

# Milky Way の thick disk 形成シミュレーションと Missing satellites problem

佐々木竜志(筑波大学 博士前期課程2年)

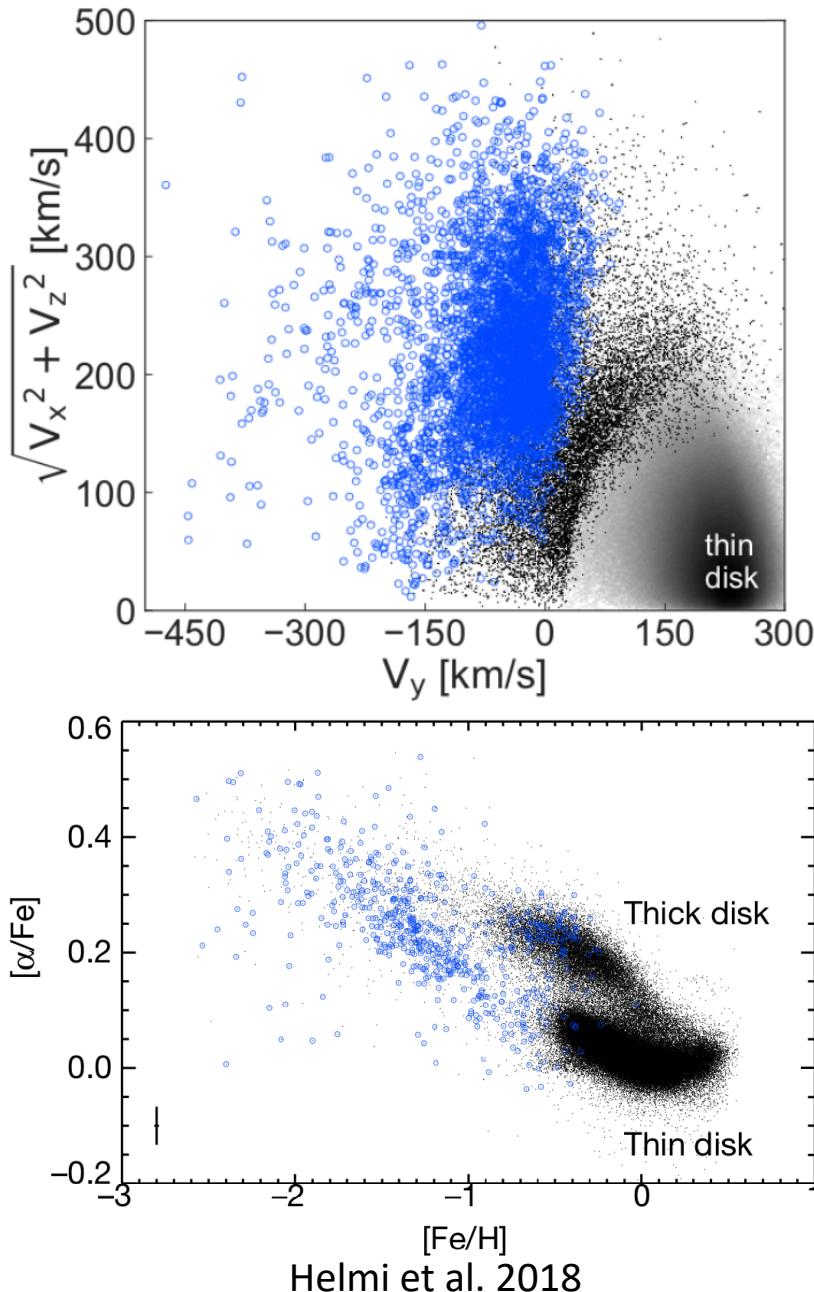
共同研究者

森正夫(筑波大学)

三木洋平(東京大学)

# Gaia-Enceladus

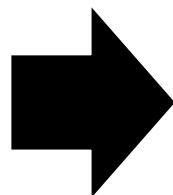
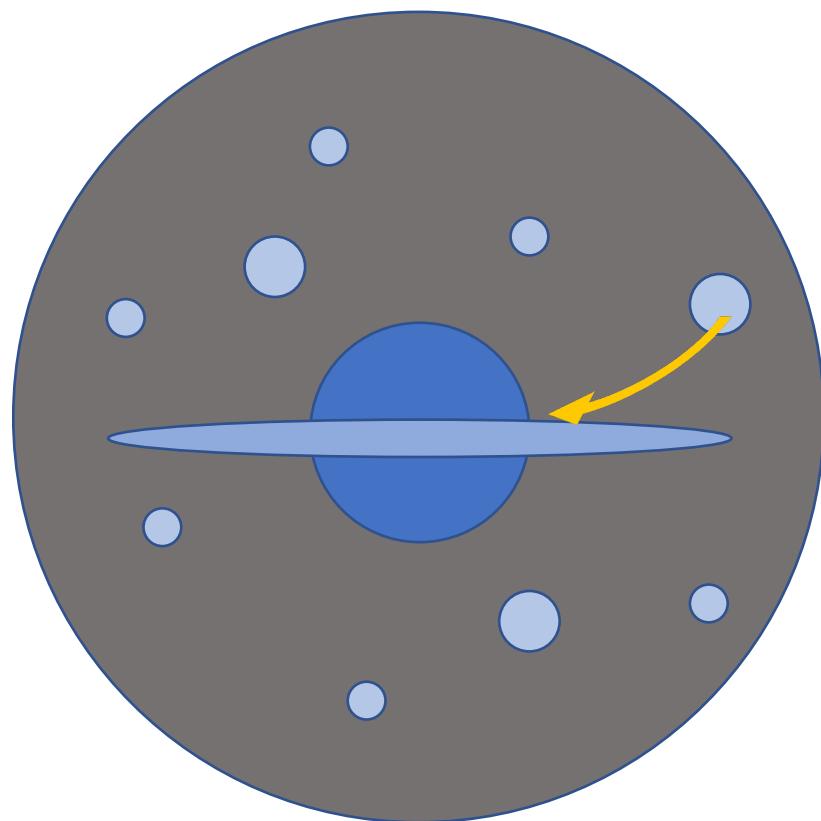
- ▶ Gaia Data Release 2のデータより得られた太陽近傍(2.5 kpc内)星をplot(右上図)
- ▶ **Gaia-Enceladus**は10Gyrほど前に Milky Way(MW)に衝突したと考えられている銀河である。
- ▶ このMWとGaia-Enceladusの衝突が thick diskの形成に寄与していると考えられている。



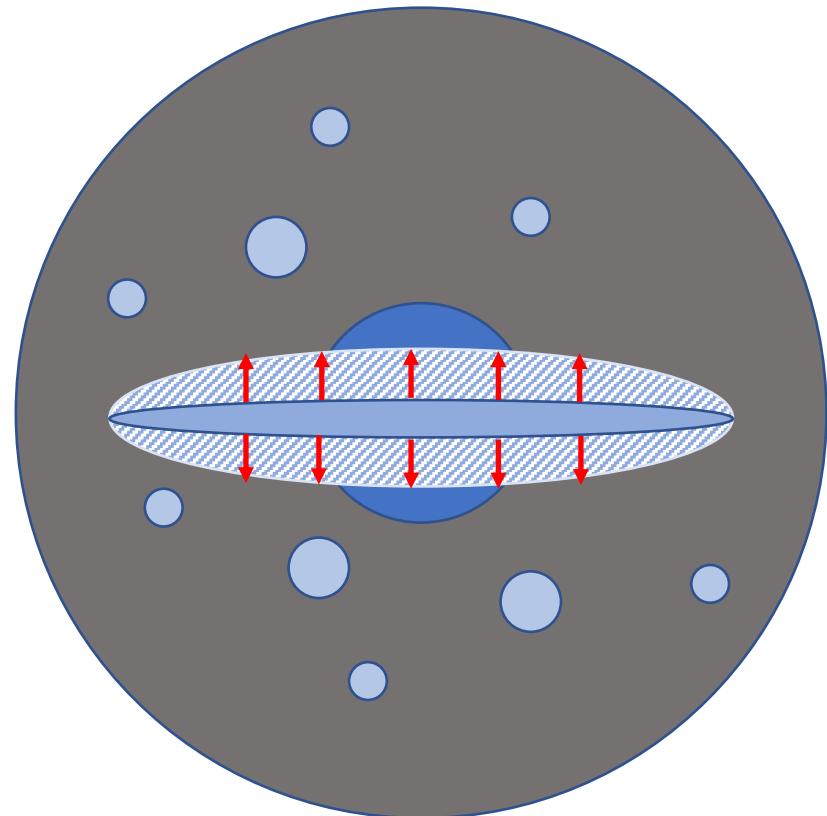
# 研究概要

- MWとSatellitesの衝突シミュレーションを行い、 thick diskの形成を再現する。

Satellite衝突前



Satellite衝突後

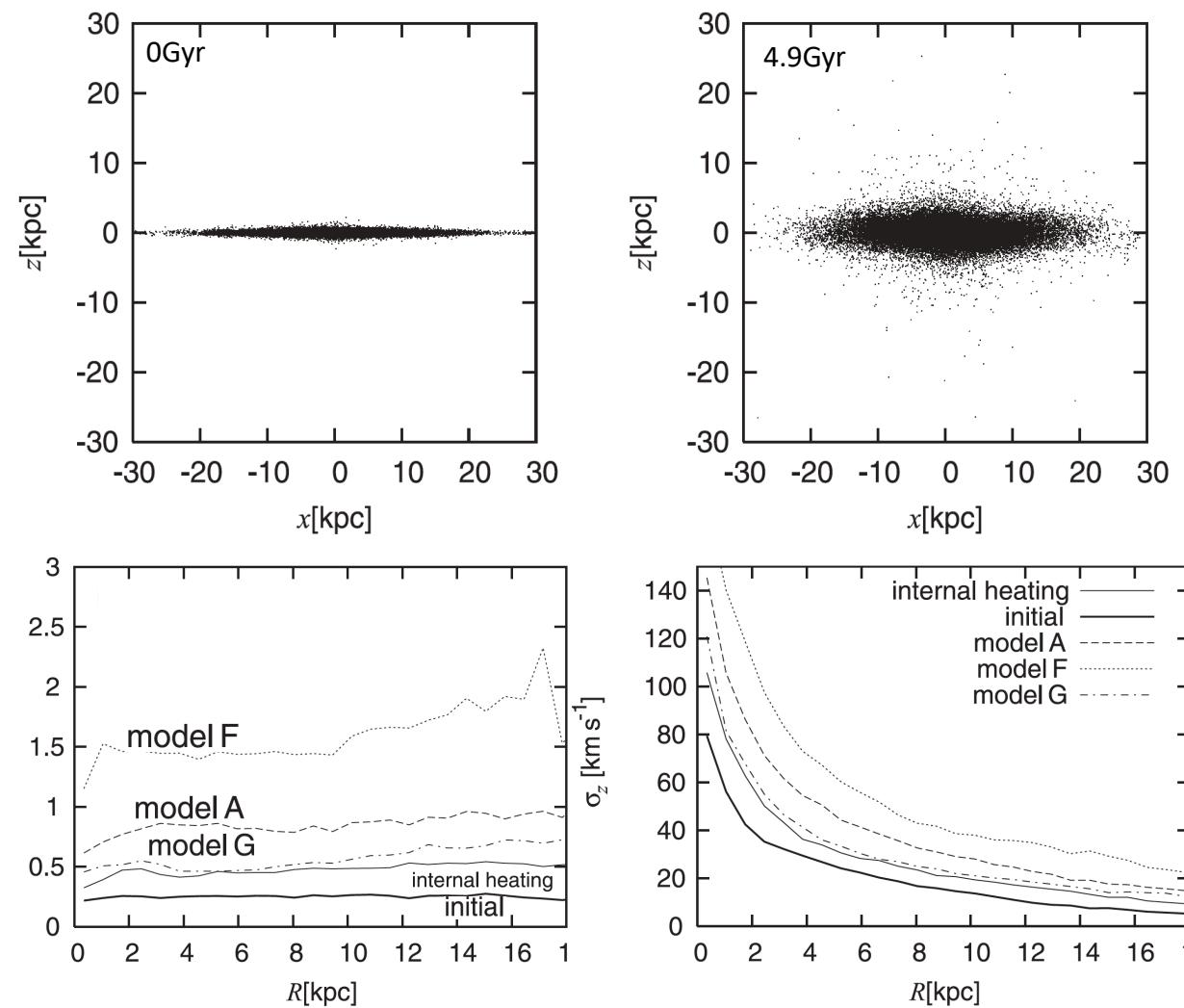


# 先行研究(Hayashi&Chiba. 2006)

Symbol	Value
Disk:	
$N_d^*$	46000
$M_d$	$5.6 \times 10^{10} M_\odot$
$R_d$	3.5 kpc
$Z_d$	245 pc
$Q_\odot$	1.5
$R_\odot$	8.5 kpc
$\epsilon$	70 pc
Bulge:	
$M_b$	$1.87 \times 10^{10} M_\odot$
$a_b$	525 pc
Halo:	
$M_h$	$7.84 \times 10^{11} M_\odot$
$\gamma$	3.5 kpc
$r_c$	84 kpc

\* The number of particles used for the disk.

Model	Number of subhalos	$a$ [kpc]	$M_{\text{high}}$ [ $M_\odot$ ]	$M_{\text{low}}$ [ $M_\odot$ ]]
point-mass models with $\beta = 0$				
A	784	70	$10^8$	$10^8$
F	318	87.5	$10^9$	$10^8$
G	313	280	$10^9$	$10^8$



- 衝突する Satellites が重いほど、また衝突する機会が多いほど、Disk heating の寄与は大きい。
- Satellites の衝突が thick disk の形成に寄与していると考えられる。

# 先行研究との比較と改善点

	先行研究の問題点	改善点
初期条件	シンプルモデル (Satellite分布 : Hernquist)	<b>Cosmological simulation</b>
Mass resolution	不一致 →力学摩擦が作用 ( $m = 5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^7 M_{\odot}$ )	統一 ( $m = 10^5 M_{\odot}$ )
粒子数	不十分 →人工的な2体緩和が作用 ( $N_{\text{disk}} = 46000$ )	<b>粒子数を増やす(少し改善)</b> <b>(<math>N_{\text{disk}} = 680000</math>)</b>

# mass resolutionの決定

- 緩和時間

$$t_{relax} \sim \frac{N}{8\log N} t_{dyn}$$

“N体シミュレーションの時間制約”

緩和時間>注目しているタイムスケール

- mass resolutionの設定

$$N_{disk} = 680000 (m = 10^5 M_\odot)$$

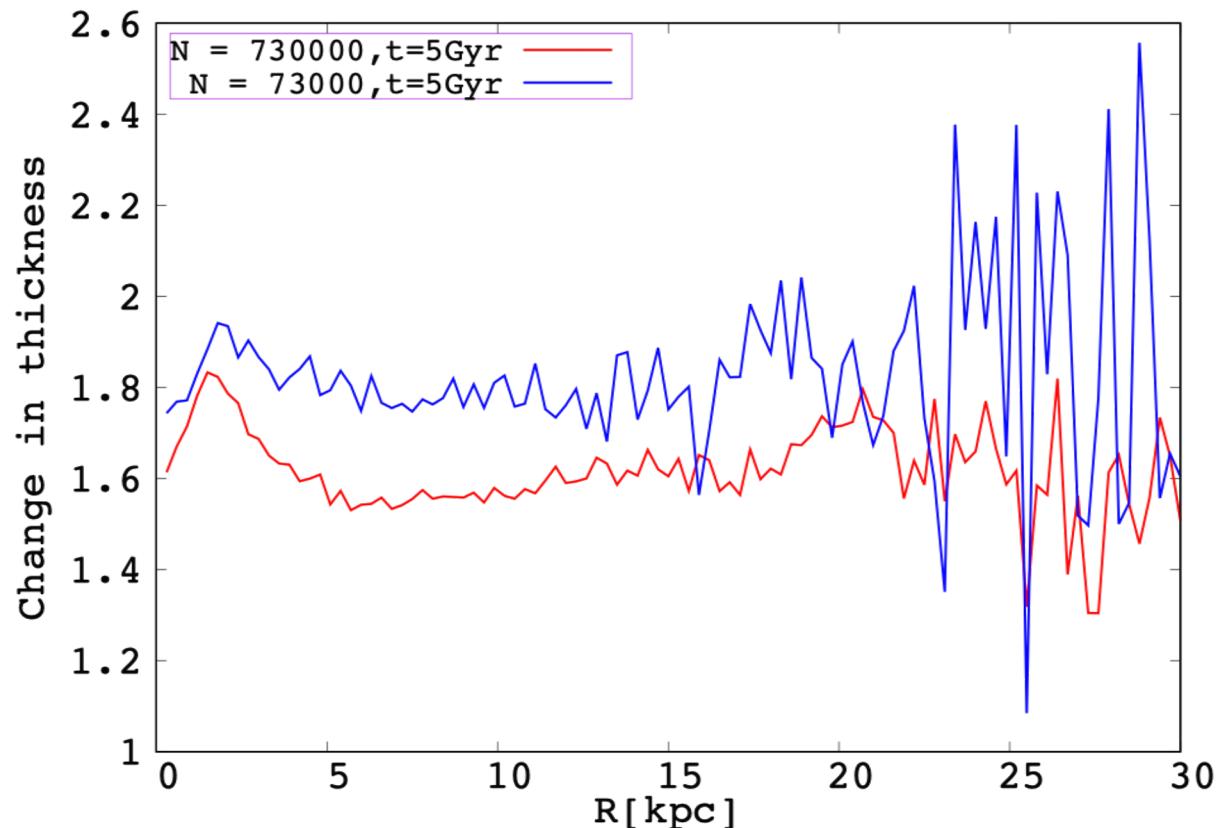
$$N_{bulge} = 50000$$

$$\rightarrow t_{relax} = 202.33 (= 9.51 Gyr)$$

$$N_{disk} = 68000 (m = 10^6 M_\odot)$$

$$N_{bulge} = 5000$$

$$\rightarrow t = 20.2 (= 0.95 Gyr)$$



$t = 5\text{Gyr}$ でのdiskの厚みを初期条件で規格化したもの

# 宇宙論的N体シミュレーション

- Phi-1

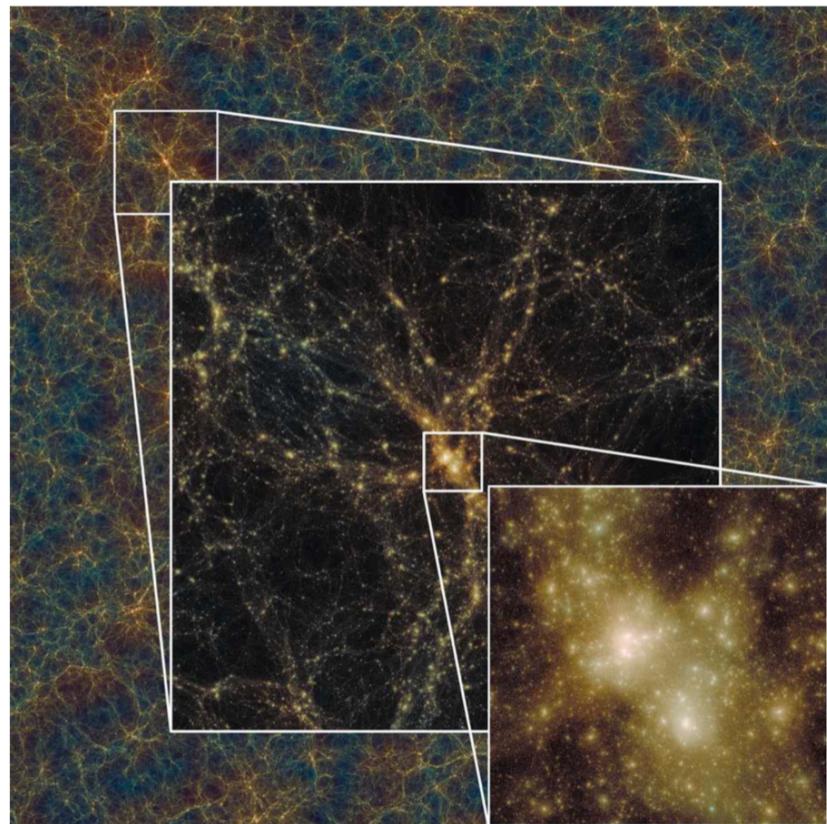
- Box size  $L = 32.0 [Mpc/h]$
- Particles  $N = 2048^3$
- Mass resolution  $m = 3.28 \times 10^5 [M_\odot/h]$

- Number of Halo

$$N_{sat} = 9614324 (z = 0)$$

- Massive Halo ( $M > 10^{12} M_\odot$ )

$$N_{mas\ sat} = 250 (z = 0)$$



# MW like dark Haloの選定

- Watkins (2019)よりMWのhaloのパラメータを採用。

- Halo - NFW profile

$$M_{vir} = 1.54^{+0.75}_{-0.44} \times 10^{12} M_{\odot}$$

$$R_{vir} = 300 \text{ kpc}$$

$$R_s = 17.86 \text{ kpc}$$

Condition1.  $1.1 \times 10^{12} \leq M \leq 2.29 \times 10^{12}$

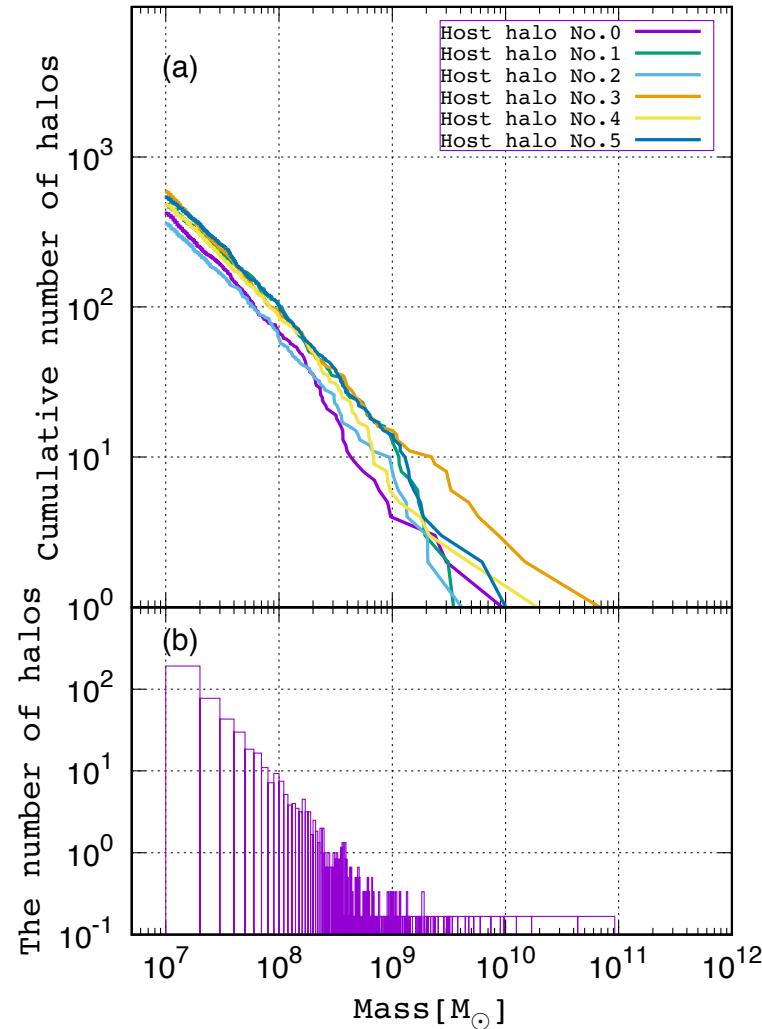
Condition2.  $270 \leq R_{vir} [\text{kpc}] \leq 330$

Condition3.  $16.07 \leq R_s [\text{kpc}] \leq 19.64$

Condition4. There is not more than the lower limit mass of MW in 3Mpc

表 1 MW like な銀河一覧

	$M_{vir} [M_{\odot}]$	$R_{vir} [\text{kpc}]$	$R_s [\text{kpc}]$	Number of satellites
Host0	$1.129 \times 10^{12}$	273.65	17.34	498
Host1	$1.582 \times 10^{12}$	306.27	17.94	524
Host2	$1.256 \times 10^{12}$	283.55	19.00	379
Host3	$1.413 \times 10^{12}$	294.88	19.61	656
Host4	$1.524 \times 10^{12}$	302.40	17.05	546
Host5	$1.317 \times 10^{12}$	288.11	19.51	575



# MW like dark Haloの選定

- Watkins (2019)よりMWのhaloのパラメータを採用。

- Halo - NFW profile

$$M_{vir} = 1.54^{+0.75}_{-0.44} \times 10^{12} M_{\odot}$$

$$R_{vir} = 300 \text{ kpc}$$

$$R_s = 17.86 \text{ kpc}$$

Condition1.  $1.1 \times 10^{12} \leq M \leq 2.29 \times 10^{12}$

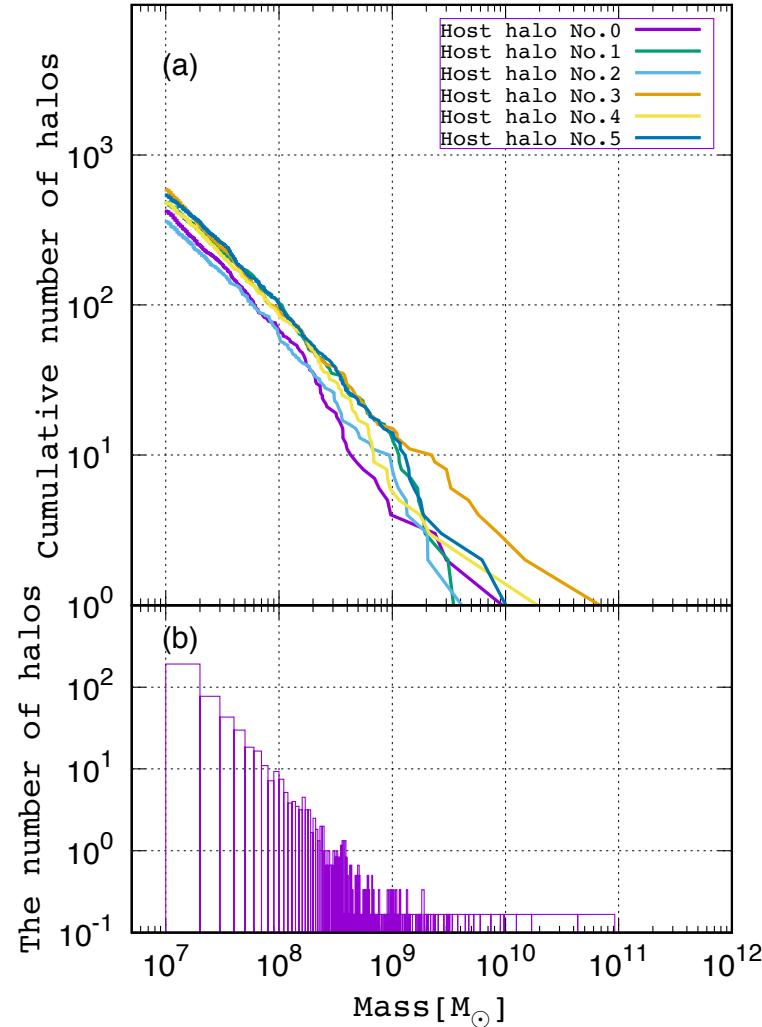
Condition2.  $270 \leq R_{vir} [\text{kpc}] \leq 330$

Condition3.  $16.07 \leq R_s [\text{kpc}] \leq 19.64$

Condition4. There is not more than the lower limit mass of MW in 3Mpc

表1 MW like な銀河一覧

	$M_{vir} [M_{\odot}]$	$R_{vir} [\text{kpc}]$	$R_s [\text{kpc}]$	Number of satellites
Host0	$1.129 \times 10^{12}$	273.65	17.34	498
Host1	$1.582 \times 10^{12}$	306.27	17.94	524
Host2	$1.256 \times 10^{12}$	283.55	19.00	379
Host3	$1.413 \times 10^{12}$	294.88	19.61	656
Host4	$1.524 \times 10^{12}$	302.40	17.05	546
Host5	$1.317 \times 10^{12}$	288.11	19.51	575



# 銀河モデルとシミュレーション設定

## Host 銀河モデル

- Halo - NFW profile(**External gravitational force**)

$$M_{vir} = 1.54^{+0.75}_{-0.44} \times 10^{12} M_{\odot}$$

$$R_{vir} = 300 \text{ kpc}$$

$$R_s = 17.86 \text{ kpc}$$

- bulge - Hernquist profile

$$M_{bulge} = 5 \times 10^9 M_{\odot}$$

$$R_{bulge} = 1 \text{ kpc}$$

$$N_{bulge} = 5 \times 10^4$$

- disk - exponential disk

$$M_{disk} = 6.8 \times 10^{10} M_{\odot}$$

$$R_{disk} = 3 \text{ kpc}$$

$$h_{disk} = 0.28 \text{ kpc}$$

$$N_{disk} = 6.8 \times 10^5$$

**dark haloのスピン軸をdisk回転軸に合わせたものを基準とする。**

## Satellites モデル

- Satellite - NFW profile

$$n_{sat} = 656$$

$$M_{max} = 6.775 \times 10^{10} M_{\odot}$$

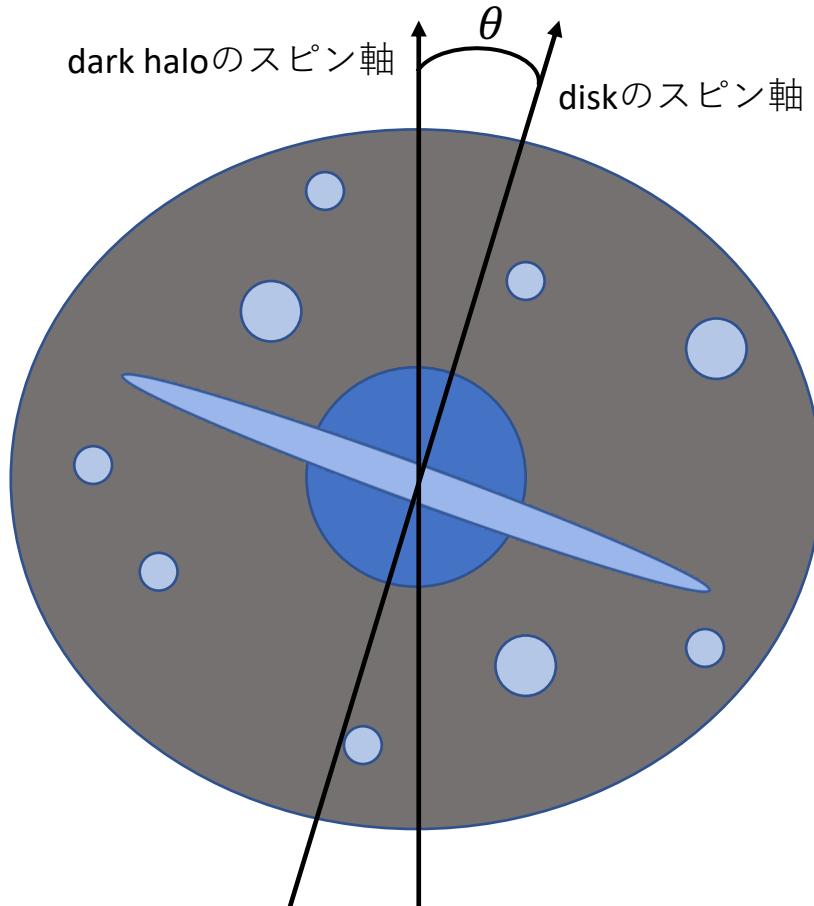
$$M_{sat all} = 1.59 \times 10^{11} M_{\odot}$$

## シミュレーション設定

- 時間積分法 : Leap-Frog 法

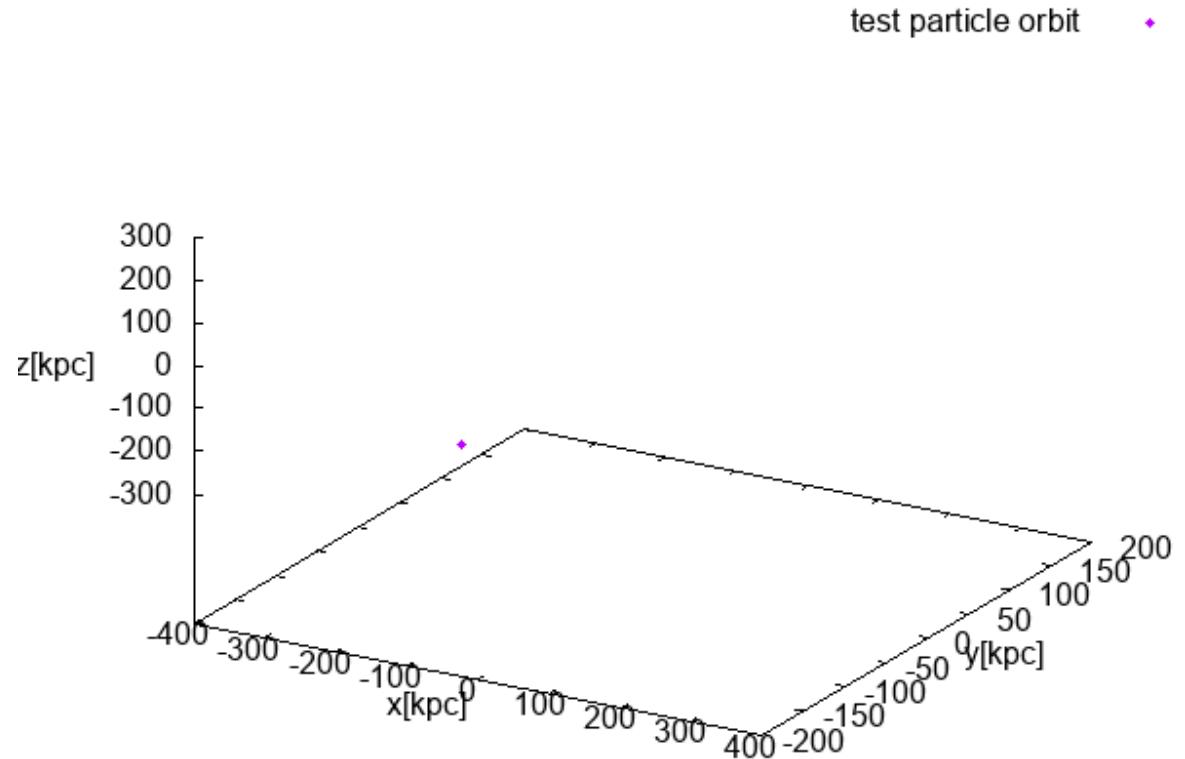
- Softning parameter : 7.8 pc

- Integration time : ~ 5 Gyr (Time step ~ 0.184 Myr)

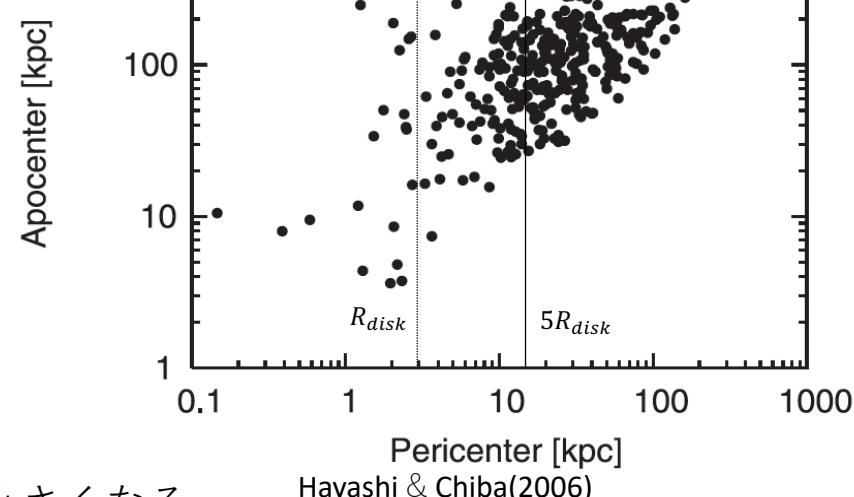
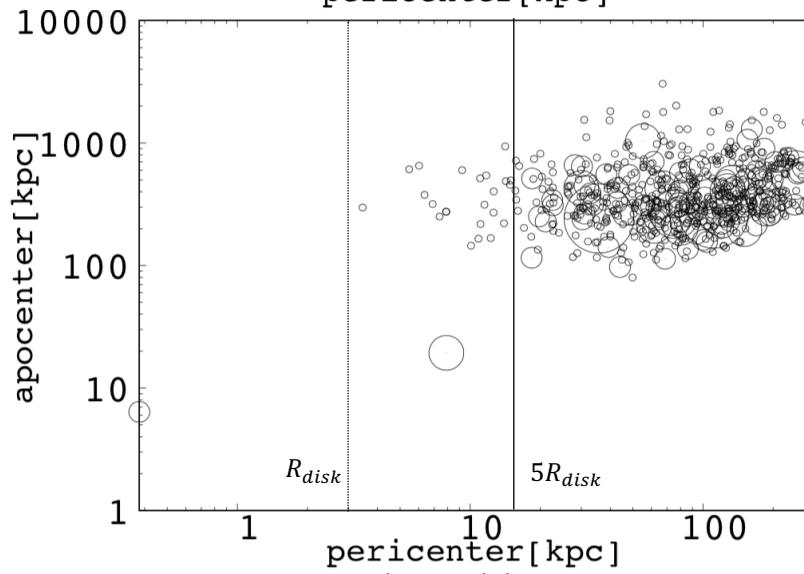
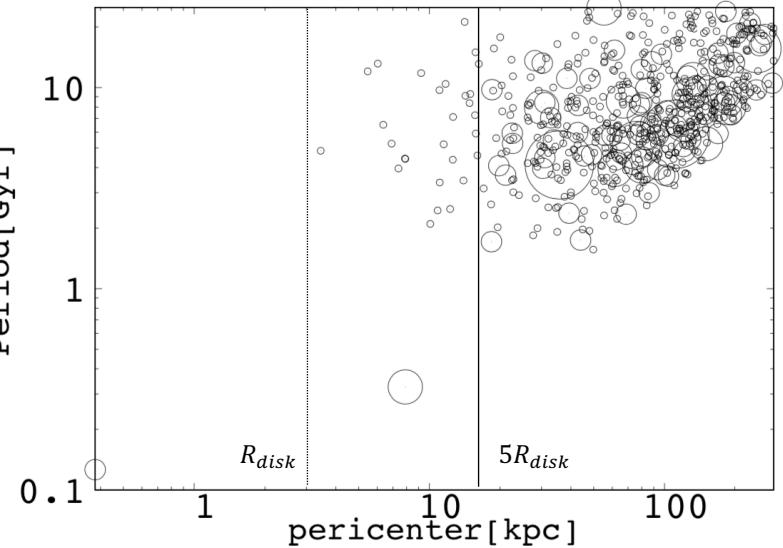
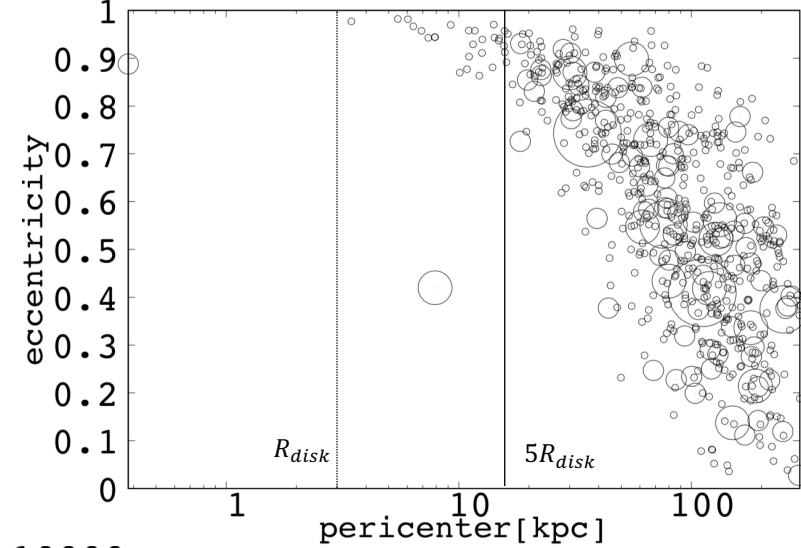
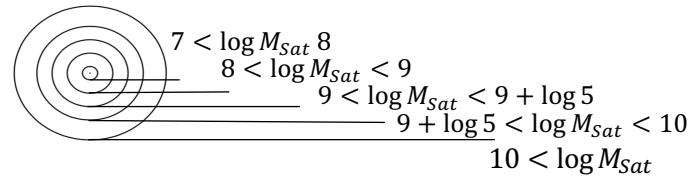


# Test particle simulation

- ・ 時間積分法: Leap-Frog 法
- ・ NFW profileの外場を作用
- ・ 各Satellitesの軌道から、Satellitesの近点、遠点、周期等を求める。



# Test particle simulation result( $z = 0$ )



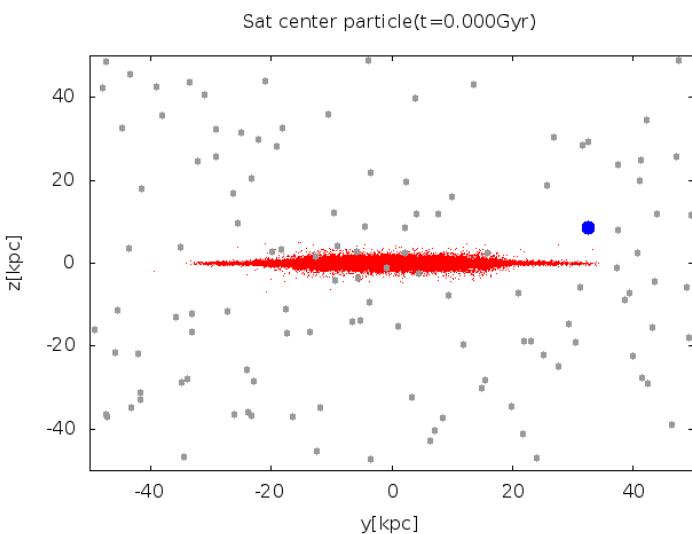
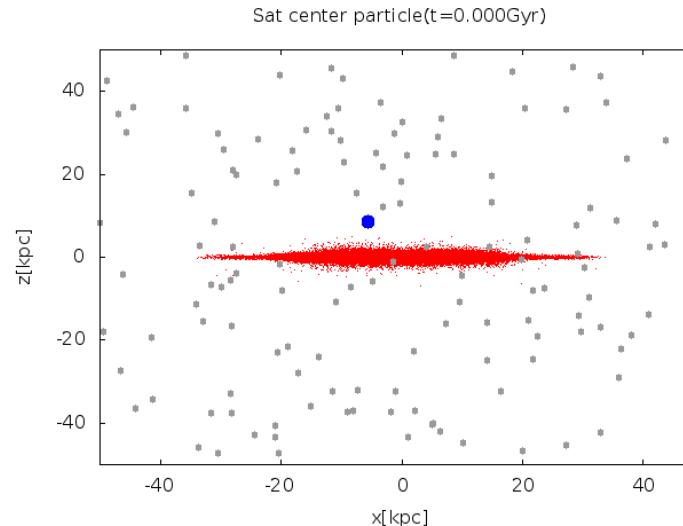
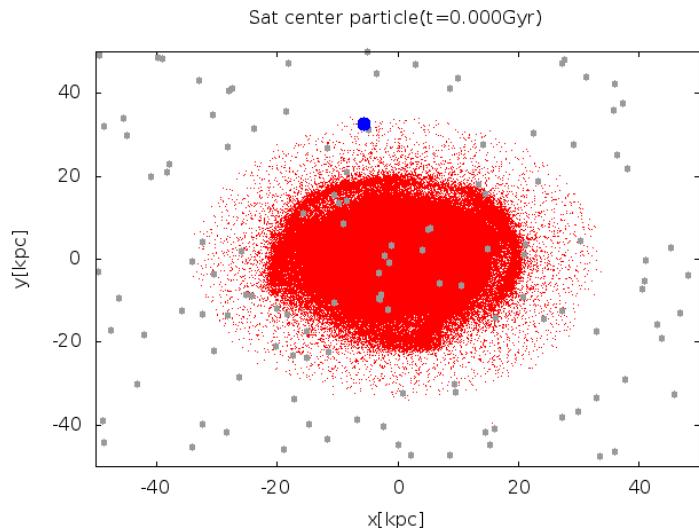
- Host銀河の近くを通過するものほど、eccentricityは小さくなる。
- 先行研究ではHost銀河に衝突するSatellitesの数をoverestimateしていた。

Hayashi & Chiba(2006)

This model

# Massive Satellite( $\theta = 30^\circ$ )

- Satelliteを孤立させた時のpotentialの最も深い粒子をSatelliteの基準粒子として扱う。(灰色でplot)



$$M_{max} = 6.775 \times 10^{10} [M_\odot] \simeq M_{disk}$$

$$N_{max} = 677500$$

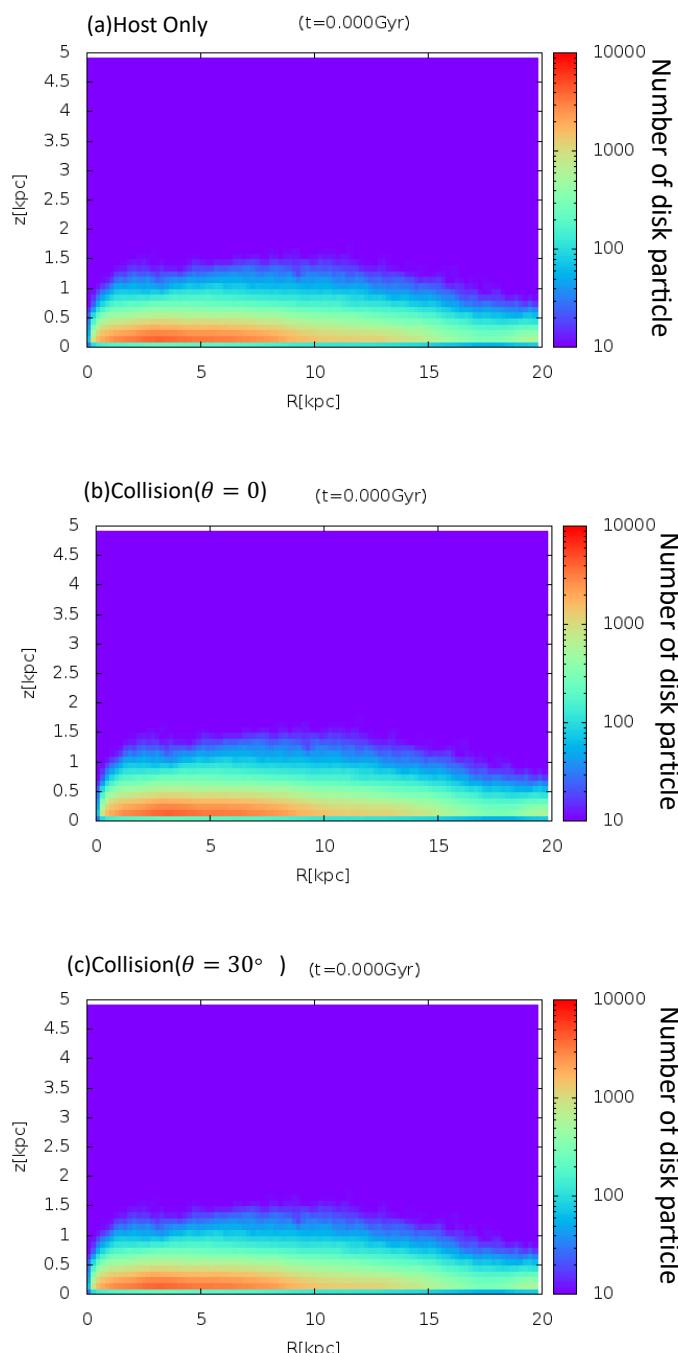
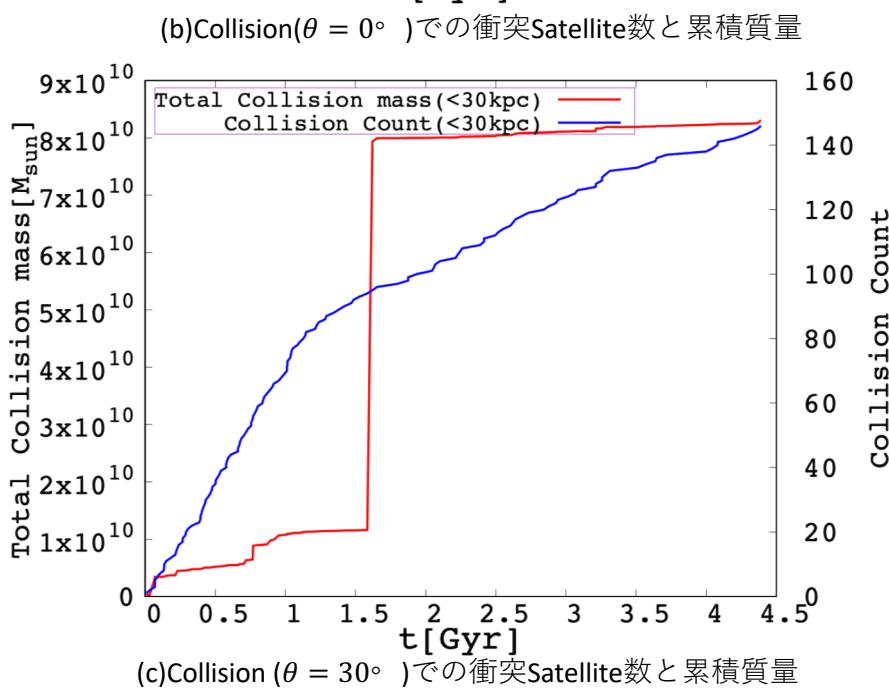
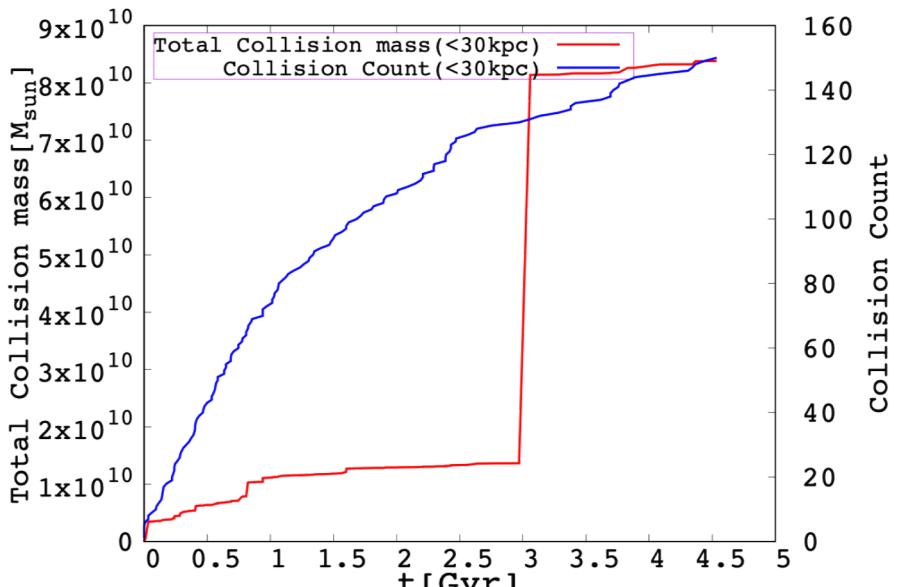
$$R_{vir} = 107.14 [\text{kpc}]$$

$$R_s = 2.22 [\text{kpc}]$$

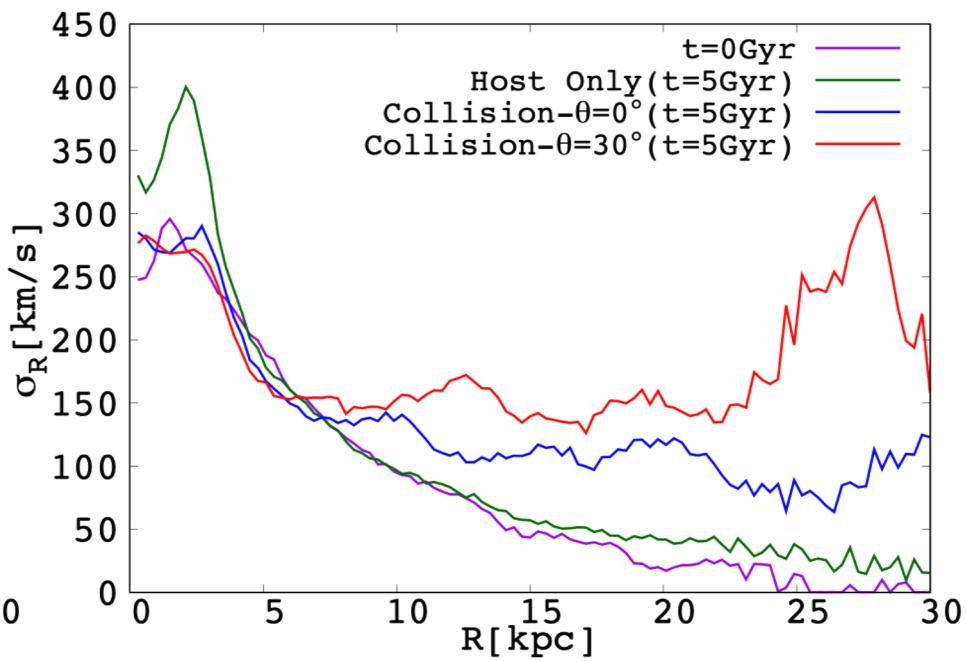
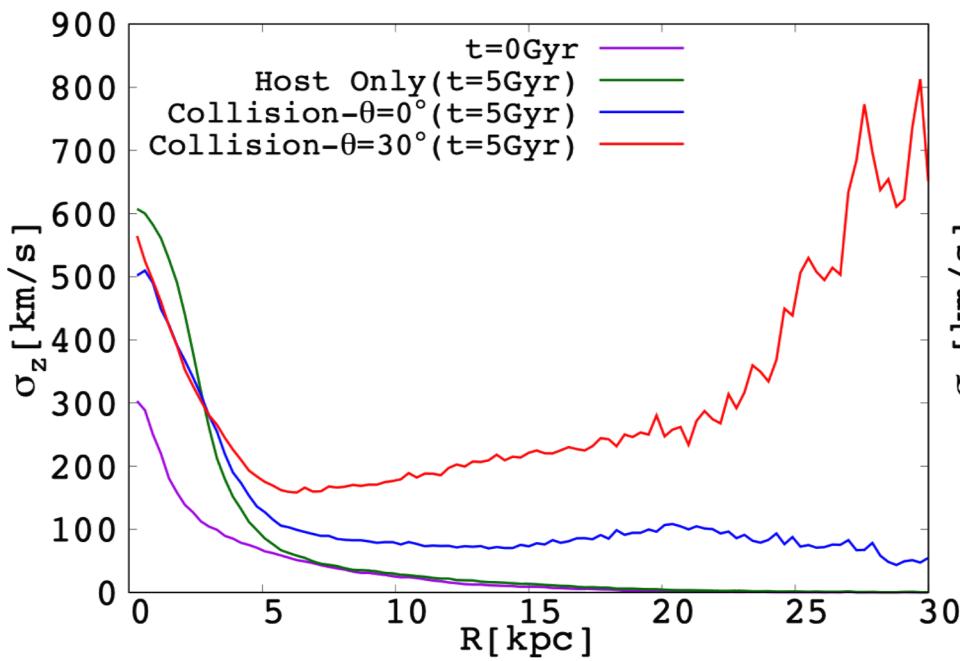
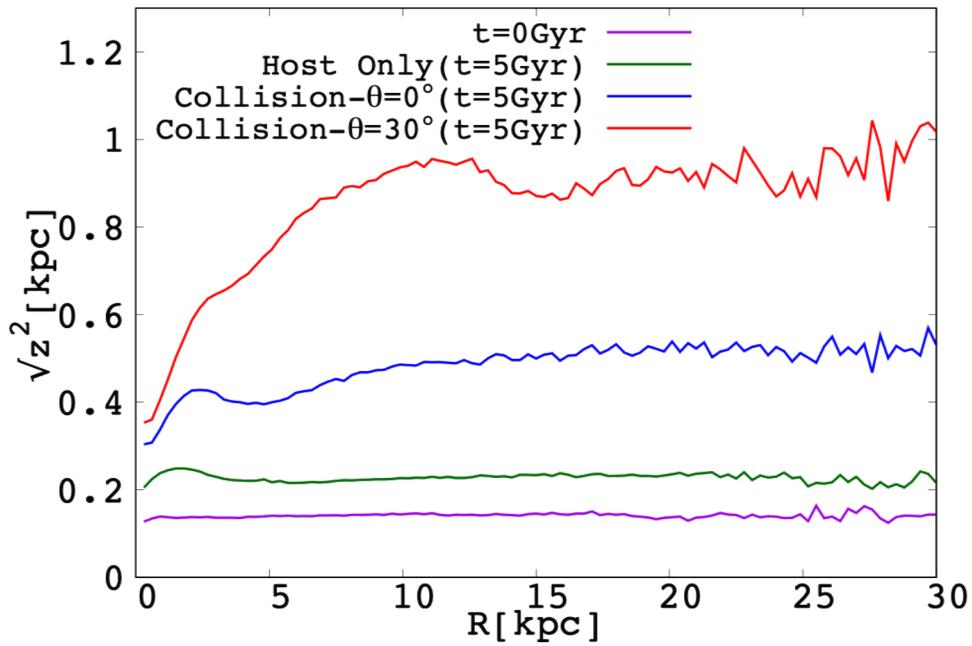
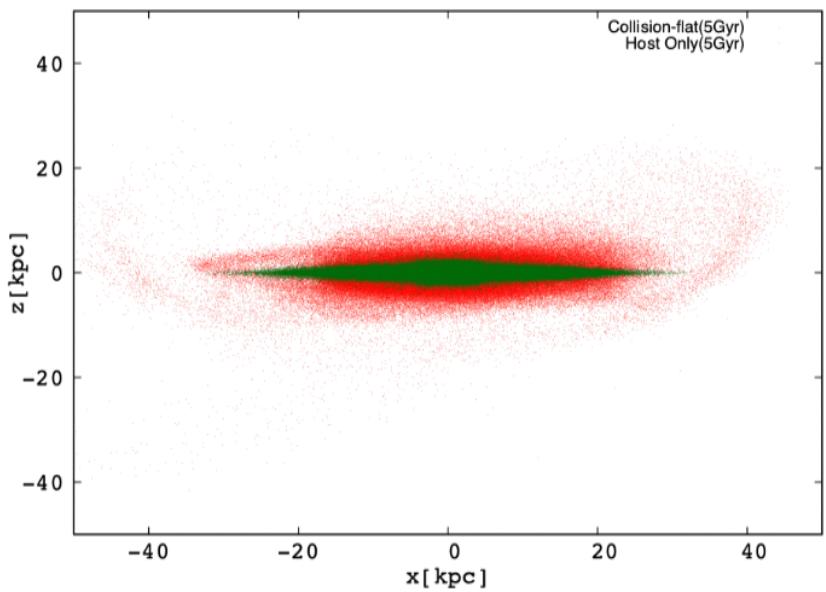
$$c = 48.28$$

- 重く、concentrationが大きいSatelliteの衝突がthick diskの形成に寄与していることがわかる。

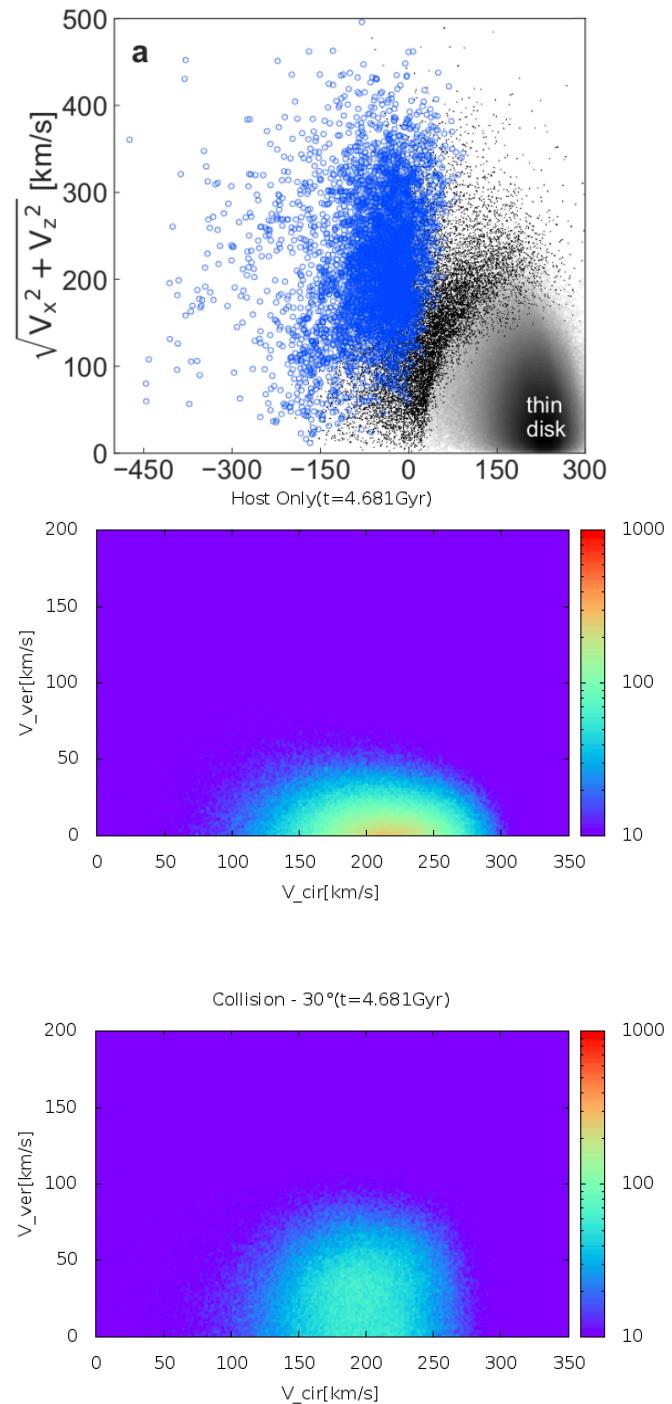
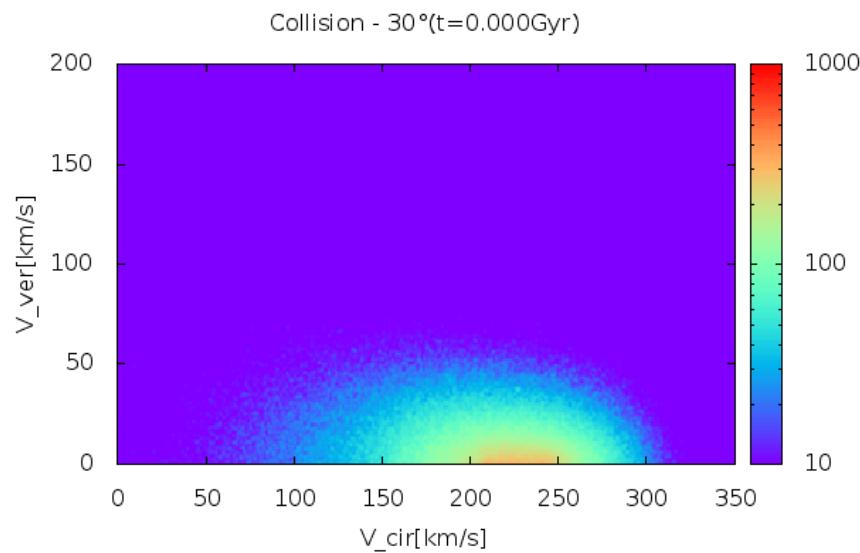
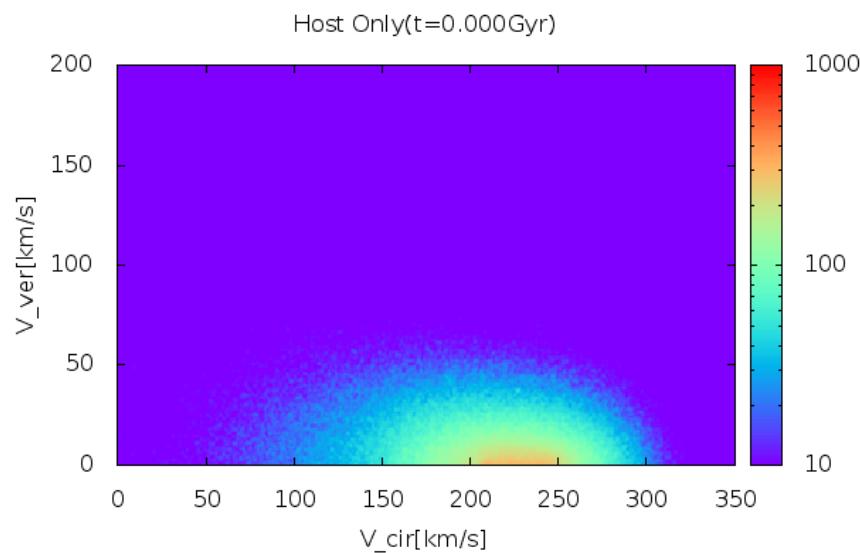
# N体シミュレーション



# Reslut



# 速度成分の比較



# thin disk形成のシナリオ

衝突後右図のようにthin disk中のガスが広がると考える

冷却時間の見積もり

$$\text{密度 } n \sim 9 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{温度 } T \sim 10^6 \text{ K}$$

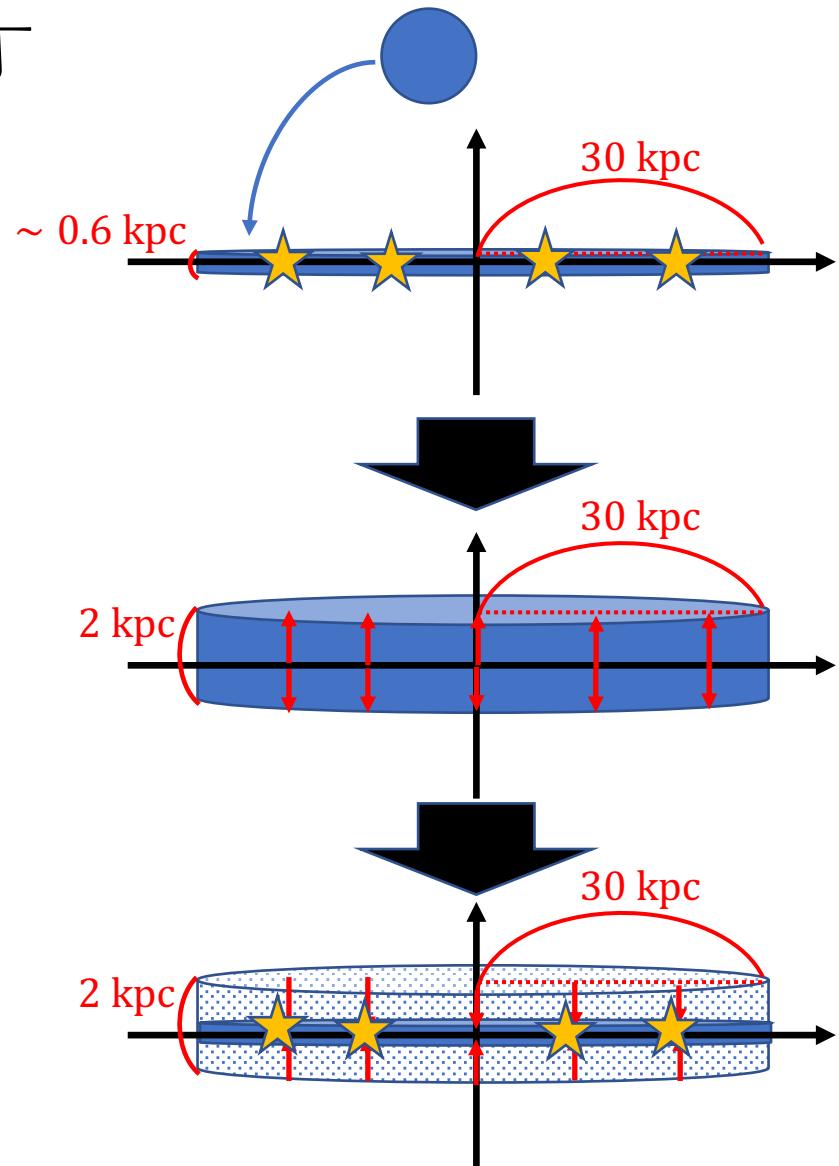
→冷却時間  $t_{cool} \sim \text{数}100 \text{ Myr}$

ガスの落下時間の見積もり  
自由落下と考えると

→落下時間  $t_{ff} \sim 200 \text{ Myr}$

ガスが収縮するタイムスケールは  
(thin disk形成のタイムスケールは)  
~ 数100Myr程度と見積もられる

Metal enrichmentは??

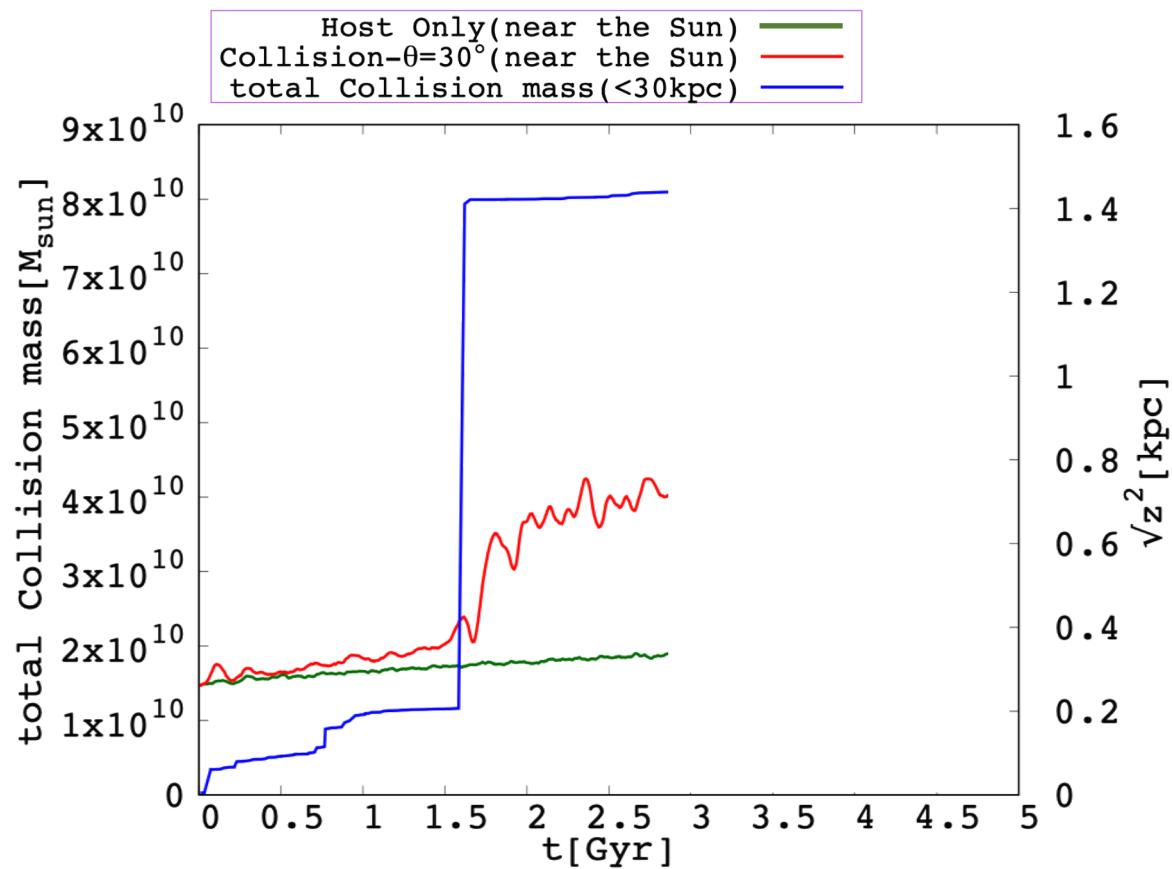


# Missing Satellite problemの議論

disk massに対して十分軽い  
Satelliteの衝突によるdisk  
thicknessへの寄与はほとんど  
ない。



Satellitesの衝突するtotal massでのdisk thicknessの議論はできない  
と考えられる。



太陽近傍での厚みの変化

# Summary and future work

- ▶ Cosmological models は Host銀河への衝突が少ない。
- ▶ 先行研究同様、重いSatellitesの衝突が thick disk の形成に重要な寄与していることがわかる。
- ▶ Satelliteの突入角度により、disk heatingが大きく(厚み2倍程度)異なることがわかる。
- ▶ 他のMW like HaloやSatelliteの突入角度での衝突シミュレーションを行い、比較する。
- ▶ metal enrichmentに関する見積もりを行う。
- ▶ 衝突したSatellites粒子とdiskの粒子の速度成分を比較し、Gaia DR 2の観測結果を再現できるか検証。

