

## 学 位 論 文 題 名

Tidal Interactions of Red Giants with  
Environment Stars in Globular Clusters

(球状星団における赤色巨星の恒星間潮汐相互作用)

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

球状星団は、約 10 万個からなる密集した星の集団であり、その空間密度はやや星のまばらな周辺部で太陽近傍のおよそ 10 倍、中心部には太陽近傍の 1000 倍以上にも達する高密度なコアを持ったほぼ球対称な星団である。この高密度コア内では、恒星同士の衝突、及び近接遭遇が球状星団の年齢よりも短い time scale で頻繁に起こっていると考えられている。そのため、恒星同士の相互作用が球状星団の恒星の進化や球状星団の力学的進化に及ぼす影響が注目されている。又、球状星団は宇宙で最も古い星団であるため、銀河の進化の描像を知るための手がかりとしても重要な役割を担っている。

実際、多くの球状星団において、赤色巨星が通常の恒星進化では説明できない表面組成の異常を示すことが知られている。又、近年では同様の組成異常が主系列星からも見出されている。これらの現象は、銀河のハローの恒星には見られず、球状星団特有のものである。この赤色巨星に見られる組成異常を引き起こす方法の 1 つとして、恒星の差動回転の不安定性に伴う乱流混合が赤色巨星のヘリウムコア上部における熱的な暴走である水素燃焼反応を引き起こし、それにより核物質を赤色巨星表面までさらい上げるといった混合機構 (Flash-Assisted Deep Mixing, Fujimoto et al.1999) が提案されている。この乱流混合を引き起こすためには角運動量が必要である。しかし、低質量星は主系列の間に magnetic stellar wind 及び、赤色巨星段階の質量放出によって角運動量を効率よく失うと考えられているので、この不安定性を励起するために必要な角運動量は、恒星の生来のものではなく、赤色巨星の段階で周囲の星との近接遭遇によってもたらされると考えられる。同時に、主系列星に見られる組成異常も、組成異常を形成した赤色巨星との近接遭遇の際の質量輸送によって降り積もったとすると説明することができると考えられる。そこで我々は、組成異常を持つ天体の形成に必要とされる、周囲の恒星との近接遭遇による角運動量と質量輸送の過程を調べるために、赤色巨星と主系列星との近接遭遇の過程の数値シミュレーションを行い、赤色巨星への角運動量の輸送、赤色巨星から質量放出・遭遇相手の主系列星への質量降着の効率等の物理量を詳しく解析し、組成異常の形成機構の可能性を検討した。本研究では、赤色巨星と主系列星の近接遭遇のシミュレーションを行うため、Benz(1990)やBate et al.(1995)によって開発された 3 次元 SPH コードを用いている。SPH コードを採用した理由は、SPH 粒子が重力と圧力の相互作用を担う赤色巨星の外層が近接遭遇の影響で大きく変形し、さらには、ガスが流出するという複雑な 3 次元の流れを追跡するのに適しているからである。具体的にシミュレーション方法としては、1) 赤色巨星の SPH 粒子 (5 万粒子) を用いて作る操作と、2) 赤色巨星と主系列星とを近接遭遇させる操作の 2 回に分けて実行した。1) の操作は赤色巨星を中心核を等密度の球のポテンシャルで近似し、SPH 粒子からなる外層を静水力学的平衡状態に落ち着かせることによって赤色巨星モデルを作った。2) の操作では、赤色巨星に遭遇する主系列星を質点で置き換え、実際に 1) で作った赤色巨星のモデルと近接遭遇をさせた。主系列星への降着半径は Roche lobe 半径の  $1/2$  と仮定した。

赤色巨星としては、半径が  $20R_{\odot}$  と  $85R_{\odot}$  で total mass  $0.8M_{\odot}$  (の内コア mass が各々  $0.32M_{\odot}$  と  $0.48M_{\odot}$ ) のモデルを採用し、主系列星は  $0.8M_{\odot}$  と  $0.6M_{\odot}$  を採用した場合について計算した (ここで、 $R_{\odot}$  と  $M_{\odot}$  はそれぞれ太陽半径と質量である。) また、2 つの恒星の相対速度は  $10\text{km s}^{-1}$  とし、上記の 4 つの場合について、衝突パラメーターを変えて、全部で 25 の場合について計算した。主系列星の近接通過に伴い、赤色

巨星の外層が潮汐作用によって大きく変形を受け、その変形の大きさは、近星点距離が近づくほど大きくなり、その距離が星の半径の 1.75~2.25 倍で、星の半径におよそ 1.5~2 倍の bulge が生じる、bulge の密度が希薄になるとそれが平衡状態に戻るまでの時間 ( $\sim \rho^{-0.5}$ ) が長くなり、その間に主系列星が近星点付近を通過してしまうため、bulge の動きが主系列星についていけなくなり、tidal lag を生じる。その結果、星に生じるトルクによって星にエネルギー、角運動量が輸送されることになる。またこの際、主系列星の重力圏に入った粒子は主系列星に降着されることになる。また、粘性に関しては、今の場合 convective turn over time  $\sim 0.7$  (yr) と periastron passing time scale に比べて十分長いので、turbulent viscosity による dissipation によりエネルギー等を輸送するメカニズムは働かない。実際、シミュレーションにおいても粘性の違いによるエネルギー、角運動量等の輸送量に違いは見られないことが確認された。

近接遭遇後、星に輸送されるエネルギーが主系列星の無限遠方での kinetic energy よりも大きい場合、軌道エネルギーが負になり bound system を形成する (tidal capture)。逆に少ない場合は主系列星は無限遠方を通り過ぎる (fly-by)。simulations により、この bound/unbound の境界に対応する近日点距離 (tidal capture limit) は主系列星の mass range  $0.6-0.8M_{\odot}$  に対して、 $20R_{\odot}$  の場合、 $r_p/R_{RG} = 2, 1 \sim 2.22, 85R_{\odot}$  の場合  $r_p/R_{RG} 1.52 \sim 1.65$  となり  $85R_{\odot}$  の方が小さいという結果を得た。(ここで、 $r_p, R_{RG}$  は近日点距離と星の半径である。) これは、McMILLAN(1990) が解析的に示唆した結果と一致するが、我々の求めた tidal capture limit は彼らの値よりもやや大きい。

また、詳しく解析し次の結果を得た。

1. 近接遭遇により赤色巨星に輸送されたエネルギー、角運動量を表面でのケプラー回転で剛体回転しているときのエネルギー及び角運動量で規格化した値は赤色巨星の半径に依らず、パラメータ  $\eta = (\frac{M_1}{M_1+M_2})^{0.5} (\frac{r_p}{R_1})^{1.5}$ 、(ここで、 $M_1, M_2, r_p, R_1$  は各々赤色巨星と主系列星の質量、近日点距離及び赤色巨星の半径である) と  $M_1, M_2$  の関数として表されることがわかった。また、Press(1977) の解析解に Fitting Parameter を付け加えることによってエネルギー、角運動量輸送量に対する Fitting formula を求めた。

2. 主系列星への質量降着量に関しては、粒子数を増やしたことで、近星点距離が  $r_p/R_{RG} = 2$  以上で Benz(1991) の 7 千体の計算によって得られた値よりも多くの質量降着が起こることが確認できた。また、赤色巨星へのエネルギー輸送率との間には linear な関係があることがわかった。

3. 角運動量輸送量を  $\eta$  で場合わけすると、 $\eta \sim 2$  でその表面でのケプラー回転の約 1/10,  $\eta \sim 3$  で約 1/100 の角運動量が輸送されていることがわかった。

ここで求めた Fitting Formula によってその際のエネルギー、角運動量輸送量が推測できると考えられる。また、観測される組成異常を持つ主系列及び赤色巨星を恒星間相互作用によって説明することを考える。ここで、赤色巨星へは表面でのケプラー回転の 1/100 以上が、主系列星には表面对流層を覆うオーダーの  $mass \sim 10^{-3}M_{\odot}$  が降着すれば §1 背景で述べたようなメカニズムによってそれらの天体を説明することができる。ここで仮定すると、上で求めた Fitting Formula からこれらに対応する近日点距離 ( $r_{min}$ ) を読み取り、gravitational focusing によって two-body encounter time-scale を見積ると、およそ  $10^8 - 10^9 yr$  になる。これらは赤色巨星の寿命  $\sim 2 \times 10^8 yr$  を考慮に入れたとき短いように思われる。また、tidal capture 後の binary の進化は、軌道角運動量が保存すると仮定すると circularization 終了後、その軌道半径は初期の近日点距離のおよそ 2 倍になる。その後、3 体衝突によって binary の component の 1 つが incoming star と入れ替わる exchange が起こる仮定で組成異常天体が吐き出されると考えられる。また、exchange cross section は binary の separation に比例するため、一度、two-body encounter が起こればよりも短い timescale で起こると考えられる。

よって、これら組成異常を持つ天体を近接遭遇で説明するためには、球状星団の gravothermal oscillation による core-collapse による core 内の密度の増加、及び Mass-segregation による中心部への赤色巨星の個体数の増加など近接遭遇を増加させると考えられるメカニズムを考慮する必要がある。そのため、出来る限り多くの mass-spectra を含んだ N 体シミュレーションによる encounter rate の増加率を調べることが必要となる。その際、恒星間潮汐相互作用による流体力学的効果が encounter rate に及ぼす影響も考慮する必要がある。

## 学位論文審査の要旨

主査	教授	藤本正行
副査	教授	加藤幾芳
副査	助教授	兼古昇
副査	助教授	羽部朝男
副査	助教授	根本幸児
副査	教授	小笹隆司
副査	教授	岡崎敦男 (北海学園大学工学部)

### 学位論文題名

## Tidal Interactions of Red Giants with Environment Stars in Globular Clusters

(球状星団における赤色巨星の恒星間潮汐相互作用)

球状星団は100万から100万個ほどの恒星が密集して、ほぼ球状に分布している恒星の集団である。この球状星団の年齢は100億年以上であり、われわれの銀河系のなかでは最も古い天体のひとつで、その進化過程の解明は、銀河系の形成、初期進化の研究の重要な手がかりとなると期待されている。最近、ハッブル宇宙望遠鏡や8m級の大型望遠鏡による観測の進展に伴い、通常の恒星進化のモデルでは説明できない特異な恒星等が数多く見いだされ、恒星間の衝突、近接遭遇が恒星に、しいては、星団の進化そのものに与える影響の重要性が認識されるようになって来た。これらの観測の一つに球状星団の恒星(巨星のみならず主系列星もふくむ)に見られる表面組成の異常があるが、これらの組成異常は球状星団以外の銀河系ハローの恒星には見られず、星団内での恒星間相互作用による恒星への軌道運動から恒星の自転への角運動量の移入、恒星間の表面物質の輸送・降着よってもたらされたものと考えられる。

本研究はこの表面組成異常のモデルの妥当性、および、それが球状星団の進化にあたる影響を研究するために、赤色巨星と主系列星とが近接遭遇する際の潮汐相互作用の数値シミュレーションを遂行し恒星に与える影響を調べた。数値シミュレーションには、密度の変動幅の大きな流体の計算に都合のよい3次元 Smoothed Particle

Hydrodynamics (SPH) 法を用いて行い、その結果、近接遭遇に伴って、赤色巨星の内部での核反応による組成異常の生成、表面への輸送に必要とされる角運動量が注入、また、赤色巨星の組成異常を起こしたガスの流入によって、主系列星の表面汚染が可能であることを示すとともに、軌道運動から自転運動へのエネルギー、角運動量の転化や恒星間の質量移動について、その機構の特性、パラメーター依存性を詳細に分析しました。そのような近接遭遇の断面積をもとめるため、近接遭遇の衝突パラメーター、恒星の質量等に対する依存性を求めた。後者は、球状星団における近接遭遇の断面積を求めて、観測される頻度を算出し、進化への影響を研究する際の基礎資料となるが、さらに、これまで展開されてきた線形近似での解析理論との比較から、数値計算の結果を衝突パラメーター、質量等の関数として表す包括的な fitting formulae を導いた。

これらの結果は、球状星団内の恒星の相互作用に新しい知見を与えるものであり、また、導出した fitting formulae は、今後、球状星団内の恒星の進化の特異性の研究、さらには、それらを取り入れて球状星団の恒星集団としての進化の研究に展望を与えるものである。

よって、著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。