

## 論文内容の要旨

論文題目    Formation and Chemodynamical Evolution of Galaxies  
(銀河の形成と化学力学進化)

氏    名    小林 千晶

宇宙には渦状銀河や楕円銀河、矮小銀河といったさまざまな形の銀河がある。そのような銀河の形態の起源を探ることは、現代の天文学の重要なテーマである。近年の観測装置の発達、とくに多天体分光器の発達により、系外銀河の星や球状星団の光学的化学的力学的性質が観測され、銀河の三次元的な内部構造の進化が明らかになりつつある。また、さまざまな距離にある遠方銀河団の観測から、銀河間の相関関係の進化や、銀河と銀河団環境との相互作用の歴史が得られつつある。こういった詳細な観測結果を解釈し銀河の形成・進化を解明するためには、より現実的な数値シミュレーションを行って比較することが必要である。

そこで私は、ガスと星とダークマターの力学系としての銀河の力学進化と、星が元素合成した結果である銀河の化学進化を三次元 N 体 SPH 数値シミュレーションによって同時に解き、楕円銀河の (1) 相関関係と (2) 内部構造という観測事実を実証的に説明することで、楕円銀河の形成と進化を議論した。

私の銀河進化モデルは、三次元の流体と重力多体問題を同時に解くことによって、ガス雲からの天体の形成を追う。流体の部分には密度の変化が大きい系の計算に適している SPH コードを使用し、最も計算時間を要する重力多体問題

を解く部分には重力多体問題専用計算機 GRAPE を利用する。観測と比較しうる化学力学進化モデルを構築するためには、星形成に付随するさまざまな物理課程を導入することが必要であり、私のモデルでは、放射冷却、星形成、恒星風と Ia 型および II 型超新星によるエネルギーと重元素の星間空間への還元を導入した。

楕円銀河に色 - 等級関係や金属量勾配があることは、楕円銀河の形成時に、ガスが冷却し星形成が行われ重元素が増加するという過程が効いていたことを意味する。楕円銀河の形成説については、(A) ガス雲の散逸的収縮説と、(B) 渦状銀河同士の衝突合体説が拮抗している。(A) 前者では、楕円銀河は赤方偏移  $z \sim 2$  以上前にバースト的に星形成を行い、一斉に発生した超新星爆発によって銀河風を起こしガスを銀河の外へ放出、後は星生成を行わずに受動的に進化をしたと考える。この説は楕円銀河の色の受動的な進化を説明することができる。しかし CDM 宇宙論によると宇宙初期に銀河スケールの天体が単体で存在することは不可能である。(B) 後者では、本来宇宙に誕生するのは渦状銀河で、楕円銀河は渦状銀河の衝突合体によって形成されたと考える。銀河団における形態 - 密度関係を説明しやすい。しかし形成時期が  $z \sim 0.5$  程度と遅すぎ、観測と矛盾する点も多い。

私は、CDM 宇宙論に基づく第三のシナリオ (C) を採用し、GRAPE-SPH コードを用いて、CDM ゆらぎを与えた 72 個の銀河領域の化学力学進化をシミュレーションした。銀河は複数の矮小銀河の連続的な合体によって形成される。合体の歴史はさまざまで、初期条件によって変わってくる。どの場合も大部分の星は最初の爆発的な星形成で 100 億年以上前に形成される。その結果、72 個の銀河領域の 82 個の銀河と 42 個の矮小銀河が形成された。 $z \sim 3$  以降に同程度の質量の銀河との衝突合体 *major merger* を経験した楕円銀河は約半分の 36 個だった。

そして、観測される楕円銀河の二大特徴を再現することに成功した。

(2) 楕円銀河のさまざまな物理量には相関関係があり、これらの傾きをすべて再現した。

i) 最もよく知られた関係は Faber-Jackson 関係とよばれる質量 - 光度関係で、これを再現した。大質量の銀河ほど明るい。ii) この関係に銀河の広がりを表す半径を加えると、分散のより小さい関係、原理平面が現れる。原理平面は質量光度比と光度の関係だと解釈されていて、私のモデルでもそうになっている。

iii) major merger を経験した銀河は、有効半径が大きく、有効半径内の平均の面輝度が小さくなり、質量光度比が大きくなる傾向がある。よって、観測される原理平面のわずかな分散の起源は合体の歴史の違いである。

iv) もうひとつの重要な関係は、色 - 等級関係や吸収線強度と速度分散の関係、つまり大質量の銀河ほど金属量が多いという質量 - 金属量関係で、これを再現した。v) 私のモデルでは星形成は局所的なガスの密度によって決まっています、大質量の銀河ほどガスの密度は高くなるので、星形成は多くなり、金属量も高くなる。この関係の分散は観測と同様、非常に小さい。

(2) 楕円銀河の光度分布は de Vaucouleurs 則に従って一様であるに対し、金属量の動径方向の勾配は多様で、他の物理量と相関しないことを再現した。つまり同質量 / 同光度 / 同金属量の銀河でも金属量勾配は異なっている。

i) 銀河の形成時には、金属量の高いガスが中心に流れつつ星形成を起こすので、星の金属量は中心ほど高いという勾配が自然に現れる。初期の勾配は  $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] / \Delta \log r \sim -1.5$  から  $-1.0$  と鋭い。ii) しかし、その後ガス降着が続き、銀河の外側で星形成が起こると、金属量勾配は少しずつ浅くなり、 $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] / \Delta \log r \sim -0.5$  程度になる。また、大部分の銀河の星々が形成された後に他の銀河と衝突合体すると、勾配は  $1.0$  から  $0.5$  dex 程度一気に浅くなる。ただし、衝突した銀河が大量のガスを含んでいて、銀河中心部で大規模な星形成を誘発する場合は、勾配はそんなに浅くならない。iii) 典型的な酸素の勾配は  $\Delta \log [\text{O}/\text{H}] / \Delta \log r \sim -0.3 \pm 0.2$  で、 $\text{Mg}_2$  インデックスによる観測値と一致する。つまり半径が十倍になると金属量は半減する。iv) 金属量勾配は、質量にも光度にも金属量にも相関しない。金属量勾配の多様性の起源は合体の歴史の違いである。金属量勾配は、合体を経験しない銀河では鋭く、合体を経験したものは浅い。銀河の酸素、鉄、金属量の勾配は、合体を経験しない銀河と経験した銀河でそれぞれ、 $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] / \Delta \log r \sim -0.45, -0.38, \Delta[\text{O}/\text{H}] / \Delta \log r \sim -0.25, -0.24, \Delta \log Z / \log r \sim -0.30, -0.24$  である。

楕円銀河が相関関係に従うという一様性は、星形成の法則がひとつであることと、大部分の星はその後の進化とは関係なしに初期に形成されたことを意味する。金属量勾配にみられる内部構造の多様性は、楕円銀河の進化の歴史がさまざまであることを意味する。金属量勾配の観測値は、合体を経験しない銀河と経験した銀河の割合は半々であることを示唆している。

以上のように私は、シナリオ (C) を用いて、観測される楕円銀河の (1) 相関

関係と (2) 内部構造を同時に説明することができた。(A) のようにすべての楕円銀河が単一のガス雲から生まれる必要も、(B) のようにすべての楕円銀河が渦状銀河の衝突合体によって生まれる必要もない。CDM 宇宙論が要求する通り、楕円銀河は複数の矮小銀河の連続的な合体によって形成された。合体の歴史はさまざまで、あるものは非常に遠方で形成されたままほとんど進化せず、またあるものは最近に他の銀河と衝突合体した。いずれの場合も、大部分の星は最初の爆発的な星形成で 100 億年以上前に形成され、質量・光度・金属量といった銀河全体のグローバルな物理量に違いは現れないが、金属量勾配にみられる内部構造には、合体の歴史が反映されている。つまり観測される現在の銀河の金属量勾配から、その銀河の合体の歴史を推測することができるのである。