v_s^2 > \frac{GM_0 \rho_{g0}}{3r_0}$$

- ρ_s について解き直して半径 r の球内の質量は

$$M_{gs} = 6.28 \times 10^2 \left(\frac{r}{0.1 \text{ kpc}} \right)^{-3} M_\odot \sim 10^3 M_\odot$$

Summary

- HI gas streamの起源としてsatelliteとのmerger説が有力であることを確認した.
 - Satelliteとの衝突によって, IC10の100Myrにおける星形成を促した可能性を示唆した.
-

- **DMHのみの大質量dark satelliteを衝突させても streamとblobを形成することができなかった.**
- Dark satelliteにもガスが必要であることを支持した.
 - Ram pressure strippingが効きはじめるガス質量では冷却時間<自由落下時間であることを見積もった.
 - ガス質量の下限值と上限値に制限をつけられる.
 - IC10本体との金属量の違いについて予言できる (Tadpole galaxyでみられる星形成率の空間的な偏りを説明することができる可能性がある).

Future work

● ガス入りdark satelliteのシミュレーション

.....

- 星形成率の時間進化を見積もる.
 - 観測で予言される100 Myr前の星形成を説明できるか.
- Offcenterへの衝突軌道を考える
 - ポテンシャルの浅いところからガスの剥ぎ取りが可能.
 - 星形成率の空間的偏りを説明できる可能性.
- IC10にM31のポテンシャルを加えて軌道運動させる.
 - Dark satelliteの星・ガス成分の明るさが観測のdetection limit以下となってることを確認する.
- 放射冷却の効果を入れる.
 - 高温領域での膨張を抑制→stream形成を促進
- Missing satellite problemへの寄与を考察する.