

## 審査の結果の要旨

論文提出者 谷川 衝

多くの恒星が集まってできている銀河、球状星団、あるいは銀河団といったシステムは、多くの粒子が重力だけで相互作用しているシステム、すなわち重力多体系として扱うことができる。これらの系の力学的進化がどのようなメカニズムで起きるかによって、重力多体系は衝突系と無衝突系に分かれる。無衝突系とは、2体衝突による熱力学的緩和が無視できるようなシステムのことである。無衝突系の代表的なものは銀河であり、緩和時間は $10^{16}$ 年以上と、宇宙の年齢の $10^{10}$ 年よりもはるかに長い。これにたいして球状星団は衝突系の典型的な例であり、緩和時間が $10^8$ ないし $10^9$ 年程度と短い。したがって、球状星団の多くは、形成以来、緩和時間の数倍から数十倍の時間を経て来ているので、熱力学的平衡状態に到達していることになる。しかしながら、重力多体系は一般に熱力学的平衡状態が存在しない。このことにより、球状星団の熱力学的進化は古くより天文学上の重要かつ困難な問題であった。

球状星団は数十万程度の恒星からなっているので、恒星を質点とみなして、重力多体系として数値シミュレーションする方法が最も現実を近似している。しかし、この $N$ 体シミュレーションは多くの計算資源を必要とするので、現実的な粒子数をとっての計算は行えなかった。これまでの球状星団の熱力学的進化に関する研究では、ガス近似、フォッカー・プランク近似などの段階を経て、近年になって、ようやく $N$ 体シミュレーションにより、重力熱力学的振動と呼ばれる現象が起こることが示された。つまり、星団の中心部において、熱が外側へ輸送されることに伴い、中心部コアが重力熱力学的に収縮していき、恒星の密度が高くなると、3体衝突により、連星が形成される。この連星が新たな熱源となり、星団中心部に熱を供給するので、星団中心部が収縮から膨張に転じるからである。

本来、星団の初期状態には連星がたくさん含まれている。しかし、これまでの研究の多くは、星団の初期状態として、連星を含まない状態からシミュレーションを開始している。熱源としての連星の働きを十分理解するには、初期にどのような内部エネルギーをもった連星がどのくらいあればよいかを調べねばならない。

論文提出者は上のような方向の研究、すなわち球状星団の進化の研究をより現実的な初期連星の効果を考慮したものに拡張することと、その応用として、球状星団における二重中性子星連星の形成率の見積もりの2つを行なった。

本論文は5章からなる。論文は、共著者との連名で出版予定であるが、そのすべてが論文提出者の谷川衝が筆頭著者であるだけでなく、彼の主導で研究が進められたものであることを論文審査において確認した。なお、その論文の内容を主論文のなかに含めることについては、共著者の承諾書が得られている。

本論文第1章は序論であり、以上のような研究の背景や従来の研究の問題点をまとめ、本研究の目的と意義を述べている。

第2章では、球状星団の $N$ 体シミュレーションを効率的に行うために、著者自ら開発したシミュレーションコード”GORILLA”について述べられている。このコードの特徴は、他の恒星からある程度離れた場所に存在する連星を、ケプラー運動する2体として分離し、その連星を新たに質点として扱うものである。この簡単な処方により、既存のコードでは計算が途中でストップするような場合でも、

容易に計算が継続可能になった。このことにより、第3章に示された計算結果がはじめて得られており、高く評価できる。

第3章では、上記のシミュレーションコード”GORILLA”を使い、球状星団に初期連星が含まれている場合に、重力熱力学的振動がどのように進むかを詳しく調べた結果が述べられている。主に2つの初期パラメータについて、詳しく調べている。ひとつは初期の連星の割合であり、残るひとつは、連星の内部エネルギーの大きさである。球状星団の質点1個あたりの初期運動エネルギーを $1.5kT$ とすると、連星の内部エネルギーが小さい( $1kT$ ,  $3kT$ )場合と大きい( $300kT$ ,  $1000kT$ )場合には、重力熱力学的崩壊が深くなり、中間( $10kT$ ,  $30kT$ ,  $100kT$ )の場合は、途中で止まった。この傾向は、次のようにして説明される。連星の内部エネルギーが小さい場合は、連星そのものが第3体との衝突により壊されてしまうことで、熱源とはならない。また、内部エネルギーが大きい場合は、連星と相互作用した第3体が大きな反跳エネルギーを得て、球状星団の外に飛び出してしまうので、星団にエネルギーを与えることができないので、これも熱源とはなり得ない。また、初期連星の割合は、主に内部エネルギーの小さい( $3kT$ )場合に顕著に現れる。連星の割合を3%、10%、30%と増やしていくと、30%で重力熱力学的崩壊が途中で止まった。これらの結果は、球状星団中における初期連星の内部エネルギーの分布が本質的に重要であることを明らかにした点で評価できる。

第4章では、第3章における結果を用いて、球状星団中で形成され、星団より飛び出してくるであろう二重中性子星連星の形成率を見積もった。二重中性子星連星は、ショートガンマ線バーストの母天体として近年注目を浴びている天体である。著者の見積もりでは、球状星団中心で形成されたこれらの二重中性子星連星の総数はわれわれの銀河全体で、数千から数万個におよぶという結果を提示している。このことは、われわれの銀河系に存在する二重中性子星連星のかなりの部分が球状星団起源であることを示唆する。

第5章は、上記のまとめである。

論文提出者は $N$ 体シミュレーションコードを自ら作成し、球状星団中に初期連星が多く含まれる場合の、重力熱力学的進化の計算を行った。その結果、初期連星の内部エネルギー分布が非常に重要であり、その後の球状星団の熱力学的進化を決定することを明確に示した。さらに、その結果を、球状星団の中心部で起こる二重中性子星連星の形成に応用し、その形成率を見積もった。得られた形成率は、われわれの銀河の二重中性子星連星の起源に重要な示唆を与えることになった。この結果は球状星団の力学進化における初期連星の重要な役割を明確にした画期的なものである。

以上を要するに、本論文は衝突系の熱力学的進化の研究と、二重中性子星連星の形成という宇宙物理の研究の2つの重要な分野において、新しい知見をもたらすとともに、新しい発展の可能性を開くものである。よって本論文は博士(学術)の学位論文としてふさわしいものであると、審査委員会は認める。