

氏 名 坂 本 強

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第755号

学位授与の日付 平成16年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Dynamical Evolution of a Globular Cluster  
System as a Probe of Galaxy Formation  
and Dynamics

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 郷田 直輝  
教授 家 正則  
教授 川口 則幸  
助教授 梶野 敏貴  
教授 千葉 柁司 (東北大学)

## 論文内容の要旨

球状星団系は、銀河において最も年齢が古いことから、銀河初期や銀河形成過程を考察する際に大変重要な部ロブとなる。したがって、星団系形成されてからどのような力学進化を経て現在に到ったかを理解することにより、星団形の初期状態や銀河形成過程についても知見が得られると期待される。特に、近年すばる望遠鏡などによって高空間分解能観測が可能となり、銀河系ばかりでなく系外銀河の球状星団形についてもさまざまな観測データ（色分布、速度分布、空間分布）が集積されつつあるので、系統的に星団系進化を考察することが可能となってきた。一方、球状星団系の進化に関する理論研究として、これまで主にその質量関数の進化に重点が置かれ、多くの準解析的手法などによって調べられてきている。しかし、星団系全体の動力学構造（速度構造と空間構造）の進化に関する研究は不足しており、特に星団系は初期にどのような動力学構造をしていたのか、そしてそれは階層的銀河形勢の予言と合致しているのかどうか全く不明である。

そこで我々は、球状星団系の動力学構造と質量関数がどのように進化するかを考察し、準解析的手法によって進化過程を追跡した。過去の研究においてはその球状星団系の進化をダークハローのみを含む銀河の重力場の下で追跡していたが、われわれはダークハローのみならず、銀河円盤をも陽に考慮した軸対称ポテンシャルの銀河の下で自己矛盾なくおのおのの星団の軌道運動や質量損失を追跡している。我々は、この質量損失家庭として星団内の星の進化や星同士の重力相互作用による緩和、さらに銀河重力場から星団内の星に与えられる *gravitational shock* を考慮し、さまざまな銀河環境下で球状星団系に様々な初期状態を採用し、その総数、質量関数、さらに動力学構造の進化を 13Gyr の間、追跡した。

その結果は主に次のとおりである。

(1)球状星団系の初期状態としてどのような状態を採用しても、それがどのような銀河環境におかれていても、最終的な質量関数は  $10^5 M_\odot$  付近にピーク付近をもつ Gaussian-like な形になり、それは様々な形態の銀河において現在観測されている球状星団系の質量関数とほぼ一致している。(2)離心率の大きい軌道上を運動する球状星団は銀河中心付近を通り、その際銀河重力場からうける潮汐力によって破壊されやすいので、球状星団系の最終的な速度構造は初期に比べより *tangential* に非等方になる。この非等方性は球状星団系の初期状態やそれが置かれている銀河環境に依存し、初期に *radial* に非等方な速度構造を持つ球状星団系が、中心集中度の高いかつ重い銀河の下でより顕著になる。(3)球状星団の生存率はその親銀河の内部環境のみならず、初期の球状星団系の動力学構造に依存している。この結果から銀河形成初期にその形態によらず同数の球状星団が形成されたとしても、その速度構造が大きく異なるために、その後、その構造に応じて星団系が進化し、その結果、銀河の形態ごと観測される球状星団の総数が異なっている可能性があることがわかった。

また、本研究で得られた球状星団の力学進化に基づき、現存する球状星団を銀河の質量決定に用いた場合、その動力学構造の進化効果はどの程度影響を与えるのか定量的に分析した。そして、現在最も精度よく球状星団の速度場が観測されている銀河系と M31 に関して、我々の理論モデルを適用して考察を行った。

## 論文審査結果の要旨

球状星団系は、銀河において最も年齢が古い成分であることから、銀河の形成過程や進化に関して大変重要な知見を与える。そこで申請者は、現在見られる星団系が様々な銀河環境の中でどのような進化を経て現在に至ったのかを調べることによって、星団系の初期状態（質量、空間、速度の分布）の知見を得るとともに、銀河についての重要な情報を知るための研究を行った。

個々の球状星団は、(i)星団内の恒星進化過程、(ii)星団士の重力相互作用による2体緩和、(iii)星団が軌道運動する際に受ける急激な銀河重力場の変化（重力ショック）、等の過程によって質量損失を引き起こし、この結果、星団系の質量分布や速度構造が変化する。従って、このような力学進化を詳細に追跡することによって、現在の観測データから星団系の初期状態を評価することが可能となる。ところが、これまでの関連する研究では、球対称を仮定したダークハローによる重力場のみを考え、さらに星団系の質量関数の進化のみが解析されてきており、実際の観測データから星団系の初期状態を考察するには不十分であった。そこで申請者は、軸対称な銀河円盤を陽に考慮した上で星団系の進化に関する一般的な定式化を行い、星団系の質量分布のみならず、速度構造や空間分布なども同時に追跡できる数値コードを開発して、星団系の進化と初期状態に関して詳細な解析を行った。

申請者の理論解析から、次のような点が明らかになった。(1)球状星団の初期質量関数として、10万太陽質量より低湿両側までに渡る形を取っていれば、それがどのような関数形であっても、さらに銀河重力場の形にもよらずに、130億年後の最終的な質量関数は10万太陽質量付近にピークを持つガウシアン的な形を取り、様々な銀河において導出される星団系の質量関数とほぼ一致する。(2)離心率の大きい軌道上を運動する球状星団は、銀河中心付近を通り銀河重力場による潮汐力によって破壊されやすいので、星団系の最終的な速度は初期に比べ、接線方向の速度分散が半径方向の速度分散より卓越しやすいことが定量的に示される。(3)球状星団の生存率は、その親銀河の内部環境のみならず初期の球状星団系の動力学構造にも依存している。以上の結果は、星団系の初期状態を考察する上で大変重要な知見を与えるものである。

申請者はさらに、球状星団系を銀河質量決定のプロブとして用いた際に、星団系の即構造の変化によって、観測の際に低い速度の天体が選択されやすい効果が生じ、最大2倍程度の範囲で質量を過小評価することが分かった。このバイアスを考慮した上で、球状星団等の天体の最新の3次元運動データを集積し、銀河系の総質量に関する最も確からしい値（ $1.8\text{--}2.5 \times 10^{12}$  太陽質量）を得た。なお、この質量決定の結果はすでに学術論文として発表されており、関連する分野の研究者に最新の決定値として採用されている。

以上、申請者の研究成果は、球状星団の力学進化の考察により、星団系の初期状態と銀河構造の理解に重要な指針を与えるものであるとともに、銀河の形成・進化を理解するうえでの有効なアプローチを確立したものであり、高く評価できる。

審査委員全員の出席のもと、公開の論文発表会を行った。まず、申請者による論文内容の口頭発表を約40分間行い、引き続き審査委員ならびに一般聴講者による質疑応答を約30分間、さらに審査委員だけによる質疑応答を約20分間行った。申請者は、研究の背景、目的・意義、解析手法や独自性・独創性、研究結果の要点とその重要性や新たな知見など

について、明確に説明した。さらに、質疑に対しても明快に受け答えした。その後、審査委員のみによる審議を行い、その結果、論文の科学的な価値が十分に認められること、出版済みの学術論文についても申請者の寄与によるものが大きいこと、といった点に関して確認した。さらに、申請者の天文学に関する学識や力量が十分であることを確認し、また論文が明快な英文で書かれていることから、語学力についても問題ないことが認められた。

以上の試験の結果、申請者は天文科学において、博士（理学）の学位を受けるに相応しい力量を持つものと認め、審査委員全員一致により合格と判定した。