

## Dynamics of Globular Cluster System

Tsuyoshi Sakamoto

*Japan Spaceguard Association*

**Abstract.** Globular clusters were mainly discovered around galaxies, and their formation and evolution are closely related with galaxy formation. Here I review the dynamical evolution of the globular cluster system within the framework of hierarchical galaxy formation scenario.

---

<sup>1</sup>sakamoto@spaceguard.or.jp

## 球状星団系の力学

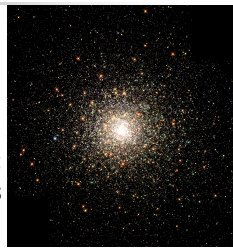
坂本 強 (日本スペースガード協会)

## Why do we study globular cluster systems?

- This is because globular clusters provide a lot of essential information on
  - ➔ -How and where were globular clusters formed?
  - ➔ -How were the objects in the clusters (stars, BHs?, planets?) formed and evolved?
  - ➔ -How were a galaxy formed and evolved?
  - ➔ -the Mass distribution of a galaxy

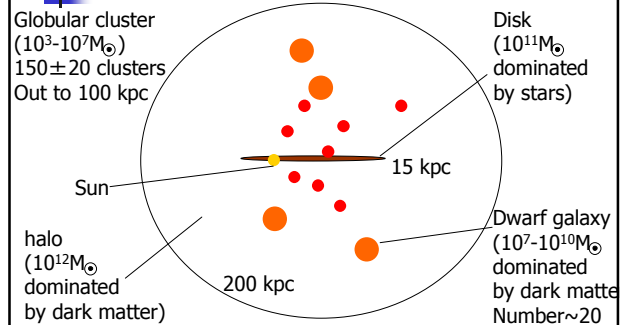
## Globular cluster

- Dominant population
  - Old stars ( $\sim 13$  Gyr, comparable to Hubble time)
- Mass  $10^4$ - $10^7 M_{\odot}$
- Size (half-light radius) 10-100 pc
- They are discovered in galaxies of many different Morphological types  
(They are suggested to exist in the intergalactic medium)



$1\text{pc} \sim 10^5\text{AU}$

## Structure of the Milky Way



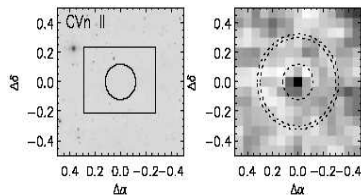
## Dwarf galaxies

Large Magellanic Cloud



It consists of stars, dark matter, and gas.

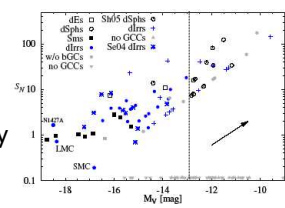
Canes Venatici I dwarf spheroidal



It consists of stars and dark matter.  
Sakamoto & Hasegawa (2006)

## Globular clusters in dwarf galaxies

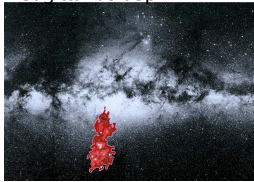
- In the Milky Way, only four luminous dwarf galaxies ( $M_V < -13$ ) have 5-10 globular clusters.
- However, fainter dwarf galaxies in nearby galaxy cluster have globular clusters.



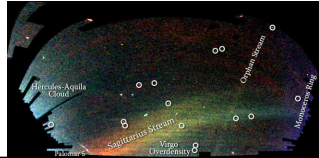
$$N_{GC} = N_{tot} \times 10^{0.4(M_V + 15)}$$

## Accretion events of dwarf galaxies into a larger galaxy

- A strongly tidally stripping dwarf galaxy, Sagittarius (Sgr) dSph, was discovered.
- Sgr dSph have giant tidal streams
- Some GCs are associated with the Sgr streams

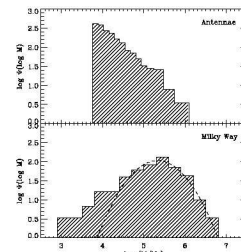


Desity distribution of distant stars on the celestial sphere



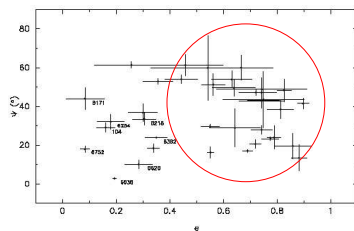
## Mass function of globular clusters

- Gaussian+ tail at the lower end



## 銀河系における球状星団の軌道

- 一部の星団の3次元速度は観測されている
  - 離心率の高い軌道が多い
- 速度楕円体は radial



## 銀河における球状星団系の力学進化

- 球状星団は徐々に質量損失する (銀河中心部では軌道もdecay)
- >球状星団系のmass functionと速度分布は時々刻々変化

## 球状星団の質量損失過程

- Two body relaxation
- Disk/bulge shock
- (Dynamical friction)

## Two body relaxation

- 高密度->星同士の近接遭遇頻発

->星のエネルギーが

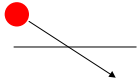
増加->星は星団から脱出



- Relaxation time
- $\propto r_h^{3/2} M^{-1/2}$
- Relaxation time  $\sim 1\text{Gyr} < 13\text{Gyr}$

## Disk/bulge shocking

- Diskの、垂直方向の重力ポテンシャルの勾配は急->通過時に内部の星にエネルギーを与える
- 多くの星団は20kpc以内を軌道運動する
- Time scale~6Gyr



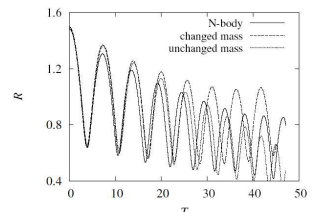
## Dynamical friction

- 球状星団と周囲の粒子(dark matter,星)との相互作用
- >エネルギーと角運動量損失

$$\propto M\rho$$

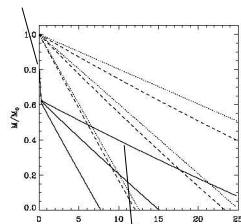
$\rho$ : background density

- $M < 10^6 M_{\odot}$ なら
- 銀河系中心から1kpc
- 付近までの星団に効く



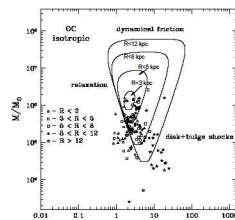
## 典型的な球状星団の質量損失

恒星進化による質量損失



Fall & Zhang (2001)

Two-body relaxation+disk shocking



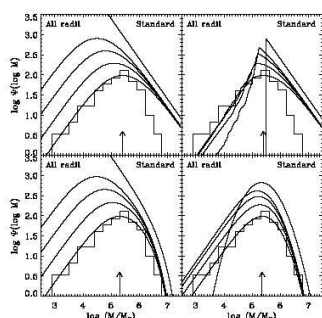
Half-light radius

Gnedin & Ostriker (1997)

## 球状星団系の力学進化の数値実験

- 多くの球状星団はほとんどの間、独立して銀河内を軌道運動していたと仮定
- 球状星団の質量関数・速度楕円体の時間進化を追跡
- 星団系の初期状態に制限

## Mass functionの時間変化

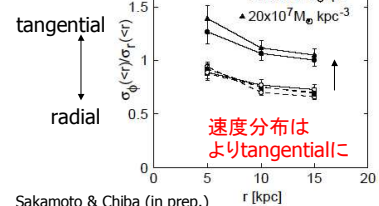


Fall & Zhang (2001)

## 速度分布の時間変化

- Radial orbit上を運動する星団は優先的に破壊
- 形成時の速度分布は

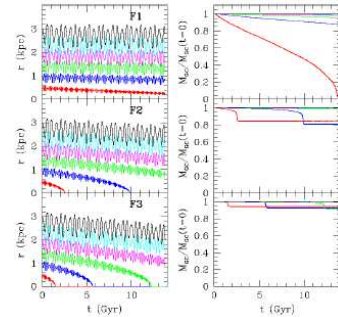
現在よりもよりradial



Sakamoto & Chiba (in prep.)

## 矮小銀河内での球状星団の進化

- 現在矮小銀河に存在する球状星団の進化を追跡
- 多くの星団はどんな軌道を運動していたとしても生き残る



Penarrubia et al. (2010)

## 球状星団系の形成を理解するための次なるステップ

- 現在
- 多くの球状星団はほとんどの間、独立して銀河内を軌道運動していたと仮定  
銀河形成とリンクしていない
- 理想的には
- 銀河形成と一緒に球状星団系の力学進化追跡(矮小銀河の降着を考慮)

## まとめ

- 現在観測されている球状星団系について紹介した。
- 今後は階層的銀河形成論下の星団系形成の議論がなされていくと期待される。