

天体形成研究会

銀河衝突とダークマターハロー

筑波大学 物理学類B4
杉原和斗

Abstract

- 研究の背景
NFW profile
アンドロメダ銀河のアンドロメダストリーム・シェル構造
- 先行研究 Kiriwara et al.(2014) の概略
- 研究の計画
- 現在の進捗

NFW profile

- ハロー状に分布するダークマターのモデルとして、Navarro, Frenk, White(1997)が提案したNFWプロファイルがよく使われている。

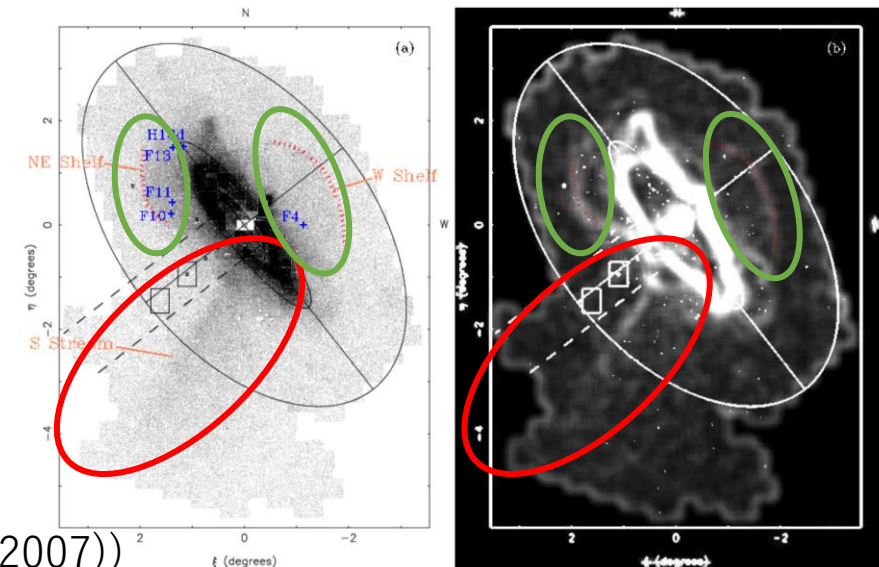
$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2} \quad \rho_s, r_s ; \text{パラメータ} \quad \cdots(1)$$

- ハロー中心部での観測結果の不一致 (Core-Cusp Problem) もあり、中心部に関しては議論が重ねられている。
- 他のモデルでも、基本的には外縁部では密度 ρ は半径 r の3乗に反比例するという点では一致する。(Moore et al. (1998)など)

M31(アンドロメダ銀河)

- アンドロメダ座にある渦巻銀河
- 近年、100 kpc以上の帯状の恒星分布 アンドロメダストリーム(下図赤) が発見された。(Ibata et al., 2001)
- アンドロメダストリームとともに東西に広がる 貝殻状のシェル構造(下図緑) は過去の矮小銀河の衝突の痕跡であることが、N体シミュレーションによる結果で調べられてきた。(Fardal et al., 2007 ; Mori & Rich, 2008)
- アンドロメダストリームはダークマターハローの外縁部まで伸びていることから、密度の観測が困難であった外縁部での密度分布をN体シミュレーションで考えることができる。

Irwin et al.(2005)のM31周辺のRGBの数密度分布(左)と、同データにSobelフィルタをかけたもの(右)。(Fardal et al.(2007))



Kirihara et al. (2014)

- Kirihara et al. (2014)では、

$$\rho_{DMH}(r) = \frac{\rho_{s,\alpha}}{\frac{r}{r_{s,\alpha}} \left(1 + \frac{r}{r_{s,\alpha}}\right)^{\alpha-1}} \dots(2)$$

(ただし、 $\alpha > 2$)

として α を変え、シミュレーションを行い、観測結果と比較している。

なお、 $r_{s,\alpha}$ $\rho_{s,\alpha}$ は観測結果と矛盾ないように $M(7.63\text{kpc}), M(125\text{kpc})$ の質量を固定して算出している。

Kirihara et al. 2014

- パラメータの細かい部分は後述

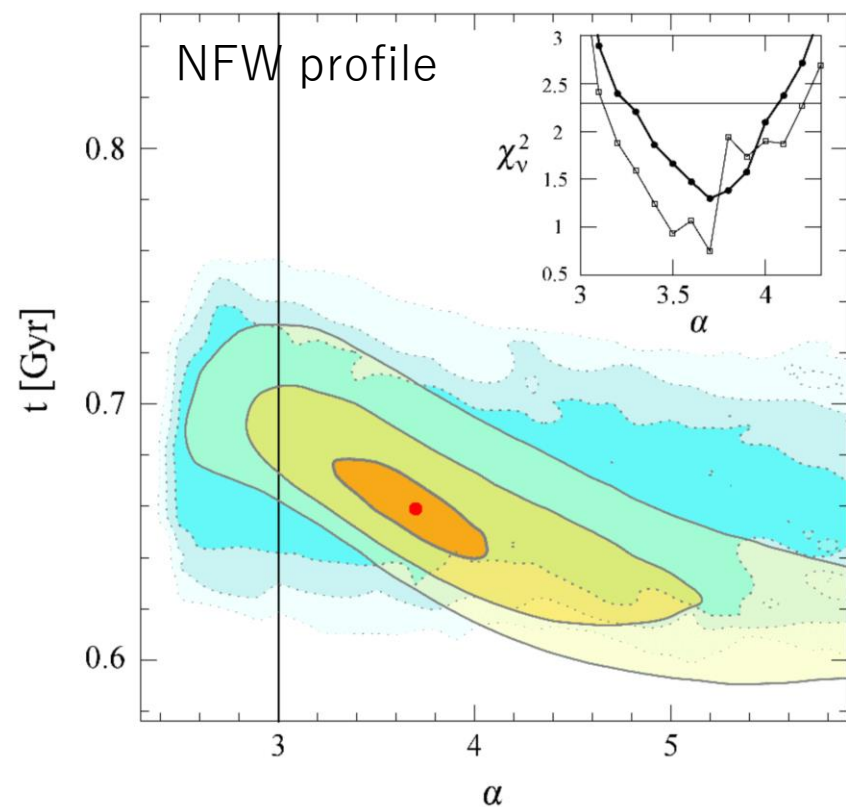
M31

ハロー：(2) 式
バルジ：Hernquist Model
ディスク：指数関数分布
($R_d=5.40\text{kpc}$, $z_d=0.60\text{kpc}$, $M_d=3.66\times 10^{10}M_\odot$)

矮小銀河

Plummerモデル
粒子数：245,760
質量： $2.2\times 10^9M_\odot$
スケール長：1.03kpc

- シミュレーションの結果。



図はシミュレーション結果と観測結果との差 (χ^2) を表したもの

縦軸：時間 横軸： α

橙色：アンドロメダストリーム（表面密度）

水色：M31の東西のシェル（エッジの位置）

での比較

線は内側から1 σ 、2 σ 、3 σ 。

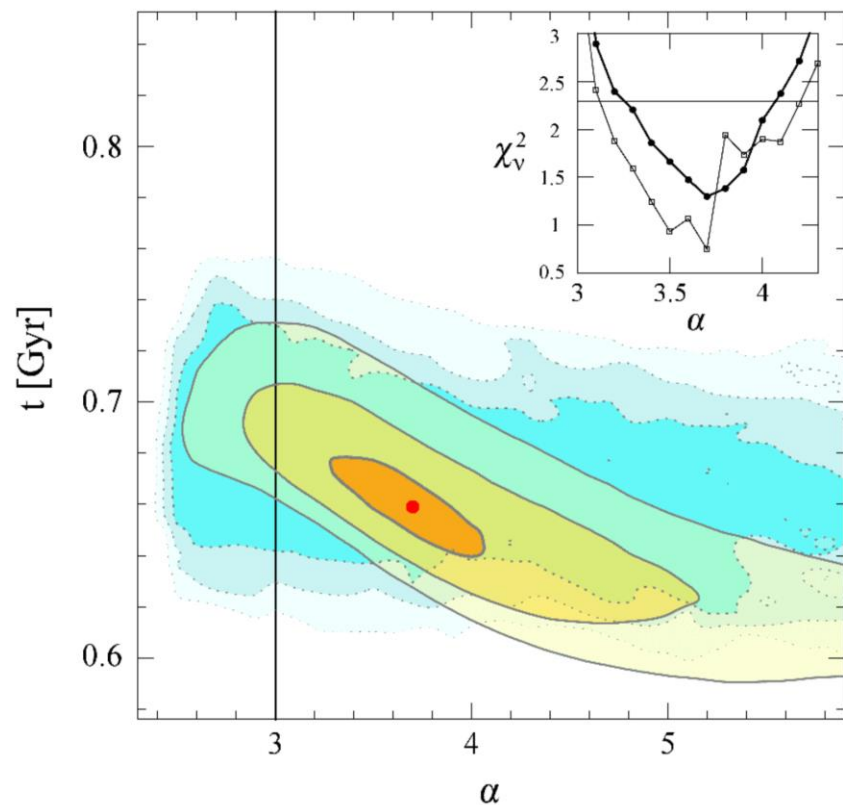
右上図は

縦軸： χ^2 の最小値 横軸： α

●：高解像度のデータ

□：低解像度のデータ

Kirihara et al. 2014



- 図からストリーム、シェルともに再現可能なのは
 $3.2 < \alpha < 4.1$
であり、
最も再現できるのは
 $\alpha = 3.7$
である。
- 既存のモデルでは観測結果を再現することができない。
- これは球対称の分布を仮定しており、
三軸不等の場合の検証が必要。

研究の計画

- Plummer model
作成
安定性の確認
- 先行研究の再現（矮小銀河とM31のN体衝突シミュレーション）
NFWのハロー、Hernquistのバルジのみ ←現在
指数関数分布のディスクの追加
- 軸対称ハロー密度分布でのシミュレーション
- 観測結果との比較コード作成

三軸不等の密度分布

- NFW profileをもとに、以下のようなポテンシャルを考える。

$$\Phi(x, y, z) = -4\pi G \rho_s r_s^2 \frac{\ln(1 + r'/r_s)}{r'/r_s} \quad \dots(3a)$$

$$r' = \sqrt{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2} \quad \dots(3b)$$

- 最初は $a = b = 1$ の円盤軸対称モデルで計算を実行する。
- 基本的には KiriHara et al.(2014), Fardal et al.(2006) と同様のモデルでパラメータ c を変えながら、シミュレーションを行う予定。

Plummer modelの作成

- Plummer model は以下の密度分布に基づくmodelである。

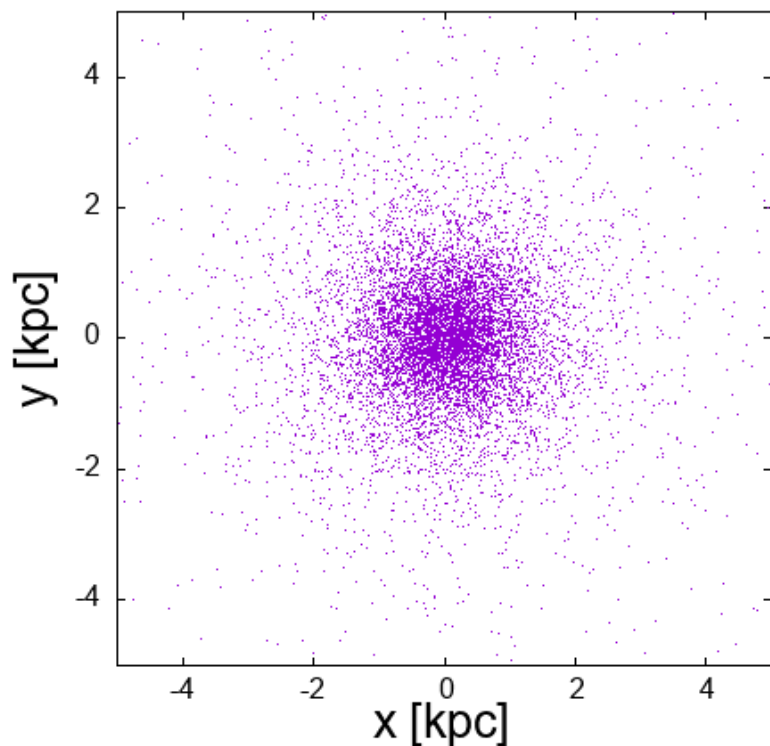
$$\rho(r) = \frac{M}{\frac{4\pi}{3}R^3} \left(1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)^{-5/2} \quad \dots(4)$$

- 質量 $M = 2.2 \times 10^9 M_{\odot}$, スケール長 $R = 1.03 \text{ kpc}$
これらはKirihara et al(2014), Fardal et al(2006)で使われているのと同じ値である。以下基本的には定数などはKirihara et al(2014)から引用した。
- このモデルは自己重力の定常解として知られている。
- S.J.Aarseth(1974) の作成方法でN体での分布を作成した。
粒子数は安定性の確認では10,000体、銀河衝突では1,000体である。

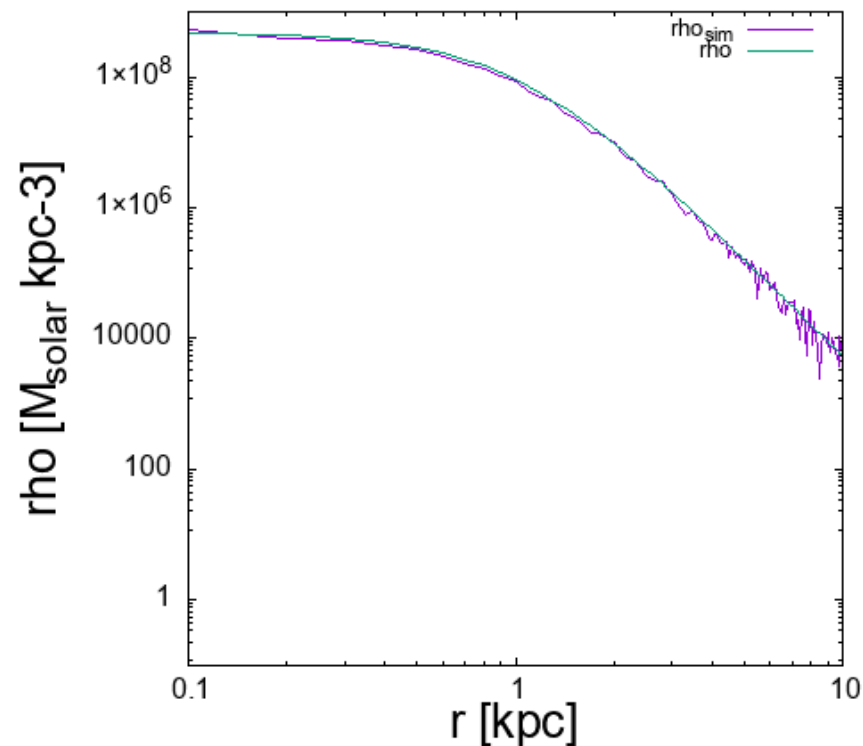
Plummer modelの安定性

- Dynamical timeが125Myr（中心密度を使用）程度なことから、約600Myr時間発展させた。Leap-frog法、ソフトニングパラメータ：0.01 kpc

t=0 [Myr]



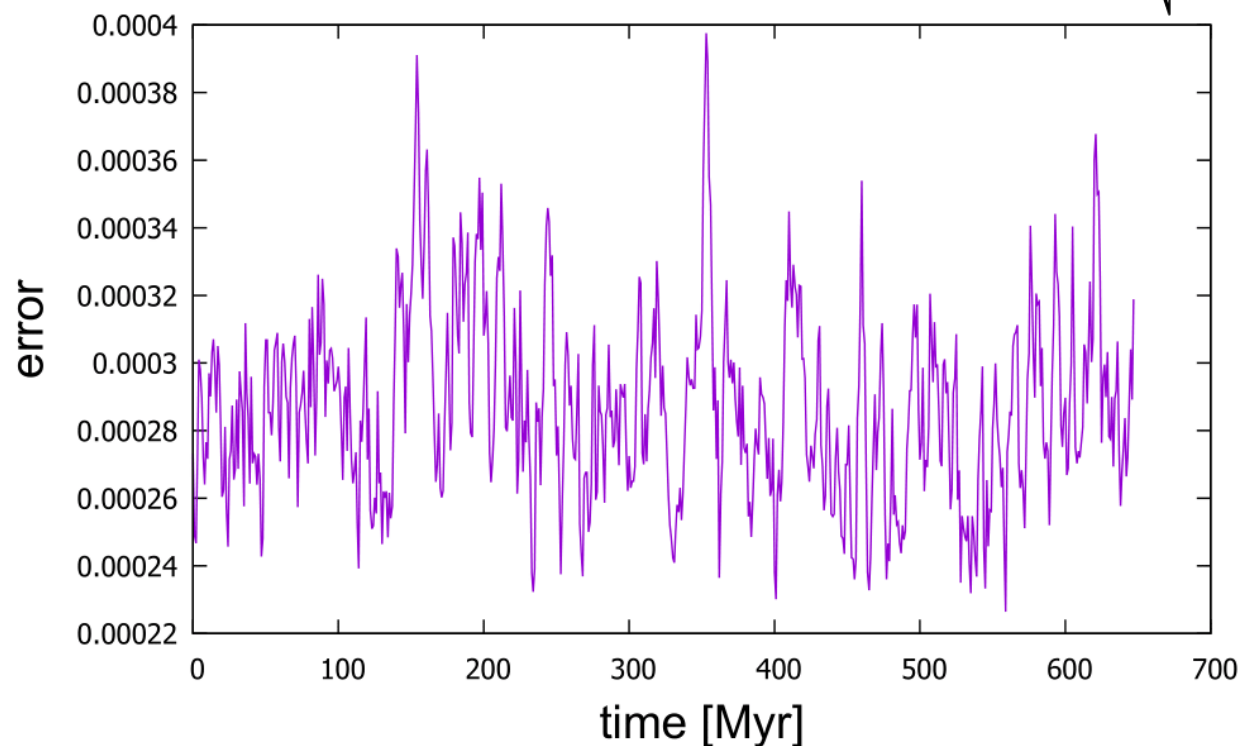
t=0 [Myr]



Plummer modelの安定性__2

- Dynamical timeが125Myr（中心密度を使用）程度なことから、約600Myr時間発展させた。

$$error = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{r=0 \sim 10 kpc} \left(\frac{\rho_{sim}(r) - \rho(r)}{\rho(r)} \right)^2} \quad \dots(5)$$



銀河衝突シミュレーション

- 先ず、先行研究を再現する。
- 時間発展はLeap-frog法を用いた。
dt=10⁴[yr] , ソフトニングパラメータ : 0.01 kpc, 粒子数 : 1,000体

- ハローはNFW profile

$$r_s = 7.63 \text{ kpc}, \quad \rho_s = 6.17 \times 10^7 M_\odot \quad (M_H = 8.8 \times 10^{11} M_\odot)$$

- バルジはHernquist model

$$r_B = 0.61 \text{ kpc}, \quad M_B = 3.24 \times 10^{10} M_\odot$$

$$\rho(r) = \left(\frac{M_b}{2\pi r_b^3} \right) \frac{1}{\frac{r}{r_b} \left(1 + \frac{r}{r_b} \right)^3} \dots (6)$$

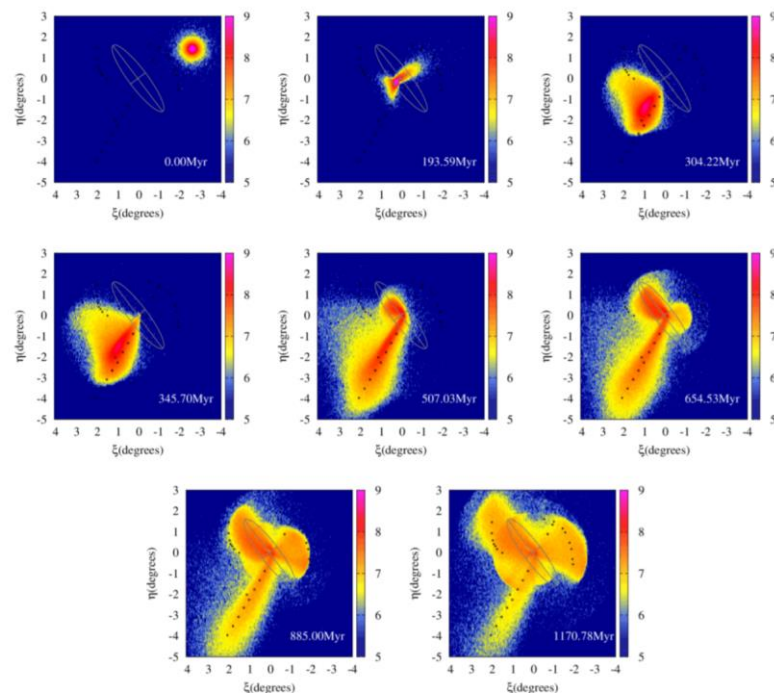
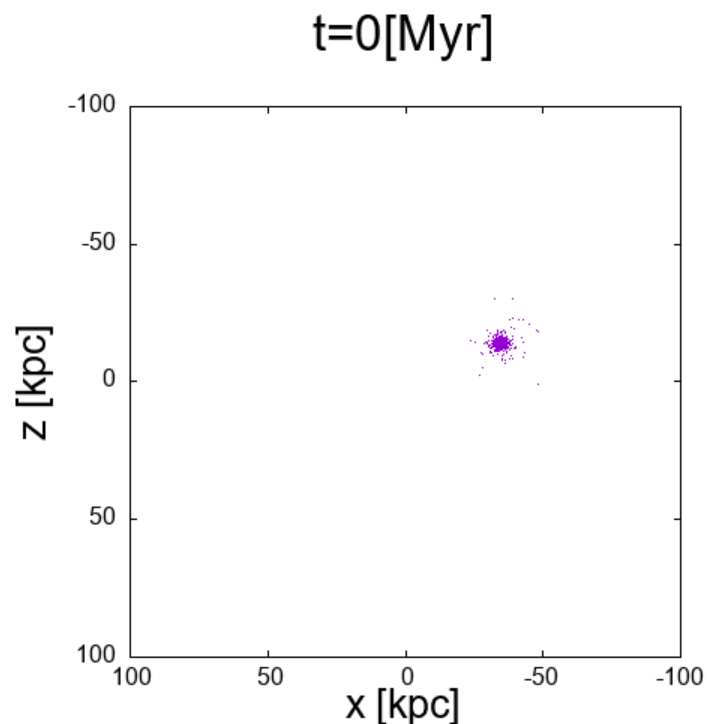
- ディスクは一旦なしで（最終的には指数関数分布の予定）

- 矮小銀河
初期位置
初速度

$$\begin{aligned} &(-34.75, 19.37, -13.99) \text{ kpc} \\ &(67.34, -26.12, 13.50) \text{ km/s} \end{aligned}$$

銀河衝突シミュレーション__2

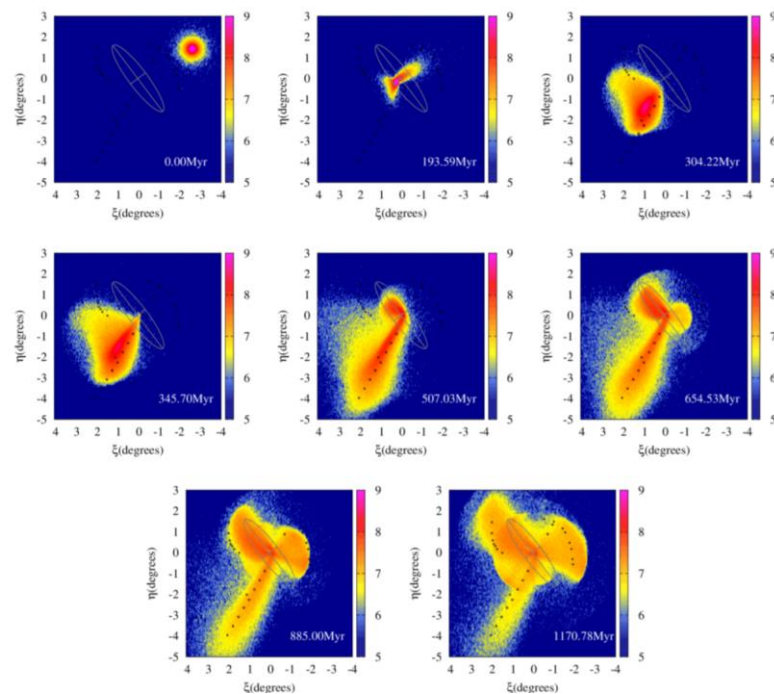
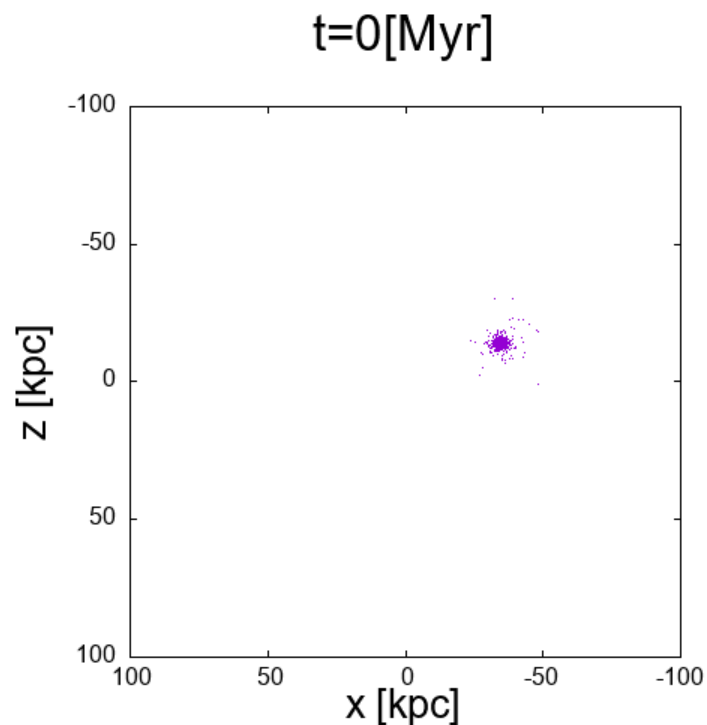
▶ 左が1 Gyr時間発展させたシミュレーションの結果です。



Kirihara et al.(2014)より,ディスク・粒子数を除き同条件での衝突シミュレーション
それぞれ、 0.00, 193.59, 304.22,
345.70, 507.03, 654.53,
885.00, 1170.78 [Myr] の時間発展後

銀河衝突シミュレーション__3

- ▶ 左が 1 Gyr 時間発展させたシミュレーションの結果です。



- ▶ 今の段階でのシミュレーションは問題ないと考えています。
- ▶ しかし、 t_{relax} が短いので、粒子数をさらに増やす必要がある。

今後

- 指数関数ディスクの導入
 - 軸対称での検証
 - 観測結果との比較コードの作成
-
- 既存のCDMモデルの中で観測結果を再現することが可能かどうかを考える。