

氏名・(本籍)	うめ 梅	づ 津	みのる 実
学位の種類	理	学	博 士
学位記番号	理博第	1060	号
学位授与年月日	昭和63年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当		
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)天文学専攻		
学位論文題目	The Mixing Length Theory for the Transport of Chemical Elements (化学元素の輸送を考慮した混合距離理論)		
論文審査委員	(主査) 教授 須田和男		
		教授 高窪啓弥	教授 藤村忠雄

論 文 目 次

第1章	序 論
第2章	化学元素の流束を取り入れた対流の局所的混合距離理論
第3章	局所的混合距離理論を用いて、対流中心核の外縁に化学組成分布の不均一な層を持つ大質量星のモデルを構成する場合の問題点
第4章	化学元素の流束を取り入れた対流の非局所的混合距離理論
第5章	要 約
	謝 辞
	参考文献
付録A	異なる熱の定義による局所的混合距離理論
付録B	対流要素の大きさと混合距離の比の効果
付録C	対流要素から輻射熱損失のない場合の局所的混合距離理論の簡単化された方法

論文内容要旨

第1章 序論

進化する恒星の内部の対流層を取り扱うにあたって、従来瞬間的完全混合を仮定し、組成分布は対流層内で一様であるとされてきた。このことに伴って生じるモデル構成上の難点は、約30年前、まず大質量主系列星の進化のモデルを計算するにあたって指摘され、Schwarzshild and Härm (1958) と Sakashita and Hayashi (1959) の提唱になるそれぞれ相異なる対流的に中性な仮説的組成不均一層が、セミコンベクション (Semiconvection) 層の名の下に導入された。以来、セミコンベクション層としていずれの中性条件をとるか、又、そのような仮説層の形成をどのように説明するかは、形成にかかわる物質混合の決定的な理論がないことから、恒星内部構造論の重要な懸案として今日に至っている。

本論文では、組成元素の輸送をも取り扱い得るように混合距離理論にもとづく対流理論の定式を拡張し、セミコンベクションの問題を論述する。

第2章 化学元素の流束を取り入れた対流の局所的混合距離理論

この章では、Vitense (1953) による局所的混合距離理論を、化学元素の対流による輸送をも取り扱い得るように拡張した。与えられた圧力、密度、温度、組成、輻射温度勾配のもとで、組成流量をパラメータとして得られた定式は、代表的な対流要素の対流効率 γ 、速度、平均温度勾配、組成の勾配と、対流の解を与えることができる。対流効率 γ を与える基礎方程式は、化学元素の輸送を考慮しない場合は3次方程式となるが、化学元素の輸送を取り入れると5次方程式となる。本章では、質量が30太陽質量で、種族 I の化学組成をもった原始主系列星の対流核内の典型的な場所に対応する値を、上記物理量に関して使用し、この5次方程式を解き、その解の性質を調べた。与えられた組成の流量、混合距離に対して、実現可能性のある対流解が2つ存在する。この2つの対流解を γ_1 対流と γ_2 対流と呼ぶことにする。混合距離としては、対流核半径と同程度のものを採用した。 γ_1 対流においては、従来通り、温度勾配はほとんど断熱勾配に等しく、化学元素の勾配は無視され得る程である。しかし、 γ_2 対流においては、温度勾配の断熱勾配からの超過量及び化学元素の勾配共に、 γ_1 対流の場合よりかなり大きい。混合距離理論のみによっては、これらの2つの対流解のうちの、どちらの解が適切であるかを決定できない。

従来、対流核内部においては、対流要素からの、輻射による熱損失は、無視できると考えられてきた。それ故、輻射による熱損失を無視した場合についても同様な定式化を行ない、物理量の値として前と同じ値を用いて、解の解析を行なった。その結果、この場合にも2つの対流解が存在することが明らかとなった。更に、2つの定式化の結果を比較することにより、対流要素からの熱損失は、対流域内での化学元素の勾配の最大値を、Ledoux-Sakashita-Hayashi の判定基準によって与えられるものより、小さくする効果を持つことが明らかとなった。

第3章 局所的混合距離理論を用いて、対流中心核の外縁に化学組成分布の不均一な層を持つ大質量星のモデルを構成する場合の問題点

この章では、第2章で述べた混合距離理論を用いて、特に化学元素の不均一な対流層によって、第1章で述べたセミコンベクションに関する問題を取り扱い得る可能性を、大質量星のモデルを計算する観点から具体的に検討した。

セミコンベクションに関する問題を取り扱うためには、対流核境界付近で、化学元素の勾配が必要となる。 v_1 対流又は v_2 対流のみによっては、整合性のあるモデルを構成することは非常に困難である。両方の対流解を使用して、対流核内の計算を遂行しようとするれば、中心部で v_1 対流を、対流核境界に近い部分で v_2 対流を使用することになる。しかし、このようなモデルには、問題点が少なくとも2つ存在する。

問題の1つは、対流核内部の対流核境界付近でヘリウム流束が負になることである。負のヘリウム流束は、ヘリウムが対流により中心部に向けて輸送されていることを示す。しかし、主系列星段階のごく初期の場合、ヘリウムは中心部の方がより迅速に生成される。したがって、対流によるヘリウム輸送が起こる場合、ヘリウム流束は正でなければならない。この問題の発生する理由は、次のようである。対流核境界付近で起こっている原子核反応は非常にわずかではあるが、その影響は数値計算を遂行する時に無視できない。ヘリウム流束が、対流核内で、中心と境界をのぞいて、いたる所正となるためには、対流核境界の内側での、対流による化学元素の勾配は、原子核反応のみによる化学元素の勾配よりも大きくななければならない。しかし、第2章の混合距離理論を用いると、対流核境界での化学元素の勾配はゼロでなければならない。それ故、ヘリウム流束は対流核内で負になる。

以上の議論は、対流要素からの輻射による熱損失が無視できない場合である。この場合には、Langer et al (1983) のように過安定 (overstable) 層の導入によって、化学元素の適当な勾配が形成されるのであれば、この問題の発生を回避できる可能性が出てくる。対流要素からの輻射による熱損失が無視できる場合には、対流核境界を内側へ移動させることによって、この問題を回避できるかもしれない。対流核境界を、輻射温度勾配と断熱温度勾配が等しい所より内側にとるとする。対流要素の速度がゼロであるという条件を満足させるためには、化学元素の勾配はゼロより大きくななければならない。対流核内部でも、対流核の境界付近では、原子核反応は盛んではないから、原子核反応のみによる化学元素の勾配は、かなり小さいままでであると予想される。故に、対流による化学元素の勾配が原子核反応のみによるものより大きくなり、対流核内でのヘリウム流束は正になると期待できる。新しい境界と古い境界との間の層が薄くて無視できる場合には、対流核境界をこのように決めることも容認される可能性がある。

第2の問題点は、 v_1 対流から v_2 対流へと移行する遷移点で、対流速度が不連続になることである。局所的混合距離理論においては、対流に関する物理量は、混合距離と同程度の距離にわたっては、急激には、変化しないということが前提とされている。対流核の半径と同程度、ま

たは圧力変化の尺度と同程度という、現在使用されている混合距離の値の場合と、この速度の不連続性は相入れない。更に、平均的な対流要素が、遷移点において、 ν_1 対流側から ν_2 側へと通過する際に、なぜ速度が非常に減少するのかという疑問に対する物理的な説明は、現在のパラメータの値をもってしては、困難である。混合距離やパラメータの値が、 ν_1 対流から ν_2 対流へと移行する遷移点で急激に変化するとする考え方や、混合距離理論より許容される最小の混合距離を遷移点で使うという考え方等、数学的には改良及び検討すべき点があげられる。しかし、これらに対する物理的な基礎についての注意深い研究が必要である。

第4章 化学元素の流束を取り入れた対流の非局所的混合距離理論

この章では、Maeder (1975) による非局所的混合距離理論を、化学元素の流束や、輻射による対流要素からの熱損失をも取り扱い得るように拡張した。この非局所的混合距離理論においても、原始主系列のごく近傍において、対流によるヘリウム流束が正の場合、実現可能な2つの対流解が存在する。しかし、非局所的理論の場合には、対流核内のいかなる点においても、ひとつの解から、もう一つの解へと移り変わることは原理的には不可能である。

本論文では、簡単のため、混合距離を、恒星の中心近くの、対流要素の出発点から、その対流要素の速度がゼロとなる点までととった。このような混合距離の特殊な指定のもとにはあるが、対流要素からの熱損失は、オーバーシュートイング(overshooting)層と輻射外層の境界を外側へと移動させる効果を持つことが明らかとなった。この熱損失は、対流不安定の領域及びオーバーシュートイング領域において、平均場の温度勾配を輻射温度勾配に近づける。そのため、不安定層中の断熱温度勾配に近い状態から、輻射外層での輻射温度勾配への、温度勾配の遷移をなめらかにする。本論文の計算においては、対流要素からの熱損失の効果が顕著となるのは、対流要素の大きさが、対流核半径の千分の1程度以下の場合である。この対流要素の大きさは、通常考えられているものよりかなり小さい。しかし、非局所的理論においては粘性による減衰の表式に改良の余地がある。その改良の結果によっては対流速度が減少することにより、対流時間尺度と、対流要素からの輻射による熱損失の時間尺度が同程度になることも考えられる。その時には、大きな対流要素であるにもかかわらず、輻射による熱損失は、温度構造に影響を与えることが予想される。

対流不安定領域及びオーバーシュートイング領域においては、混合距離理論内に含まれるパラメータに対して、現在使用されている値を使う場合、化学元素の大きな勾配は期待できない。大きなオーバーシュートイングが存在する場合には、対流核の質量割合が、時間がたつと減少してしまうので、セミコンベクションの問題は起きない。対流核の質量割合が増大する場合でも、オーバーシュートイング層と輻射外層の境界では、断熱温度勾配は輻射温度勾配より大きいので、セミコンベクション層を導入しなければならなかった場合は生じないと期待される。

第5章 要約

本論文で得られた結果を要約し，本論文を終る。

論文審査の結果の要旨

本論文は、永年の懸案となっている半対流層の問題とも関連して、不完全混合による組成不均一な対流領域の存在可能性の考察を目的とし、対流の混合距離理論を拡張して、解の性質を詳細に検討するとともに、早期型主系列星内部構造モデルへの適用を試みたものである。第二章で、対流渦胞からの輻射による熱損失を考慮した局所的混合距離理論を組成元素の輸送機構を導入して拡張し、主系列星対流中心核内の任意の代表点に対応する物理事情の下で、混合距離と He 流束の値を可変因子として対流解の性質を調べた。基本的に定式は対流の平均速度についての 5 次方程式に帰着し、混合距離を固定すれば、同一の組成流束に対して二つの解が存在する。一つは従来知られている組成均一で殆んど断熱対流と見なせる解で η 対流と名付けられ、他は非常に熱損失の大きい速度の小さい解で、 η_2 対流と名付けられている。組成の不均一解は後者に対応する。組成の流束を変えた場合に、 η_2 解が示す温度勾配と平均分子量の勾配との間に成り立つ関係は断熱対流の場合の Ledoux の関係と大きく異なり、断熱対流の場合ほど大きな平均分子量の勾配がとれないことが示された。対流中心核内では密度勾配が断熱密度勾配に非常に近いと考えてきた従来認識が成立しないことになる。熱損失の機構を考慮してなお且つ断熱対流に近い組成不均一解を得るためには混合距離が渦胞の水平サイズに比べてかなり小さいことが必要である。第三章は、 η 解からなる中心核と輻射平衡の外層の間に η_2 解による組成不均一な対流中間層が介在するモデルの構成を試みたものである。構成に当たって当面した難点と、モデル内の $\eta \rightarrow \eta_2$ 遷移点の内包する不整合性を論述し、それを回避するための考察も行っている。第四章は、非局所的混合距離理論に関するもので、熱損失、元素輸送の機構を導入して在来の定式を拡張し、モデル計算を実行して、大局的にこれら効果の影響が少ないことを確かめた。

このように、本論文は対流の混合距離理論を拡張して組成不均一な対流層の存在可能性を考察した有益な研究で、特に局所的混合距離理論について論述した第二章の内容は従来通念を改める示唆に富んだ新知見を提供しており、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって梅津実提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。