

# 銀河衝突とステーターストリームの形成

筑波大学 理工学群 物理学類 4年  
宇宙物理理論研究室

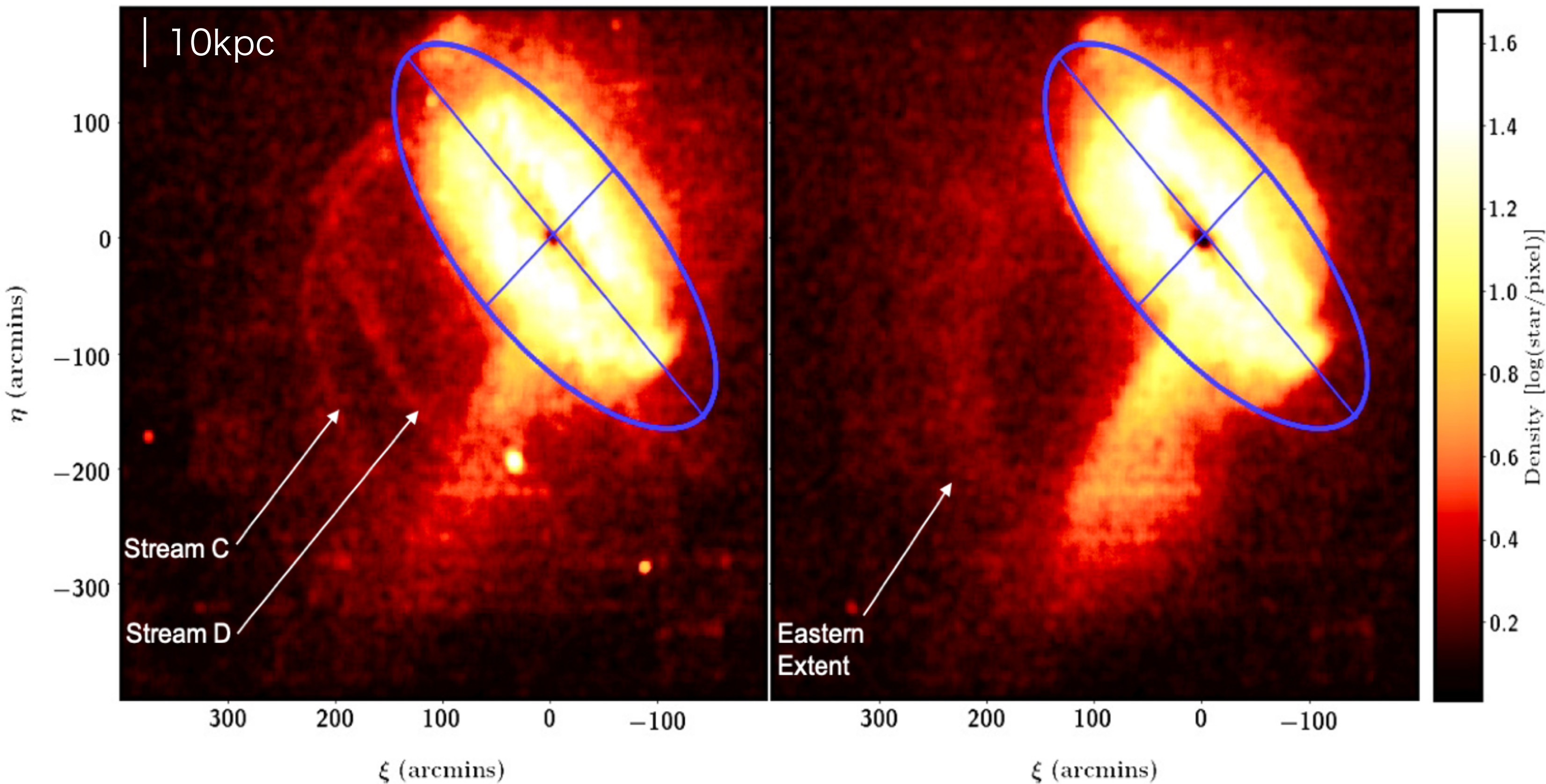
佐藤創太

# 目次

- ・ 研究背景
- ・ 本研究のテーマと概要
- ・ 研究手順
- ・ 経過報告
- ・ 今後の展望

# 研究背景

M31 付近の可視光で観測された星をプロットした図 (Janet et al. 2020)



- M31付近には、
  - Giant Stellar Stream
  - Eastern Extent
  - Stream C
  - Stream D
- などの構造物が確認できる。
- 本研究では、Stream CとStreamDに注目する。

- 左の図は $-2.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ 、右図は、 $-0.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.3$ の星を含む。
- 左の図にはStreamCとStreamDが確認できるが、右の図には確認できない。  
→CとDが同程度の低金属量を含む恒星で構成されてることがわかる。

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log \frac{(\text{Fe}/\text{H})_{\text{star}}}{(\text{Fe}/\text{H})_{\text{Sun}}}$$

# 研究背景

## StreamCとStreamDに見られる類似点

- ・ 同じような金属量の恒星で構成されている ( $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{StreamC}} \approx [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{StreamD}}$ )
  - ・ →同じような星形成史（重元素量が増えていく過程）を経てきた。
- ・ 二つのStreamの軌道が近い
  - ・ →先祖が同様の軌道運動をしていた。
- ・ ストリームの幅が同程度 ( $d_{\text{StreamC}} \approx d_{\text{StreamD}}$ )  $\rightarrow \sigma_{\text{StreamC}} \approx \sigma_{\text{StreamD}}$ 
  - ・ →先祖の重力ポテンシャルの深さが近い。 ( $\phi_{\text{StreamC}} \approx \phi_{\text{StreamD}}$ )



# 本研究のテーマと概要

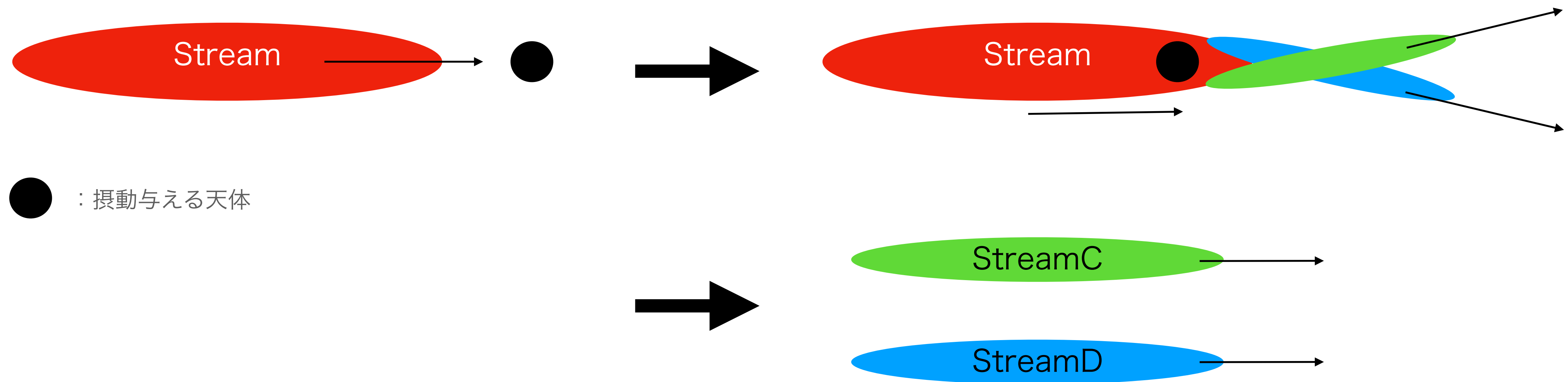
- では、StreamCとStreamDはどのように形成されたのだろうか？
  - （まだ形成モデルは提案されていない）
- 仮説1：
  - 同時期に同じような銀河がM31に接近し、ストリームがそれぞれ形成された。
- 仮説2：
  - なんらかの物理過程で、もともと一本であったストリームが分裂した。

本研究では**仮説2**の可能性を検討

# 本研究のテーマと概要

- ・では、どのような物理過程でストリームが分裂したのだろうか？
- ・仮説：ストリームの先端に、摂動を与える天体が衝突した。

ストリームの先端に物体が衝突し、二つに分裂する図



# 研究方法

- ・ N体シミュレーションで、ストリームが分岐する現象が起こり得るかを検証する。
- ・ その後、どのような条件で起こり得るかを数値実験する
  - ・ 以下の衝突する天体の三つの条件に注目
    - ・ どれくらいのmassで起こるのか
    - ・ どれくらいのscaleで起こるのか
    - ・ どのような質量分布で起こるのか

# 研究手順

1. 二つのストリームの先祖として、  
プラマーモデルの密度分布を持つ衛生銀河を作成。
2. NFW profileの密度分布を持つ、ダークマターハローを分布。  
(ホスト銀河をダークマターが支配的で、恒星質量が無視できるものと仮定する)
3. 衛生銀河をホスト銀河の周りで軌道運動させ、  
潮汐作用によってストリームを生成。
4. ストリームの軌道上に、ストリームに摂動を与える天体を設置し、  
ストリームが分岐するかを検証。
5. ストリームが分岐が確認されたら、より現実的な物理パラメータを調査する。



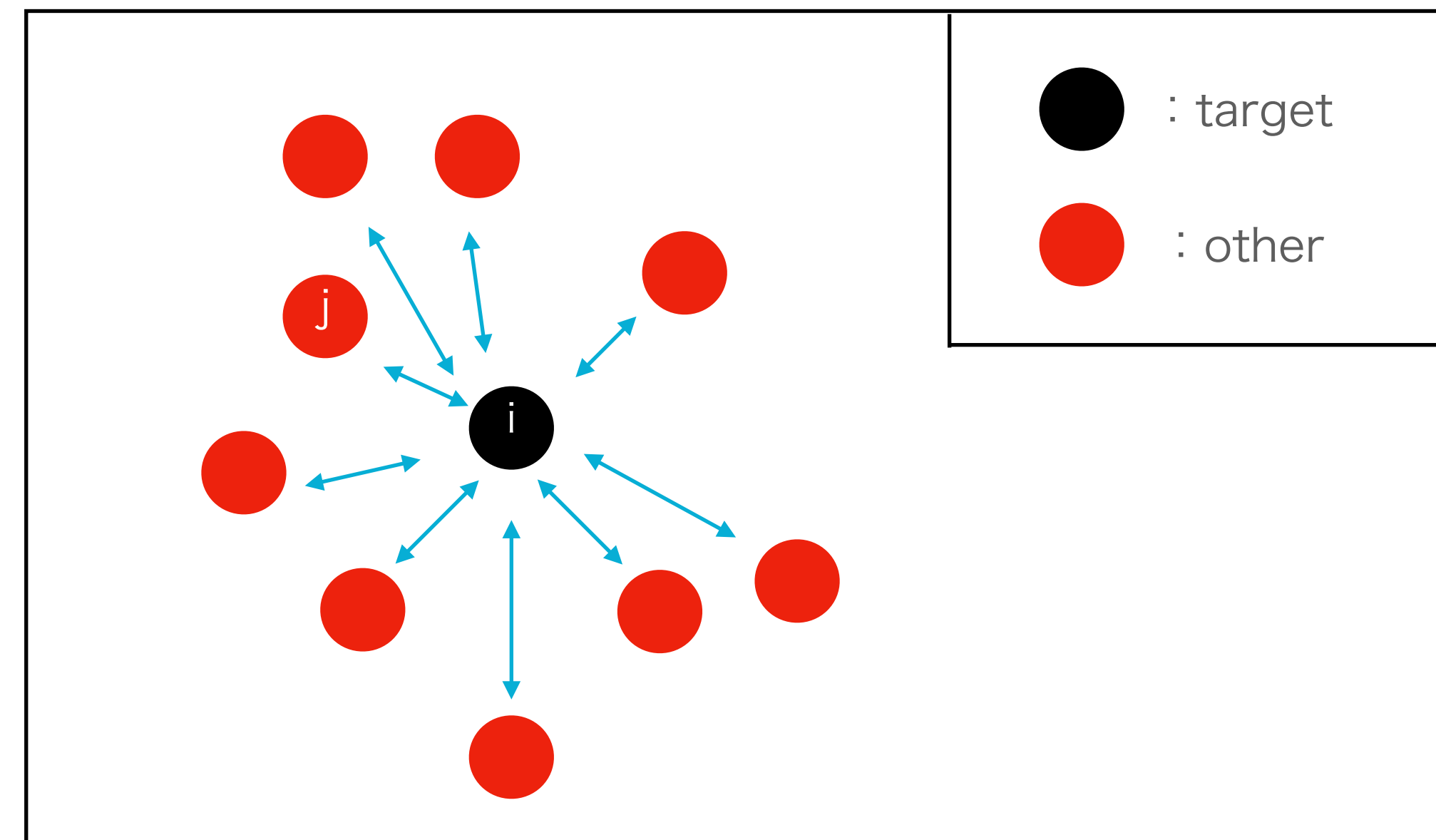
# 自己重力系の数値シミュレーション

- ・ i番目の粒子の自己重力系における運動方程式は、

- ・  $\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_i$

- ・  $\mathbf{F}_i = - \sum_{i \neq j} \frac{G m_i m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^2} \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}$

i番目の星が他の星から力を受ける様子



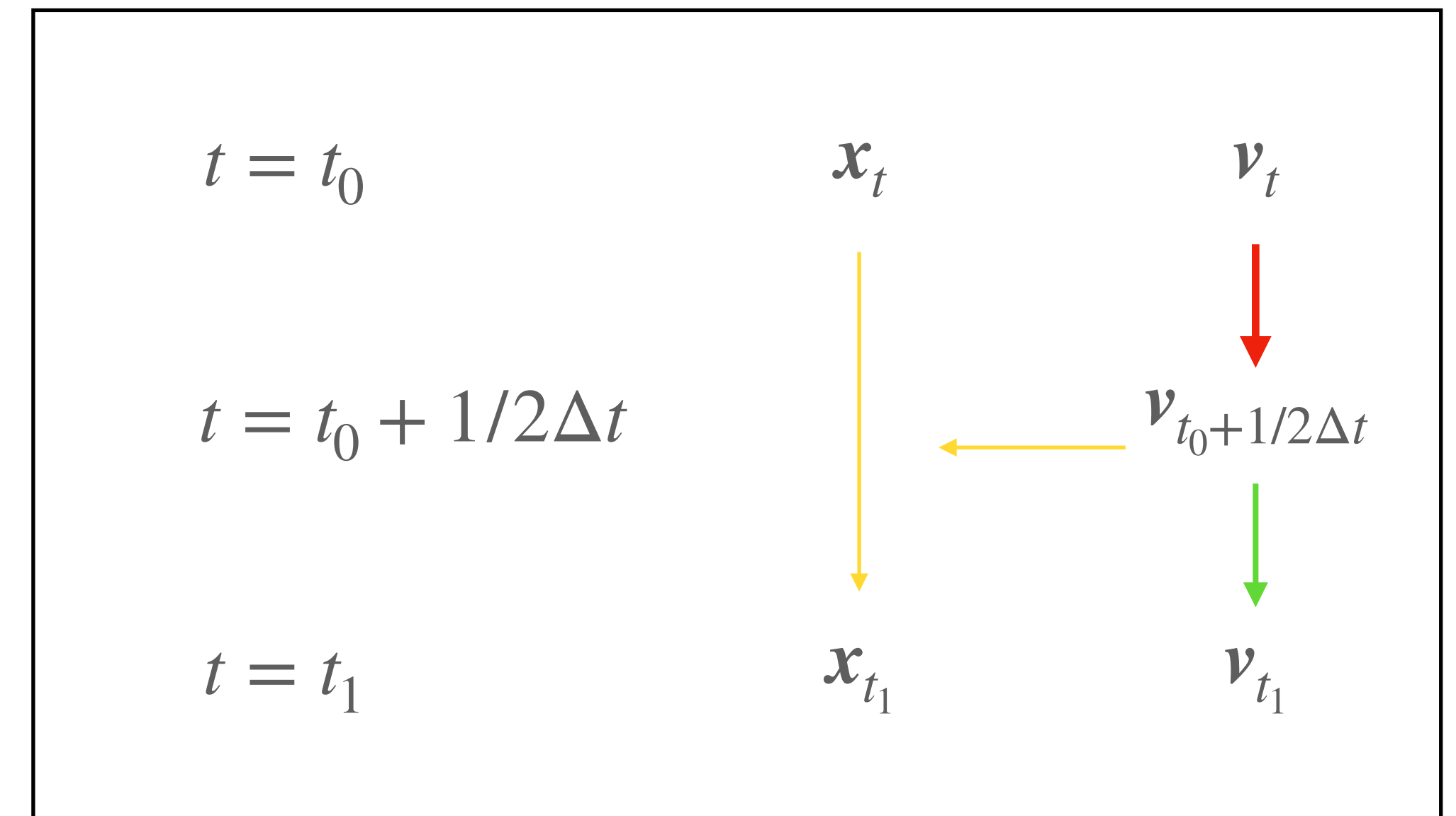
- ・ この時間積分をN個全ての星において、Leap Flog法と呼ばれる手法で行う。

# Leap Flog法 (概要)

- Leap-Flog法は以下の3つステップを基本とする

イメージ図

- Initial Kick** :  $\mathbf{v}_{i+1/2} = \mathbf{v}_i + \mathbf{a}_i \cdot \Delta t/2$
- Full Drift** :  $\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_{i+1/2} \cdot \Delta t$
- Final Kick** :  $\mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{v}_{i+1/2} + \mathbf{a}_{i+1} \cdot \Delta t/2$



- また、 $\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + (\mathbf{v}_i + \mathbf{a}_i \cdot \Delta t/2) \cdot \Delta t = \mathbf{x}_i + \dot{\mathbf{x}}_i \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\mathbf{x}}_i (\Delta t)^2$  である。

# Leap Flog法 (Algorithm)

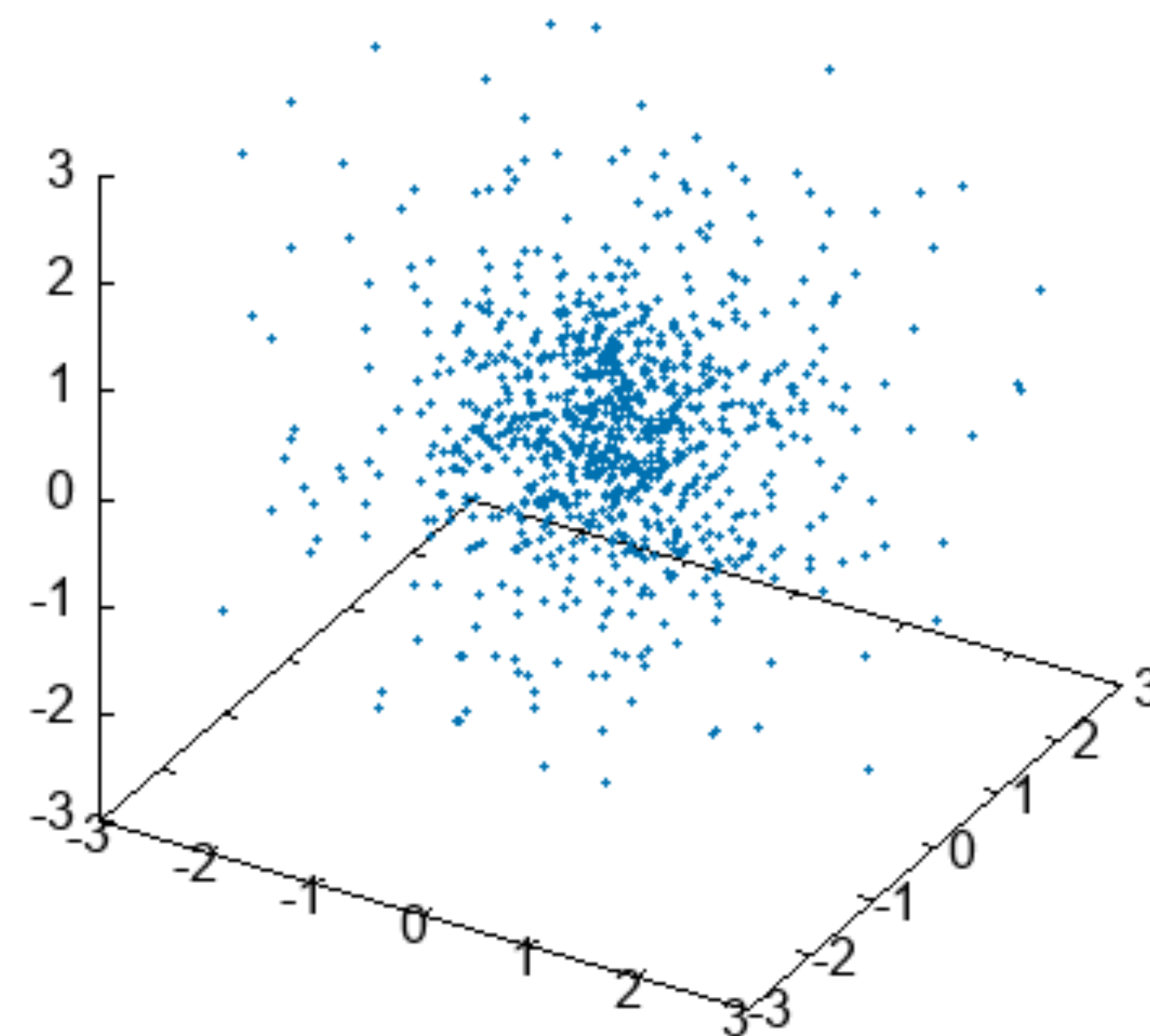
- |                                                                        |                          |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. for $t = 0$ to $t_{\text{end}}$ do                                  | ◀ Time integration       |
| 2.   for $i$ particle in all particles do                              |                          |
| 3. $v_i = v_i + \text{Kick}(a_i, dt/2)$                                | ◀ Initial kick           |
| 4. $x_i = x_i + \text{Drift}(v_i, dt)$                                 | ◀ Full drift             |
| 5.   end for                                                           |                          |
| 6.   for $i$ particle in all particles do                              |                          |
| 7. $a_i = 0$                                                           |                          |
| 8.     for $j$ particle in all particle except for the particle $i$ do |                          |
| 9. $a_i = a_i + \text{CalcGravity}(m_j, x_j)$                          | ◀ Calculate acceleration |
| 10.    end for                                                         |                          |
| 11. $v_i = v_i + \text{Kick}(a_i, dt/2)$                               | ◀ Final kick             |
| 12.   end for                                                          |                          |
| 13. $t = t + dt$                                                       | ◀ Update integrated time |
| 14. end for                                                            |                          |

# プラマーモデルの衛星銀河の初期化

- ・ プラマーモデルは球状星団や矮小銀河の質量分布を考える上で利用されるモデル
- ・ 初期の質量密度と、分布関数はそれぞれ以下で与られる。

- ・  $\rho(\mathbf{r},0) = (3/4\pi)MR^{-3}[1 + (\mathbf{r}/R)^2]^{-5/2}$

- ・  $f(\mathbf{r}, V,0) = \begin{cases} (24\sqrt{2}/7\pi^3)G^{-5}M^{-4}R^2(-E)^{7/2} & \text{for } E < 0, \\ 0 & \text{for } E > 0. \end{cases}$



# NFW profileの密度分布を持つ中心銀河の作用

- NFW profileの重力下での*i*番目の星の運動方程式は、以下のようになる。

NFW profile

$$\bullet \quad F_i = - \underbrace{\sum_{i \neq j} \frac{Gm_i m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^2} \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}}_{\text{衛星銀河の自己重力における作用}} - \underbrace{\frac{Gm_i M_{NFW}(\mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_i|^2} \frac{\mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|}}_{\text{中心銀河による作用}}$$

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

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

$\rho_s$  : スケール密度,  $r_s$  : スケール長,  $r_{vir}$  : ビリアル半径

# 経過報告

中心銀河のモデル(NFW profile)

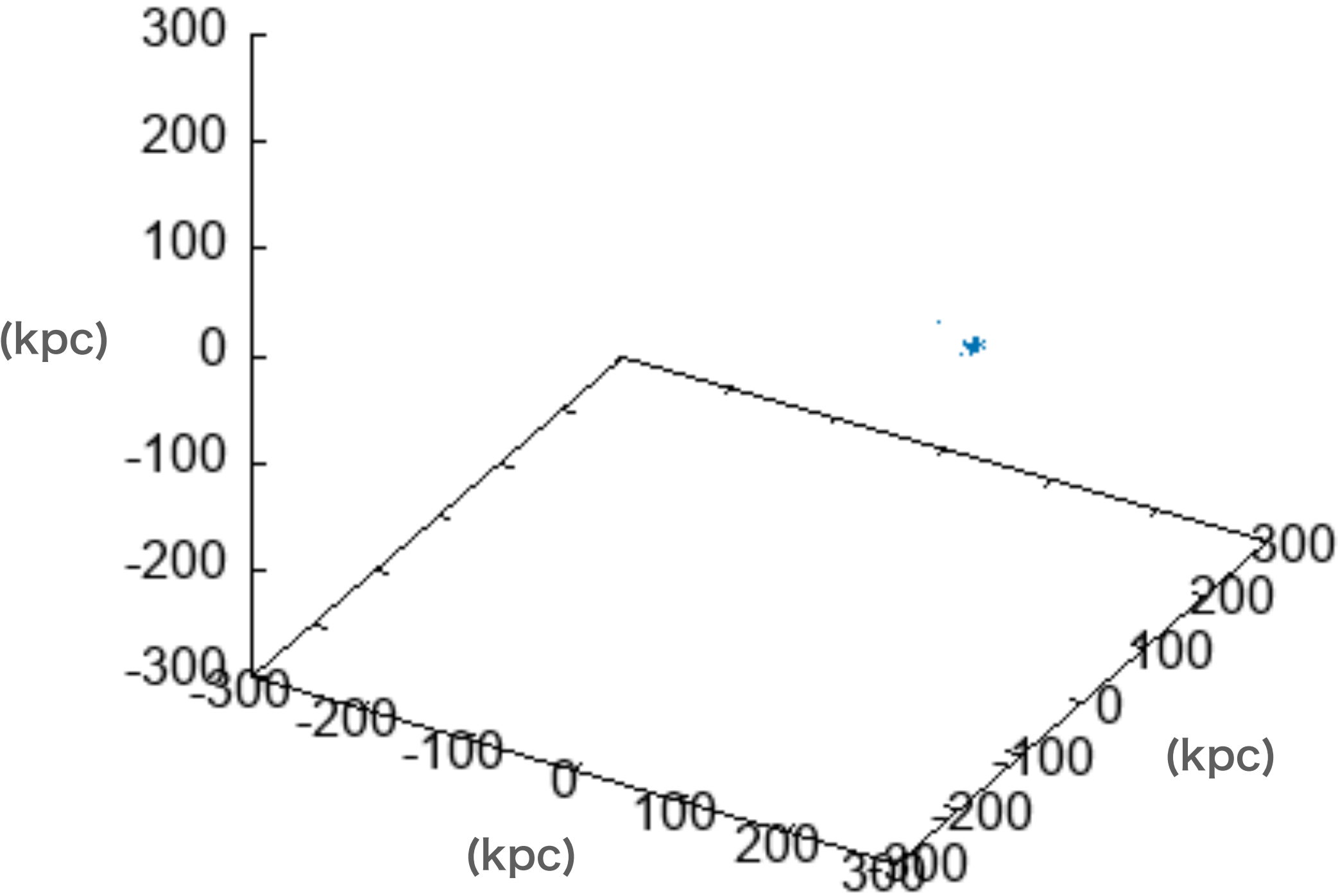
$$M_t = 10^{12} M_{\odot}, \quad r_s = 20 \text{ kpc}, \quad r_{vir} = 200 \text{ kpc}$$

$M_t$  : 中心銀河の総質量,  $r_s$  : スケール長,  $r_{vir}$  : ビリアル半径

衛星銀河のモデル(プラマーモデル)

$$M_s = 10^9 M_{\odot}, \quad r_c = 1 \text{ kpc}$$

$M_s$  : 衛星銀河の質量,  $r_s$  : 衛星銀河のコア半径





# まとめと今後の展望

- ・ 本研究の目的は、  
M31に付近に存在するStreamCとStreamDの形成過程を調査することである。
- ・ 研究の進捗としては、現在、  
N体シミュレーションを行い、ステラーストリームの生成を確認することができた。
- ・ 今後は以下のシミュレーションを実行する予定である。
  - ・ 生成したストリームの軌道上に分裂させる因子を衝突させる。
  - ・ ストリームが分岐する条件を調査する。
    - ・ 摂動因子の密度分布、スケール、質量に注目する。