

## Minihalo-Mergers による球状星団の形成モデル

荒田 翔平 (東北大学 天文学専攻)

### Abstract

我々の銀河に存在する球状星団について、近年の高感度の観測によりそれまで知られていなかった特徴が明らかにされてきた。一方で、これらの条件をすべて満たす理論的な形成モデルは未だ確立していない。Trenti et al.(2015) は以下のような Minihalo-Mergers に基づくシナリオを提案した。major merger を経験した halo が水素原子冷却すると、第一世代の星団が生まれる。第一世代のうち一部はすぐに超新星爆発を起こし、その他はその後 AGB となって元素合成したガスを放出する。つづく minor merger を引き金に、第一世代とは金属量の異なる第二世代が形成される。球状星団はその後、tidal stripping によって halo を剥ぎ取られる。このシナリオに基づいて N 体シミュレーションが行なわれた結果、(1) 古い球状星団の絶対的な年齢は 13Gyr であること、(2) 銀河中心の近傍ほど金属量が高いこと、(3) 形成に関わった Dark Matter 粒子の空間分布などが示された。今回の講演ではこの論文をレビューする。

### 1 観測的特徴

球状星団は大きさが数 pc、質量  $\sim 10^5 M_{\odot}$  の非常にコンパクトな星のシステムである。我々の銀河にはおよそ 160 個の球状星団が存在していることが知られており、今回の研究対象である。近年、分光や測光観測が進み、これらの性質の理解が深まっている。ここではそのいくつかを取り上げる。

- 古い球状星団の絶対的な年齢はおよそ 13Gyr である。
- 古い球状星団の [Fe/H] は太陽に比べて 1% から 1/3 までと幅広く分布する。銀河中心ほど metal-rich の球状星団が見つかる傾向がある。
- ひとつの球状星団は C,O などの軽元素について複数種類の星から成る。色等級から相対的な年齢差は  $\sim 1$ Gyr 未満である。
- 広がった Dark Matter(DM) halo を伴っていない。
- 球状星団の数密度は銀河中心で高く、遠方では銀河中心距離に対する密度プロファイルにして  $R^{-(3.5-4.0)}$ 。

### 2 形成シナリオ

Trenti et al.(2015) では、観測から得られたこれらの条件をすべて満たす形成モデルを構築するべく、以下のようなシナリオを提案した。

1.  $z \sim 10$  のころ、ガスを豊富に持ち、星形成をしていない minihalo 同士が major merger することから始まる。ここで言う minihalo とは、質量が水素原子冷却が可能となる閾値 ( $T_{vir} \sim 10^4$ K) に達していない DM halo を指す。それぞれの halo 内部のガスは周囲の Pop II 銀河からのアウトフローによって金属汚染されていると考える。merger の結果  $T_{vir} > 10^4$ K を超えた場合、スターバーストが起こり球状星団の第一世代が形成される。
2. 第一世代のうち、大質量星は数 10Myr で寿命を向かえ II 型超新星爆発を起こし、halo 内のガスをすべて吹き去り、ここで一旦星形成が止まる。小質量星はおよそ 100Myr ほどで AGB となって星内部で合成した C,O などの軽元素を含むガスを放出する。
3. さらに数 100Myr 後、minihalo との minor mergers により第二世代が形成される。第二世代は AGB のガスを含む成るため、第一世代と異なる金属量を持つこととなる。

4. 球状星団を作った halo はその後、我々の銀河に降着する subhalo へと成長する。DM halo は潮汐力のため剥ぎ取られ、広がった DM halo を伴わない星団が残される。

### 3 手法

このシナリオが観測されている性質を再現することを確かめるため、N 体シミュレーションが行なわれた。体積を  $10^3 \text{Mpc}^3$  だけ取り、初期条件は宇宙論パラメータで与え、 $z = 150$  から  $z = 0$  まで 10Myr ごとにスナップショットを撮って DM 粒子を追う。Trenti & Stiavelli(2009) に基づいて、Pop III の形成は質量が水素分子冷却が可能となる閾値を超えた DM halo ( $M_h \geq M_{min}(z)$ ) で生じるとする。Pop III の超新星爆発によって金属汚染された halo が  $T_{vir} > 10^4 \text{K}$  であれば Pop II 銀河を形成し、周囲にアウトフローを放出する。 ( $v_{wind} = 60 \text{km/s}$  に固定。) ある halo の金属汚染量の目安として、いくつかのアウトフローの波面内にあるかをカウントする。(カウント数: $\xi$ ) 球状星団の第一世代の形成の条件は、(1)  $T_{vir} < 10^4 \text{K}$ 、 $\xi \geq 1$  にある 2 つの halo が、(2) 質量比  $\geq 1/4$  で merging し、かつ (3) merger 後の質量が  $T_{vir} > 10^4 \text{K}$  となるとし、その位置と時間 ( $\mathbf{x}, z$ ) を記録して年齢を見積もる。またこの merger に関わった halo に含まれる DM 粒子の  $z = 0$  での分布を見る。

## 4 結果

### 4.1 Merger rate

前節で述べた条件で、球状星団の第一世代を形成する merger が何回起こるかを調べた。  $z = 0$  で  $M_h = 4.9 \times 10^{12} M_\odot$  となる main halo 内での merger rate の結果が図 1 である。この場合では  $z > 5.5$  までに 279 回であった。

この図から球状星団形成のイベントは  $z \sim 10$  付近に鋭いピークを持つことが分かる。  $\langle z \rangle = 9.3, \Delta z = 1.9$  であり、年齢にすると  $t_{age} = 13.2 \text{Gyr}, \Delta \sim 200 \text{Myr}$  となる。実際は merger 後、数 100Myr かけて星形成をされると考えられるため、古い球状星団の

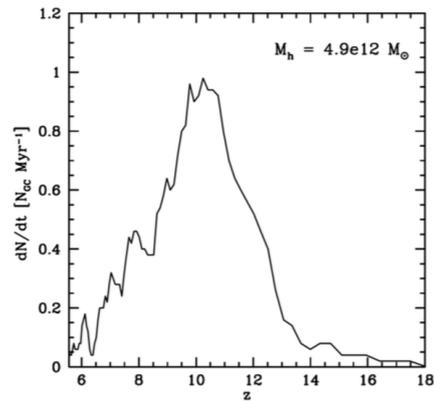


図 1: Minihalo-Mergers による球状星団の形成率。  $z = 0$  で  $M_h = 4.9 \times 10^{12} M_\odot$  になる大きな DM ハロー中の mergers,  $z > 5.5$  までに 279 回、形成される平均の redshift は  $\langle z \rangle = 9.3$ 、分散は  $\Delta z = 1.9$  である。

絶対年齢は  $t_{age} \sim 13 \text{Gyr}$  と見積もられ、これは観測と一致する。またこの広がり狭さが観測される古い球状星団の絶対年齢の広がり狭さを説明する。

$z = 0$  で  $M_h = 0.8 \times 10^{12} M_\odot$  となる main halo の場合では 32 回であった。このように main halo の質量によって不定性がある。また、今回のシミュレーションでは major merger の定義を、merger する二体の質量比が  $\geq 1/4$  としたが、ここにも定義による不定性が伴う。

第一世代を形成した halo のうち大半は  $\sim 250 \text{Myr}$  経過すると minor merger (質量比  $\geq 1/10$ ) を受けていることが merger tree から分かる。ここからシナリオ上の AGB 以降の説明につながり、多世代の星ができることが保証される。

### 4.2 $z = 0$ での空間分布

図 2 は、 $z = 0$  で main halo の質量が  $0.8 \times 10^{12} M_{odot}$  になる場合での空間分布を表す。上から順にすべての DM 粒子、形成に関わった halo に含まれていた DM 粒子、 $\xi$  の  $z = 0$  での空間分布である。この図の上段、中段について銀河中心距離に対する DM 粒子の密度プロファイルを示したのが図 3 である。minihalo-mergers に関わった DM 粒子は、すべ

ての DM 粒子と比べてより鋭い分布になっていることが分かる。また図 2 の中段で、DM 粒子は diffuse に広がった分布をしている。これは tidal stripping の結果と見れば、今回のシナリオを支持している。図 2 の下段より、銀河中心ほど金属量の大きい球状星団が見つかりやすいことを示している。

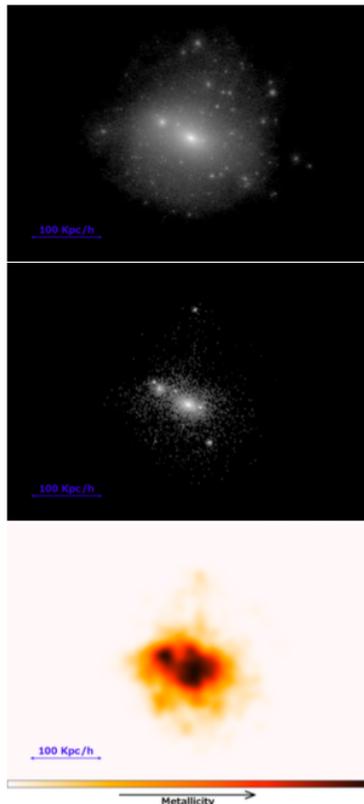


図 2: 上段から順にすべての DM 粒子、 $z > 5.5$  までに merger した halo 内にあった DM 粒子、 $\xi$  の空間分布。

## 5 議論

今回見積もられた球状星団の形成期は  $z \sim 10$  であるので、ちょうど宇宙再電離期に当たる。再電離の主役は銀河であったが、球状星団も少なくない程度に寄与したと予想される。今回のシミュレーションでは DM 粒子だけを追っているため、仮定した条件で実際に球状星団が形成されるかについては、バリオンの物理も含めた上で改めて調べる必要がある。

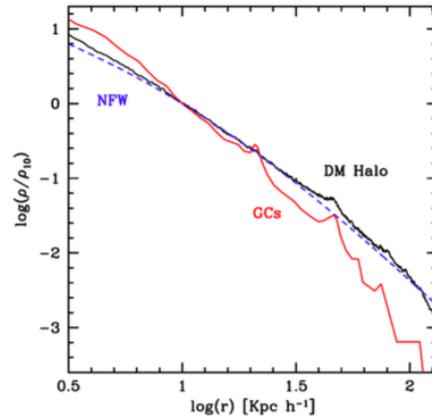


図 3: 図 2 の場合での、銀河中心距離に対する DM 粒子の密度プロファイル。黒線はすべての DM 粒子を表し、点線の NFW モデルによく合っている。赤線は minihalo-mergers に関わった DM 粒子を表し、より鋭い分布 ( $\rho \sim r^{-3.5}$ ) になっている。

また、minor merger で minihalo が第一世代の中心まで到達するという点にも疑問が残る。minihalo の降着中の構造についても詳細に調べる必要があるだろう。

## 6 結論

minihalo-mergers による球状星団の形成シナリオを提案し、パラメータフリーの N 体シミュレーションで絶対的な年齢を見積もった。結果、古い球状星団の年齢は 13Gyr と見積もられ、これは観測で知られる年齢とよく合っている。

## Reference

- Trenti et al. 2015 arXiv 1502.02670
- Trenti, & Stiavelli 2009, ApJ, 694, 879
- Conroy, & Spergel 2011, ApJ, 726, 36