

学 位 論 文 題 名

# Evolution and Element Mixing in Low-Mass Stars

(低質量星の進化と物質混合)

## 学位論文内容の要旨

低質量星は光度が低く、進化の最後は白色矮星と消えていくので、元素合成の観点から見ても宇宙全体への寄与は小さい。しかし、その最大の特徴である非常に長い寿命によって、太陽質量よりも軽い星であれば、宇宙初期に生まれた星でも元素組成の情報を保持したまま現在まで生き残ることができる。従って、宇宙の形成過程を知る上で低質量星の探査を行うことは重要である。

恒星進化の理論の立場から見ると、低質量星に対する興味はその進化の複雑さが挙げられる。これまでに多くの研究者によって恒星進化の標準理論が構築されてきたが、現在でも観測をすべて説明するまでには至っていない。低質量星に特有な複雑さは、1. 星の表面の対流層による物質の混合、2. 中心密度が高いことによる電子の縮退現象に集約される。さらに星の回転による進化や構造への影響といった複雑な要素を考慮に入れることも近年の発達した観測から要請されつつある。

近年の観測の発達によって、星の表面の元素組成が太陽と異なるものが非常に多く見つかっており、組成異常の問題として、標準理論の枠組みを超えた特殊な混合機構の存在が示唆されている。星の組成の異常を説明する鍵を握るのは、低質量星における物質混合機構であり、それは上記の表面対流層と電子縮退による核反応の暴走現象と密接に関係している。

本研究では、現在、観測結果を説明できない特殊な組成を持った星の起源を理論の立場から解明することを目的として、三つの未解明の問題に対して数値計算による結果を提示した。以下にそれらの概要を述べる。

### 1 低質量種族 III 星の進化

宇宙の最初に生まれた星が現在観測され得るかどうかについては、これまでに理論と観測の両面から議論がなされてきたが、近年の恒星の観測によって、宇宙初期に形成されたであろう低金属量の星が数多く見つかっている。宇宙年齢と同程度の長い間生き残ってきた星は、銀河内の運動によって星の表面に鉄などの重元素が付着することが考えられるので、これらの星は宇宙最初に生まれた金属をまったく含まない星 - 種族 III 星 - の現在の姿ではないかと推測されている。また、観測の副産物として金属の少ない星には太陽と比較して炭素の多い異常な組成を持つ星が多いことが知られてきた。

理論の立場からこれらの観測事実を説明し、種族 III 星の現在の姿を予測する議論もなされているが、今のところ研究グループの間で数値シミュレーションの結果に大きな食い違いがあり、決着はついていない。本研究では、この論争に一定の決着を与える数値計算の結果と、改良された恒星進化のプログラムを用いた新しい結果を示した。

1. これまでの研究グループによる結果と我々のグループによる計算結果の食い違いの主要な原因は彼らの指摘した恒星内部の輻射輸送や熱伝導の扱いの違いではなくヘリウムから炭素を作る核反応率の違いであることがわかった。

2. 他の研究グループによる結果と我々の結果は一部はよく合うが、一部は採用した物理によって再現することはできず、結果の違いに対する原因は本研究で調査した要素以外に存在する。原因の可能性として、クーロン液体領域での状態方程式の取り扱いが考えられる。
3. 改良されたプログラムによる結果によると、宇宙最初に生まれた星は、その進化の過程で表面に炭素と窒素を多く含む星へと進化することが示唆されるが、窒素の量が最近の観測とは合わないことがわかった。

## 2 球状星団における物質混合と水平分枝の形状

球状星団は恒星が  $10^5 \sim 10^6$  個程度集まってできた古い星の集団であり、その系は重元素の少ない種族 II 星によって構成されていることが知られている。その密集した個々の星の初期組成と年齢はほぼ同一であると期待できることから、恒星進化の標準理論の確立に貢献してきた。しかし、観測精度の向上によって、明るい赤色巨星の表面組成を調べてみると、標準理論では説明できない組成の異常が次々と報告されるようになった。その中でも組成の変動が赤色巨星の進化の段階が進むとともに組成の変動が大きくなるという事実や、炭素や窒素、酸素だけでなく、アルミニウムやマグネシウムの組成も星によって異なるにも関わらず、その総量が一定であるという事実によって、組成異常が、星の形成時の組成の違いによるものではなく、進化過程における物質の混合機構による変動であるという考えが有力である。

本研究では、組成異常を引き起こす要因として考えられている星の回転による物質混合を仮定して、その混合の結果による後続の進化への影響を数値計算によって明らかにした。

1. 赤色巨星以降の水平分枝段階における進化は表面のヘリウムの組成の影響を受けるが、その結果は混合によるヘリウムの増加のみによるのではなく、混合の起こり方によっても影響を受けることがわかった。
2. 球状星団の間には観測によって、水平分枝段階の星の分布が異なることが知られているが、その分布の違いは、星の回転速度による違いと、星の表面からの質量損失によって説明可能であることが、さまざまな条件を考慮した計算によってわかった。

## 3 初期型R型炭素星の起源と物質混合

炭素星とは星の表面の炭素の量が酸素よりも多い星のことを意味しており、太陽の組成では炭素よりも酸素の方が二倍程度多いことから、異常な組成を持つ星の一つとして知られてきた。炭素星は、スペクトルの違いから分類が細分化されており、その型によって表面の組成に異なる特徴があることも知られてきた。その中でも多く場合についてはこれまでの研究によって起源が明らかにされてきたが、初期型R型星は100年以上もの長い間その起源が明らかにされていない。

本研究では、初期型R型星の起源を解明するために球状星団の組成異常を説明するために仮定した混合機構を、太陽に含まれる重元素の量と同程度の組成を持つ種族I星の赤色巨星に対して適用した。数値計算によって進化を解くことにより、現在観測で知られている初期型R型星の組成の傾向を定性的に再現することに成功した。

1. 水素を多く含む外層から水素を内側に混入することによって、ヘリウム中心核における核反応の暴走現象が起こり、対流層の拡張と表面对流層の侵入による表面組成の劇的な変化を再現した。
2. 上記の水素の混合機構が星の自転と関係があると仮定して、表面組成の違いを星の自転速度による系列で表した。

# 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 教 授 羽 部 朝 男  
副 査 助 教 授 兼 子 昇  
副 査 教 授 小 笹 隆 司

学 位 論 文 題 名

## Evolution and Element Mixing in Low-Mass Stars

(低質量星の進化と物質混合)

宇宙の構造と進化において恒星は基本的な構成要素として重要な役割を担っている。エネルギーを発生して光り輝き、その所属する天体の存在を観測可能な対象たらしめ、また、自然の原子炉として内部での核反応で合成された核生成物を星外に放出することによって、宇宙における元素を生成、多様化することによって、宇宙における進化の推進機構となっている。本論文が対象としている低質量星は、光度が小さく、元素合成の面でも、水素、ヘリウム燃焼による軽い元素や中性子捕獲の  $s$ -過程元素に限定されるが、その最大の特徴は長寿命にある。特に、太陽より軽い恒星の場合は寿命は宇宙年齢よりも長く、宇宙初期に形成された恒星も現在に至るまで核燃焼段階で輝いていることになり、それらの恒星は、元素組成、空間分布などに形成された過去の宇宙に状態についての情報を留めていると考えられている。

近年わが国のすばる望遠鏡など 10 m 級の大型望遠鏡の出現によって、暗い恒星の高分散分光観測が可能となり、これら低質量星の宇宙の進化の“化石”としての役割が注目を集め、宇宙初期に誕生したと考えられる金属含有量の小さい金属欠乏星を探索手段とする銀河系の形成、初期進化の研究が興隆してきている。特に、宇宙で最初に生まれた恒星の場合は炭素以上の重元素を全く含まず、この種族 III の生き残りの探索は近年の宇宙物理学の研究における焦点のひとつになっている。

宇宙の歴史の探索手段としての成否は、低質量星の構造、進化についての理解が鍵となる。低質量星は、温度に比して密度が高くなるため、電子縮退下での核反応の暴走現象がおき易い、また、表面对流層が発達し、物質混合の影響がおき易いとの特質を有し、そのため進化は複雑な様相を呈することになる。水素燃焼の触媒が不足する金属欠乏星の後期進化に関してこれまでの研究では未だ確定していない。加えて、現行の標準的な恒星進化の理論では、内部における物質混合としては熱対流のみを考慮しているが、最近の表面組成の観測からは、この枠組みでは理解できない現象が多数見つかかり、熱対流以外の物質混合機構 (extra mixing mechanism) の存在を示唆している。

本論文は、種族 III の低質量星の進化、および、恒星の自転に伴う extra な物質機構に関す

る物理の新しい側面を解明し、探査の基礎的手段としての役割を推進するという課題に正面から応えるものである。

金属欠乏星および種族 III 低質量星の後期進化に関しては、これまで、北大の宇宙物理学研究室を含むいくつかのグループで計算されてきたが、進化後期のヘリウム殻フラッシュによって炭素星になるという描像をめぐって必ずしも一致していない。これは、CNO 元素の組成の減少とともに水素燃焼殻のエントロピーが減少し、電子縮退の影響が現れとともに、ヘリウム燃焼殻と接近するために、恒星の内部構造が輻射の吸収係数と電子伝導率、また、ニュートリノによるエネルギー損失率、核反応率に対する依存性が大きくなり、その物理データの違いが計算結果に反映していると考えられている。著者は、最新の物理データを採用するとともにその影響を調べ、現存する計算結果の違いは、主として採用した核反応率の違いによるものであることを示した。同時に、最新の物理データに基づく金属欠乏星の進化を計算し、炭素星への進化の初期質量に対する依存性を解明した。この結果を適用して、現在観測されているもっとも金属量の少ない HE0107-5240 ( $[Fe/H]=-5.3$ ) について、この少量の金属が、最初からのものか、それとも、誕生後金属を含むガス雲との遭遇による汚染であるかを見極める方法について提案した。

また、extra mixing の機構に関しては、恒星の自転の影響との関連すると考えられ、さまざまなモデルが提唱されてきた。自転の効果は、本来 2 次元、3 次元の問題であるが、物質混合に効くのは主として小さい eddy であるため、現在の最高の計算能力をもってしても直接数値計算をすることはできず、適当な乱流混合のモデルを仮定せざるを得ないためである。物質混合のモデルとしては、これまで水素燃焼の外側の外層中での混合が主として考えられてきたが、球状星団の巨星に見られる軽金属元素の組成異常の観測との関連で、水素燃焼殻の底からヘリウム中心殻の内部に向かっての水素が混入し、それによって水素殻フラッシュが引き起こされ、核反応生成物を表面に運ぶという新しいモデルが提唱されている。著者は、球状星団について軽金属元素の輸送に伴うヘリウムの輸送は進化に及ぼす影響を調べ、この結果は、球状星団の巨星の組成異常に加え、水平分枝で観測される恒星の自転の特異な分布を説明できることをしめした。また、同じ混合機構を金属量の多い種族 I の低質量星に適用することにより、これまで不明とされた R 型炭素星の起源について、その表面組成が再現できることを示した。これらの結果は、今後の恒星の自転の進化への影響の研究に新たな活路を開くものである。

要約すると、著者の研究は、現在焦眉の課題となっていた低質量の金属欠乏星の進化の理論を発展させるとともに、回転の自転の効果等についても新しい知見を加え、今後の発展方向への展望を与えることに大きく貢献するのである。

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。