

天の川銀河における Sub Halo の 衝突シミュレーション

筑波大学 理工学群 物理学類 4年

宇宙物理理論研究室

数野 優大

STELLAR HALO

The Galaxy's sparse, faint halo of stars is roughly spherical, some 200 kiloparsecs across and only about 10^9 solar masses. Stars in the outer halo are very old; those in the inner halo are slightly younger.

SEGUE 1

Dwarf galaxy.

URSA MAJOR II

Dwarf galaxy.

DARK-MATTER HALO

The Galaxy's largest component is roughly spherical, several hundred kiloparsecs across, about 10^{12} times the mass of the Sun — and completely invisible.

DISK

This most photogenic part of the Galaxy contains the spiral arms, is 30–40 kiloparsecs across and about 5×10^{10} solar masses.

THE SUN

BUBBLES

Back-to-back jets of energy erupted from the Galaxy's central black hole some 10 million years ago, forming two bubbles of hot gas that extend about 7,600 parsecs above and below the galactic plane.

DWARF GALAXIES

The Large and Small Magellanic Clouds are the biggest known dwarf galaxies, which probably formed in the denser clumps of the dark-matter halo. About two dozen are known, including Segue 1, Ursa Major II and the Sagittarius dwarf.

SAGITTARIUS STAR STREAM

The Sagittarius dwarf galaxy is being pulled apart by the Milky Way's gravity, with its stars strung out along its orbit. Many other streams from long-dead dwarfs loop through the outer halo.

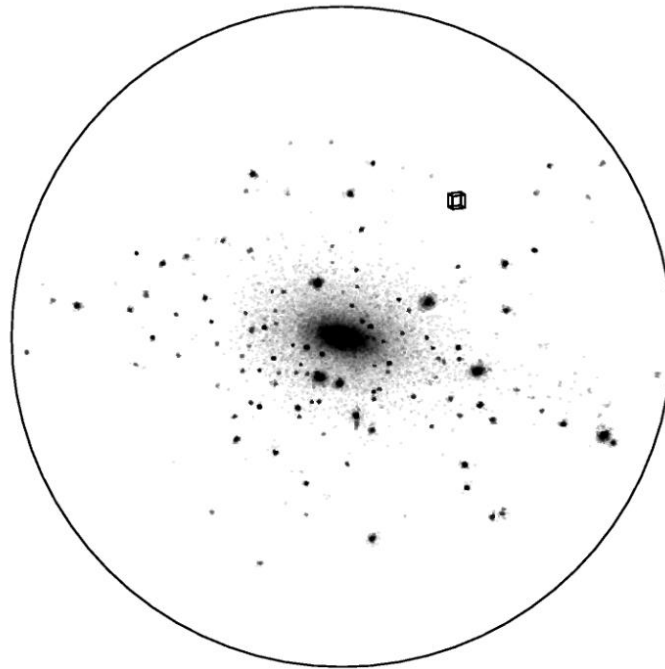
THE BIG PICTURE

Recent data are illuminating the Milky Way's structure, including its bright disk and the fainter features surrounding it.

Cold Dark Matter と Dark Matter Halo

Dark Matterのモデルとして粒子速度の小さいCold Dark Matter(CDM)が提唱されている。

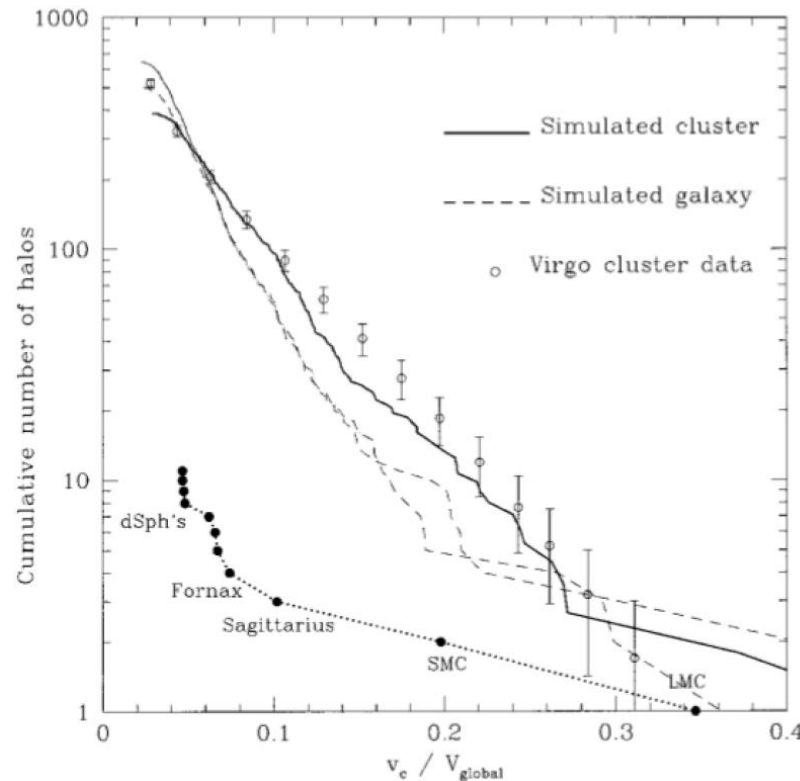
宇宙誕生初期のわずかな密度揺らぎによってCDMはお互いの自己重力で集積しDark Matter Halo(DMH)を形成する。小さなDMHが衝突・合体を繰り返すことで、天の川銀河のような大きな系へと成長する。



N体数値計算から得られた銀河サイズのDark Matter Haloと、その周辺0.5[Mpc/h]以内の小さなDark Matter Haloの空間分布(Klypin et al. 1999)

Missing Satellite Problem

このようにDark Matterの合体によって形成された大質量銀河(Host Halo)の周辺には, Host Haloとの合体から免れた小質量銀河(Sub Halo)が多数存在するはずである. しかし観測されている矮小銀河の数は, CDM理論によるシミュレーション結果に比べ圧倒的に少ない.



Sub Haloの累積個数関数. 銀河系に束縛されたSub Haloの数が理論値(破線)と観測値(点線)で大きくずれている(Moore et al. 1999)

Dark Satellite の存在可能性

Missing Satellite problem を解決する考えの一つ

⇒暗くて観測できないSub Halo が実は存在する



“Dark Satellite”

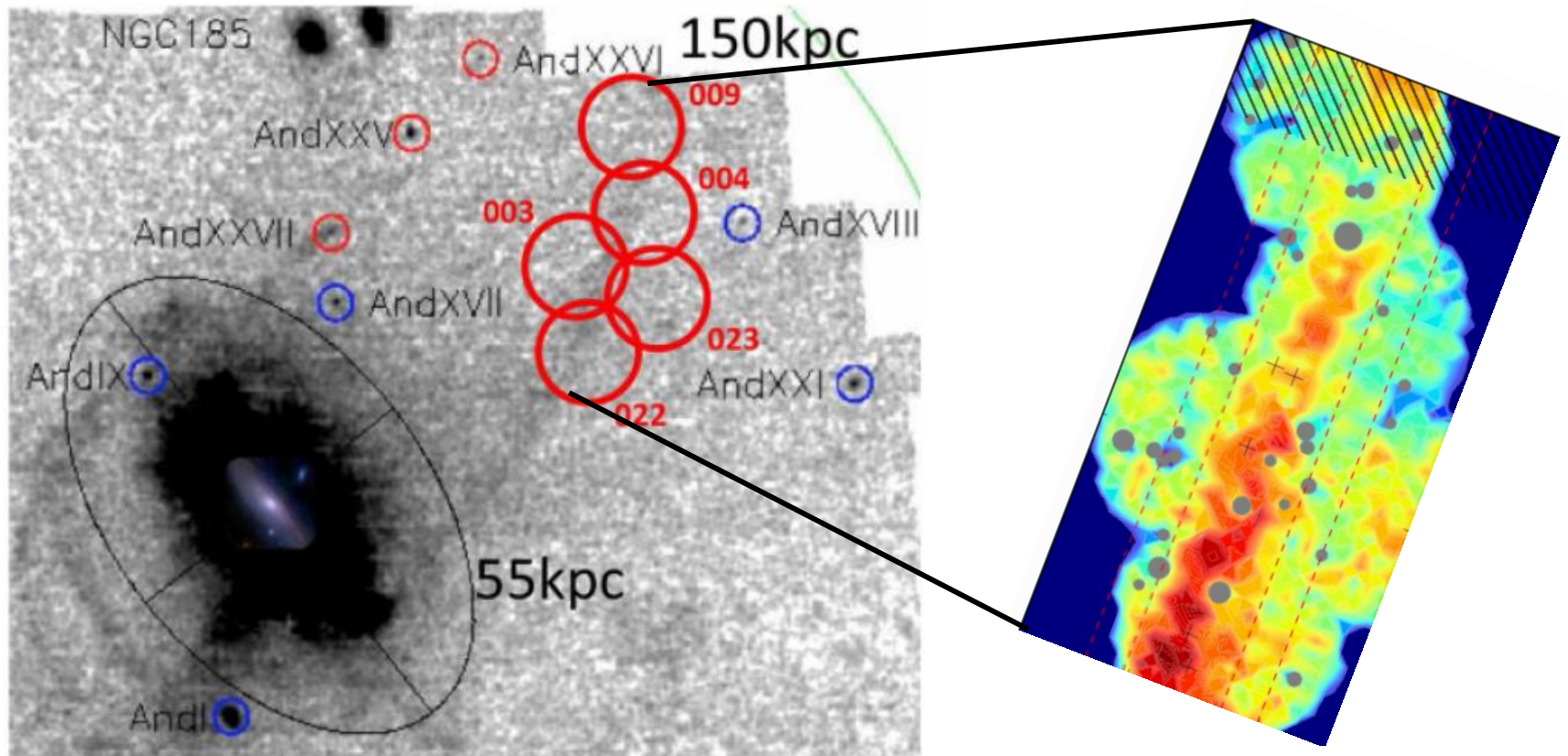
【天の川銀河に付随するDark Matter Haloの構成要素】

- Host Halo = 天の川銀河(Milky Way)
- Sub Halo (約1000個)
 - Satellite : 観測可能な銀河 (50個程発見)
ex.) 矮小銀河
 - Dark Satellite(暗黒銀河) : 観測不能な銀河(950個くらいあるはず)

Dark Satelliteの存在をどのように示すか

Dark Satellite の衝突

- 【先行研究】 Hyper Suprime-Cam(HSC)で観測されたAndromeda stream
⇒Streamの途切れる箇所(gap)が見つかった
⇒Dark Satelliteとの衝突によるものではないか



M31のNorthwest stream(左)とHSCによる観測(星の個数密度)(右)
(Kiriara et al. 2017, Komiyama et al. 2018)

本研究のテーマと概要

Dark Satelliteと銀河衝突の痕跡が調べられ始めたが、その衝突過程についてはいまだ十分に調べられていない。

【研究テーマ】

天の川銀河に束縛されたSub Halo(Satellite, Dark Satellite)がどのくらいの頻度で衝突過程を引き起こすのか

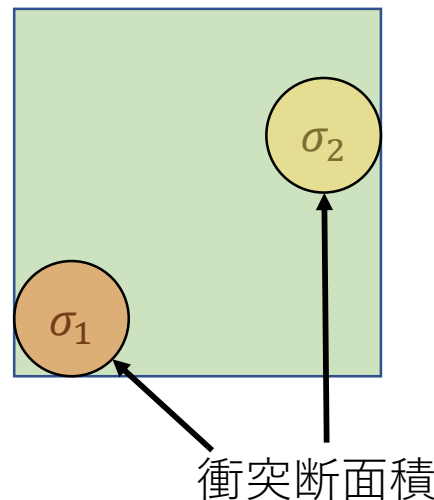
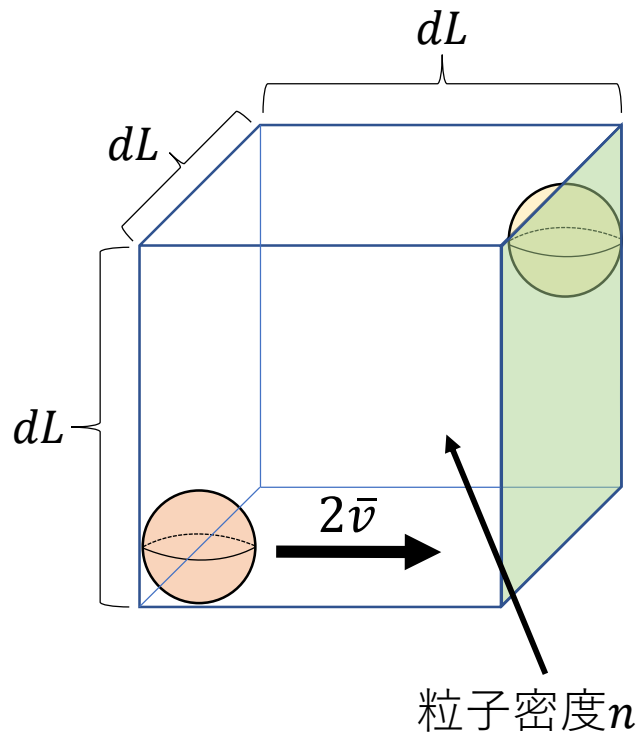
【概要】

- 石山智明 准教授(千葉大)が行った大規模な宇宙論的N体シミュレーションの結果を使用する。
- 上記のデータの内、特に天の川銀河と似た条件を持ったモデルを取り出した佐々木さん(M2)のSub Haloのデータを初期条件として用いる。
- N体シミュレーションを用いて運動状態を解析することでSub Haloの衝突過程を調べ、理論的に算出される衝突確率と比較する。

衝突確率の算出

衝突回数 k の算出方法は Baushev(2018)より

$$k = \int \{n(r)dL^3\}^2 \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{dL^2} \frac{2\bar{v}t}{2dL}$$
$$= \int \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) t \cdot 2\bar{v} \cdot n^2(r) \cdot 4\pi r^2 dr \quad (dL^3 = 4\pi r^2 dr)$$



・ 速度 $2\bar{v}$ の粒子が面に衝突する回数

$$\frac{2\bar{v}t}{2dL}$$

・ 2粒子の面占有率

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{dL^2}$$

初期条件値

- 宇宙論的シミュレーション(石山准教授)

Name	#particles	Length[Mpc/h]	Particle Mass[M _{sun} /h]
Phi-1	2048 ³	32.0	3.28×10^5

cosmological parameters (Planck Collaboration, 2014, A&A, 571, A16)

- Milky Way likeなHost Haloのモデル(佐々木さん)

※Milky Way likeな条件

- ・ ビリアル質量
- ・ ビリアル半径
- ・ スケール長
- ・ 3[Mpc]以内に 10^{12} [M_{sun}]以上の天体が存在しない

Host Halo Model	ビリアル質量 M_{vir} [M _{sun}]	ビリアル半径 R_{vir} [kpc]	スケール長 r_s [kpc]	Sub Halo個数 N_{Sub}
No.0	1.13×10^{12}	273.65	17.34	498
No.1	1.58×10^{12}	306.27	17.94	524
No.2	1.26×10^{12}	283.55	19.00	379
No.3	1.41×10^{12}	294.88	19.61	656
No.4	1.52×10^{12}	302.40	17.05	546
No.5	1.32×10^{12}	288.11	19.51	575

N体シミュレーション

i 番目のSub Haloに対するNewton eq. (中心にHost Haloが存在するとして)

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i(t)}{dt^2} = \underbrace{\sum_{j \neq i} -G \frac{m_i m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^2} \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}}_{\text{他のSub Haloとの重力相互作用}} - \underbrace{G \frac{m_i M_{NFW}(|\vec{r}_i|)}{|\vec{r}_i|^2} \frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|}}_{\text{Host Haloに束縛されたDark Matterからの作用}}$$

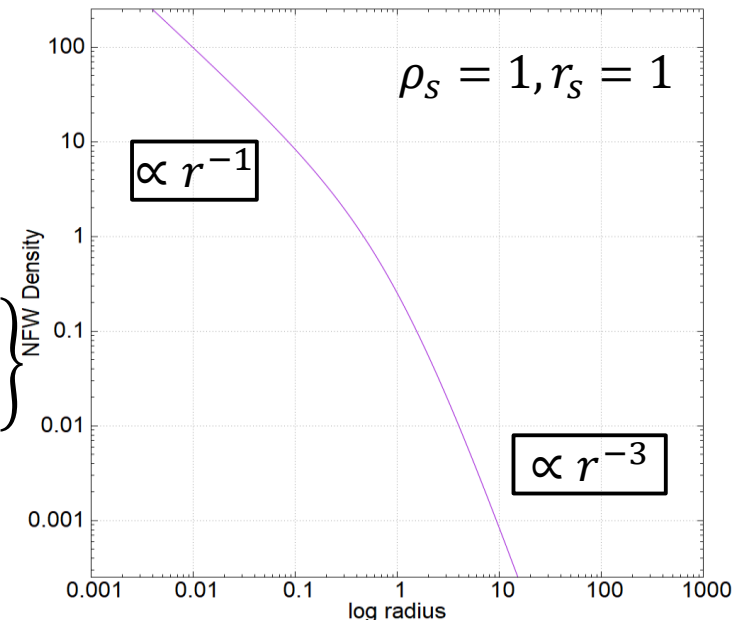
他のSub Haloとの重力相互作用

Host Haloに束縛された
Dark Matterからの作用

NFWプロファイル

$$\rho_{NFW}(r) = \frac{\rho_s}{\left(\frac{r}{r_s}\right) \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

$$M_{NFW}(r) = 4\pi\rho_s r_s^3 \left\{ \ln\left(1 + \frac{r}{r_s}\right) - \frac{r/r_s}{1 + r/r_s} \right\}$$

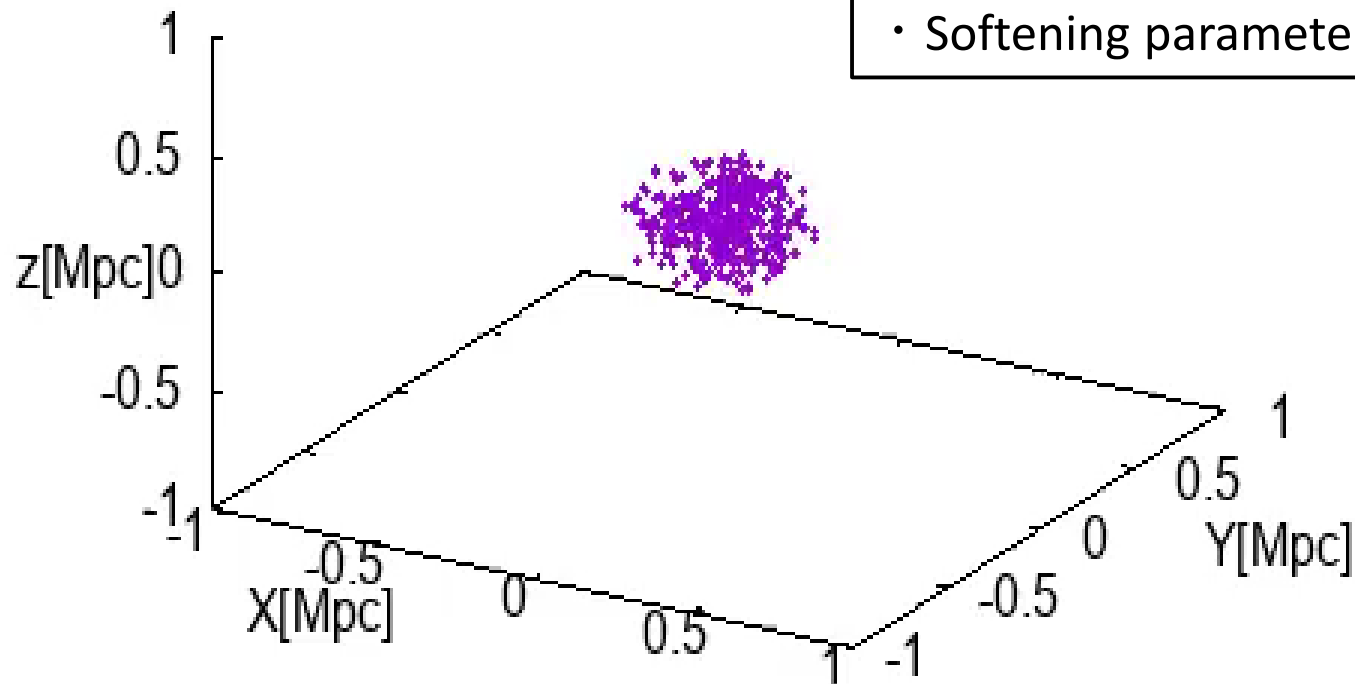


N体シミュレーション

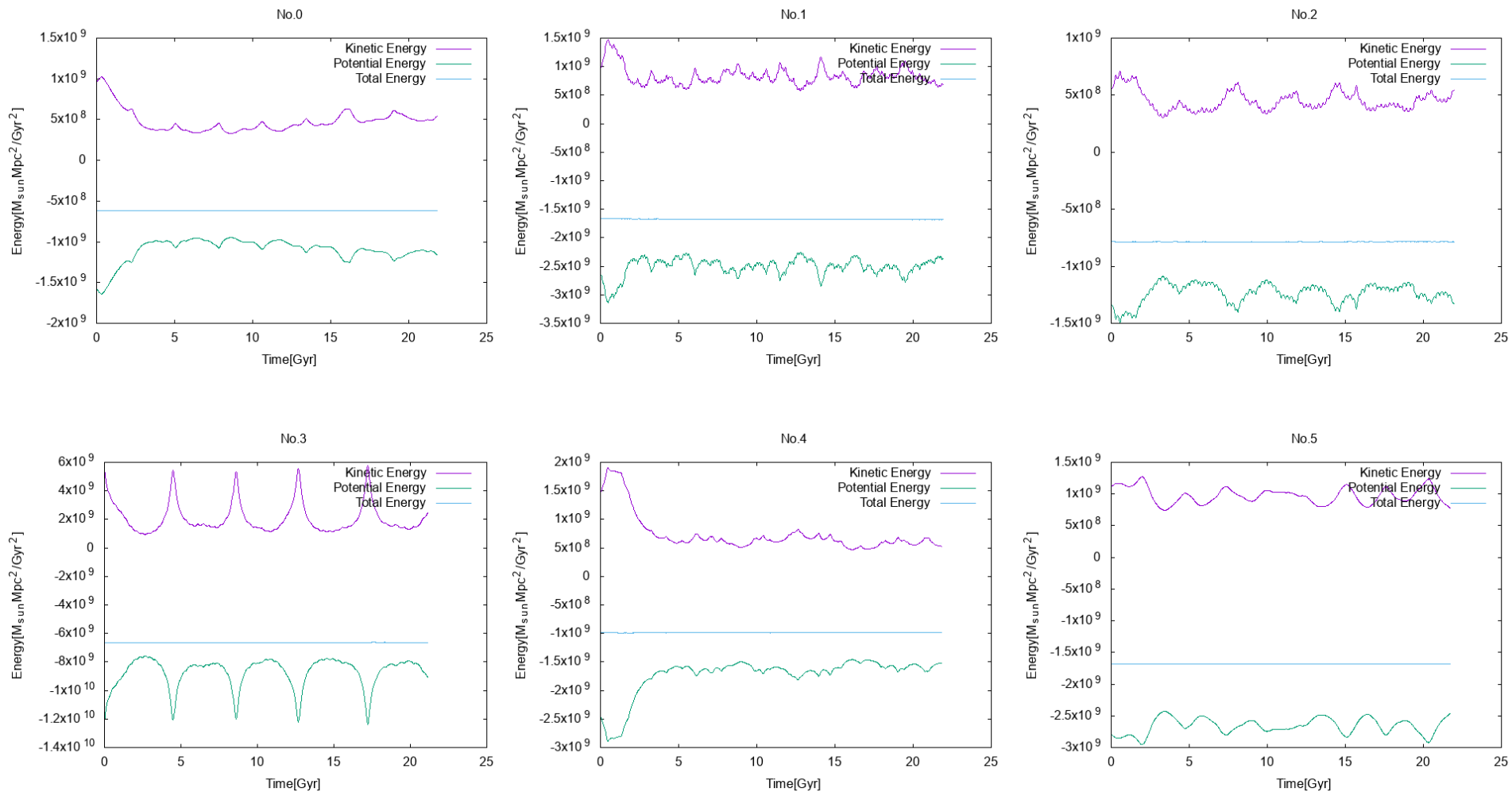
No.0 LeapFrog method でのテストシミュレーション

0.00[Gyr]

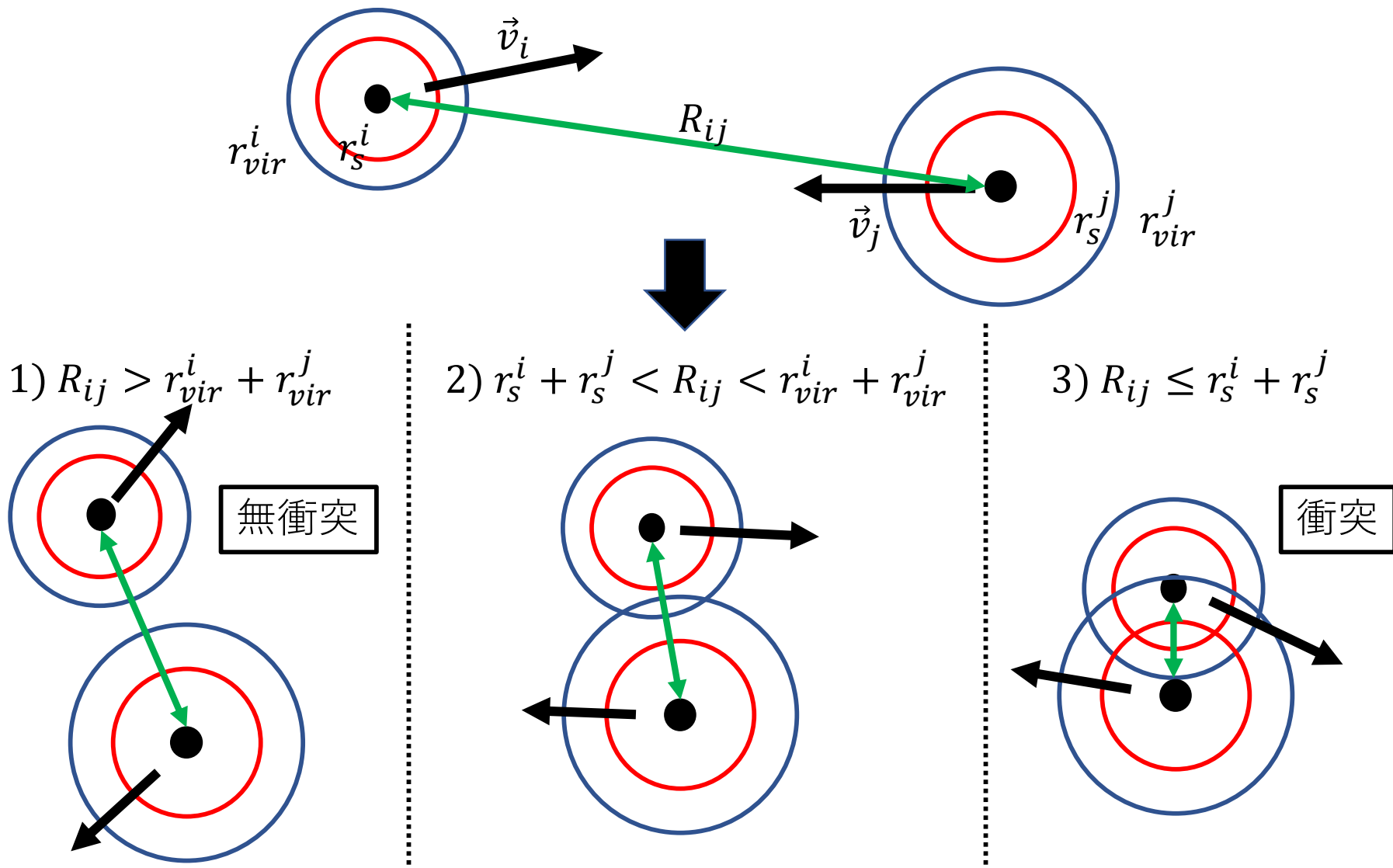
- Virial Radius : 273.65[Kpc]
- $N_{Sub\ Halo}$: 498
- Free Fall Time : 2.18[Gyr]
- Time step : 0.02[Gyr]
- Softening parameter : 3.53[Kpc]



エネルギー保存 (LeapFrog Method)



【今後の展望】 Sub Halo同士の衝突過程と衝突頻度



- 1つのSub Haloを多粒子系で構成
- 非球対称なHost Haloを用いたN体シミュレーション

まとめ

- LeapFrog MethodによるN体シミュレーションコードを書いた.
- Sub Halo同士の衝突過程について考察した.
- 今後はシミュレーションによるSub Haloの衝突頻度を調べ, 卒業研究としてまとめたい.