

氏名	安部 牧人
学位の種類	博士 (理学)
学位記番号	博 甲 第 7636 号
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理解物質科学研究科
学位論文題目	

Three-Dimensional Radiation-Hydrodynamic Study on the Formation of Star Clusters Regulated by External Ultraviolet Radiation  
(外部紫外線輻射場によって制御される星団形成に関する3次元輻射流体力学による研究)

主査	筑波大学教授	理学博士	梅村 雅之
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	森 正夫
副査	筑波大学講師	博士(理学)	吉川 耕司
副査	国立天文台准教授	博士(理学)	中村 文隆

## 論 文 の 要 旨

非常に古い星団として知られる球状星団は、矮小楕円銀河といった他の低質量天体とともに階層的構造形成過程の初期段階に形成されたと考えられるが、楕円銀河の中心速度分散( $\sigma_0$ )と光度( $L$ )の関係は $\sigma_0 \propto L^{1/4}$ に従うのに対し、球状星団は $\sigma_0 \propto L^{1/2}$ を示し、光度に対してより高い速度分散を持つコンパクトな天体である。初期宇宙においてどのような形成過程を経て、球状星団が他の天体と比べてコンパクトな星団となったかは明らかとなっていない。最近の観測から、宇宙は赤方偏移 $z > 6$ で電離していることが分かっており、大部分の球状星団が形成された時期には強い電離光源が存在していたと考えることができる。紫外線は、光電離・光加熱過程によってガスの重力成長を妨げ、さらに初期宇宙で重要な冷却剤である水素分子の形成を阻害する。紫外線輻射場中においては、星はガスの自己遮蔽領域でのみ形成されるため、自己遮蔽に至るまでの過程を正しく取り扱うことで、球状星団のような特殊な天体の形成過程を説明できる可能性がある。

ガス雲の収縮の早い段階で弱い紫外線が入射する場合は、すぐさま自己遮蔽領域が形成され、星団を形成することができる。このような形成過程は、宇宙再電離期における矮小銀河の形成過程としてこれまで提案されている (e.g., Susa & Umemura 2004)。一方で、入射する紫外線がガス雲の大半を電離するほどに強力な場合は、光加熱によってガス雲は蒸発してしまうため、球状星団程度の低質量天体形成は成されないと考えられてきた。しかし、ガスの収縮速度が電離ガスの音速 (10 km/s) 程度に達したタイミングで強力な紫外線が有効になる場合は、ガスは電離した状態のまま収縮を続けることができる。高温の電離ガスが収縮する過程ではガスの散逸が有効に働き、強力な紫外線のためにコンパクトな自己遮蔽領域を形成した後、遮蔽領域で星形成が開始さ

れる。電離ガスの超音速落下によって形成される星団は球状星団程度にコンパクトなものとなり、またこのような星団形成モデルは、 $\Lambda$ CDM 宇宙論において  $1\sigma$  以上の **overdensity peak** で実現されることが 1 次元球対称の輻射流体力学計算によって示されている (Hasegawa et al. 2009)。

しかし、背景紫外線輻射場中の天体形成で重要となる自己遮蔽効果はガス密度の 2 乗平均に依存し、ガス雲の 3 次元的な非一様性に影響される。また背景輻射場が非等方的な場合は遮蔽領域も非等方的になるため、ガスの収縮過程が 1 次元球対称計算と同様に振る舞うことは自明ではない。加えて、一次元球対称計算ではガス雲での局所的な星形成や、星粒子の運動についても詳細に追う事ができない。博士論文ではこのような多次元性に注目し、紫外線輻射場中の星団形成モデルについてより踏み込んだ検証を行った。先行研究での示唆から、**high- $\sigma$  overdensity peak** に対応した非一様密度構造を持つ低質量ガス雲 ( $10^{6-7}$  太陽質量) を生成し、ガスの自己重力流体力学 (SPH 法)、分子の非平衡化学反応、輻射輸送、ダークマターの重力を同時に解く 3 次元の輻射流体力学計算によって、等方輻射場・片側照射中でのガス雲の収縮過程、自己遮蔽に至る過程を正確に解いた。更に紫外線を遮蔽し十分冷却したガス粒子を星粒子とみなし、重力多体計算をすることで形成された星団のダイナミクスを評価した。

片側照射の場合について電離ガスの超音速落下モデルを検証した結果、等方輻射場と違い日陰領域を伴った非等方性の強い自己遮蔽領域が形成されるものの、星形成の大半は輻射場の非等方性にあまりよらずに系の中心から  $\sim 10$  pc 程度のコンパクトな領域で行われることが分かり、先行研究で提唱されたモデルが非等方的な背景輻射場中でも実現可能であることを新たに明らかにした。一方、背景紫外線が弱い場合には収縮の早い段階で自己遮蔽が実現し、ガスの散逸があまり効かない段階で星形成が開始されることを確認した。星粒子の運動を追跡した結果、電離ガスの超音速落下によって形成される星団は、半質量半径、**mass-to-light ratio**、速度分散-光度関係それぞれが球状星団の観測と矛盾しないコンパクトな星団となり、背景輻射場が弱い場合には矮小楕円体銀河のようなダークマターが支配的な **diffuse** な星団となることが示された。以上のように、博士論文では先行研究で提案されていた星団形成モデルを 3 次元輻射流体力学計算で再検証し、より強い立場で低質量天体のダイナミクスが背景輻射によって制御され、特に電離ガスの超音速落下による星団形成モデルが球状星団の形成過程を説明する上で有力であることを示した。

## 審 査 の 要 旨

[批評]

球状星団は、現存する最古の天体で、100 億~130 億年の年齢を持ち、非常にコンパクトな天体である。その形成メカニズムは、銀河形成と密接に関係すると考えられているが、まだ解明されていない。安部氏は、紫外線輻射場の影響に注目し、球状星団形成に関する 3 次元輻射流体力学計算を世界で初めて行った。その結果、紫外線輻射場が等方的な場合でも非等方的な場合でも、観測されているようなコンパクトな星団が生まれることを明らかにした。これは球状星団形成の新たな理論の提唱となり、その学術的価値は大変高いと判断される。

〔最終試験結果〕

平成 28 年 2 月 10 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。