

氏 名 中 島 淳 一

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第587号

学位授与の日付 平成14年3月22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 Observational Study of O-rich Evolved Stars in the Galaxy

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 笹尾 哲夫  
助教授 野口 邦男  
助教授 出口 修至  
教授 長谷川 哲夫（国立天文台）  
教授 中田 好一（東京大学）

## 論文内容の要旨

本学位論文は、SiOメーザーを探索針として、AGB期以降の晩期型星の進化を探るという、初めての試みをまとめたものである。本研究の中核をなすのは、銀河系内部ディスク領域に分布するIRAS源548個に対して、野辺山45m鏡を用いて行ったSiOメーザー輝線探索観測の結果である。従来のSiOメーザー探索観測が観測対象としていた天体は、主に300K前後の温度のダストエンベロープをまとうAGB星候補天体であった。これに対して、本研究では、観測天体の（ダストエンベロープの）温度の下限を、150K程度の低温まで拡大した（上限は約350K）。AGB星は、進化が進むに連れて、ダストエンベロープの温度が低下していく事が知られている。本研究では、観測天体の温度分布を低温側に大きく拡大する事によって、AGB星だけではなく、より進化の進んだlate-AGB星やpost-AGB星も含めてSiOメーザー輝線の探索を行い、得られたデータを元に、様々な観点から、晩期型恒星の、進化研究の可能性を探る。

本研究では、まず、銀経が $25^{\circ}$  から $70^{\circ}$  の範囲の銀画面に分布する、比較的高温のダストエンベロープ（色温度300K前後）をまとうIRAS源（AGB星候補天体）に対するSiOメーザー輝線の探索観測を行った（Chapter 2, 3）。この観測領域は、アレシボ300m鏡によって、1612MHzのOHメーザー探索が盛んに行われている領域であり、SiOメーザー探索の結果と、OHメーザー探索の結果を比較するのに都合がよい。OHメーザーソース（OH/IR星）は、SiOメーザー天体よりも、平均的に、やや進化の進んだ晩期型星だと考えられており、OH/IR星とSiOメーザー天体の性質を比較する事は、晩期型星の進化を考える上で重要である。また、この領域には、Sagittarius-CarinaアームやScutum-Cruxアームなどのタンジェンシャルポイントが比較的近傍（約5kpc）に存在し、アームとAGB星の分布や運動の関連を調べる上で都合がよい。最近のSiOメーザー探索の結果は、SiOメーザー源がアームに付随する傾向にあることを示唆している。AGB星のアームへの集中が実際のものか確認する事や、またそれが実際のものである場合、どのような性質を持つAGB星がより強くアームに集中し易いか確認する事などは、AGB星の進化（及び、銀河系の進化形成過程）を考える上で重要である。また、本論文では、AGB星（SiOメーザー天体）の運動を通して見た、太陽近傍での銀河系の回転曲線の傾きを算出している。AGB星以外の恒星種族（OB星、セフィイド等）では、それぞれの恒星種族の運動を通して見た、太陽近傍の銀河系回転曲線の傾きが、多数のサンプルを用いて高い統計的精度で求められている。その一方で、AGB星の場合、太陽よりも内側の観測データが不足していたために、正確な回転曲線の傾きが求められていなかった。最終的に、この観測では、405個のIRAS源を観測し、198個のSiOメーザー源を検出した。SiOメーザー探索とOHメーザー探索それぞれの、IRASカラーと検出率の関係を比べたところ、SiOメーザーでは、青い側（高温側）、OHメーザーでは赤い側（低温側）で検出率が高くなっており、ダストエンベロープの温度に対して検出率が逆の相関を示す事が明らかとなった。この結果は、OHメーザーがSiOメーザーよりもやや進化の進んだ天体に付随する傾向があるという予想を支持するものである。また、SiOメーザー源の空間分布が、アーム構造に穏やかに集中し、運動学的な観点からも、アームのタンジェンシャルポイント近辺で、速度の分散が小さくなる傾向がある事が明らかとなった。SiOメーザー源の運動から求めた、銀河系回転曲線の傾きは、他の恒星種族の値とコンシ

ステントであった。

上記の比較的高温のIRAS源に対するSiOメーザー探査の一方で、本研究では、銀河系ディスク面の広い範囲（銀経 - 10° から 100°）に分布する、低温のIRAS源（late-AGB星、及びpost-AGB星候補天体）143個に対する、SiOメーザーの探査観測を行った（Chapter 4）。この観測の目的は大きく二つある。一つ目は、上述の比較的高温のIRAS源（AGB星候補天体）の観測データを合わせる事で、様々な進化段階に位置する晩期型星の、SiOメーザー輝線観測データを得る事、二番目は、原始惑星状星雲からのSiOメーザーを探査する事である（後述）。観測サンプルは、IRASカラーによってIRAS点源カタログから選出した、低温のダストエンベロープ（150K~260K）をまとうIRAS源である。（観測天体の選出条件の中には、星生成領域内のyoung starが入る可能性がある。天体の種類が明確にわかっているIRAS源によって調べられた天体の割合から判断して、観測天体の凡そ20%程度がyoung starだと考えられる。）この観測では、最終的に51個のSiOメーザー源を検出し、うち45個が新検出であった。運動学的な観点からは、高温のIRAS源（通常のAGB星候補天体）との間に明確な違いは見られなかった。今回のSiOメーザー探査観測では（先に行った高温のIRAS源に対する観測も含めて）振動励起状態の異なる二つの遷移線（ $J=1-0, v=1&2$ ）を同時に観測している。この二つのラインの強度比は、通常のAGB星の場合、1に近くなる事が観測的に示されている。しかし、二つの遷移線の励起温度は大きく異なるため（ $v=1$ では約1600K、 $v=2$ では約3200K）、1に近い強度比は、通常のSiOメーザーの励起機構では説明出来ない。現在、SiOの遷移【 $(J=0, v=1)-(J=1, v=2)$ 】と $H_2O$ の遷移【 $(\nu_2=0, 12_{73})-(\nu_2=1, 11_{66})$ 】のオーバーラップによって、1に近い強度比を説明する方法が提唱されているが、まだ確立した学説ではない。この強度比の問題を考えるためには、ダストエンベロープの、温度の変化に伴う $J=1-0, v=1&2$ の輝線強度比の変化を調べる事が重要である。先に行った高温のIRAS源に対するSiOメーザー輝線探査の結果と、低温のIRAS源に対する探査観測の結果を統合して、温度と輝線強度比の関係を調べたところ、温度が下がるにしたがって、 $J=1-0, v=2$ の強度が $v=1$ と比べて相対的に強くなってゆく事が明らかとなった。この結果は、これまでにない幅広い温度範囲のIRAS源を観測することによって初めて明らかとなったものである。

低温のIRAS源に対するSiOメーザー観測の観測天体の中には、多くの原始惑星状星雲の候補天体が含まれている。二番目の目的は、より進化の進んだ晩期型星、特に原始惑星状星雲（post-AGB星）から放射されるSiOメーザーを探査する事である。SiOメーザーを放射する原始惑星状星雲（以下、SiOメーザーPPNと呼ぶ）は、原始惑星状星雲の中でも特に若い進化段階に位置すると考えられており、AGB期以降の進化を考える上で重要な位置を占めている。本観測では、最終的に、3つの有力な原始惑星状星雲の候補天体（IRAS18450-0148, IRAS18498-0017, IRAS19312+1950）からSiOメーザーを検出する事が出来た。特に、IRAS19312+1950には、2MASSデータによって、40秒角にも及ぶ大きな広がりを持つ近赤外対応天体が確認された。10秒角を越える大きな広がりを持つ原始惑星状星雲から、SiOメーザーが検出された例は、過去にもほとんど無くIRAS19312+1950からのSiOメーザーが、全天で2例目の発見となった（Chapter 5）。2MASSの近赤外イメージでは、北東から南西に伸びた3本のスパイ状構造と、中心星が北西から南東方向に伸びた構造を持つことが確認された。IRAS19312+1950は、SiOメーザー、水メーザーが検出されている事から、本来、

酸素過多の化学組成を持つ物と判断される。しかしその一方で、 $\text{H}^{13}\text{CN}$ のサーマルラインも検出された事から、炭素過多の化学環境も入り混じった複雑なダストを持つ可能性が出てきた。実際、IRAS19312+1950に対して行ったマルチ分子輝線探査観測では、C/O-richそれぞれの環境の探査針となる分子が入り乱れた11種類にも上る分子種が検出された(Appendix A)。また、ダストの広がりや運動の様子を探るために、CO 1-0、 $^{13}\text{CO}$  1-0、 $\text{C}^{18}\text{O}$  1-0、HCN 1-0、CS 2-1の各分子輝線で、45m鏡を使った15秒グリッドのマッピング観測を行った(Chapter 6)。観測したどのラインも、45m鏡のビームで分解できる程度の広がりを持っている事がわかった。特に、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$ では、近赤外で確認された中心星の伸びの方向に沿って、速度の勾配が見られた。この勾配は、中心天体が8太陽質量程度の、比較的大きな質量を持つことを示唆している。近年、大きな質量を持つ晩期型星の一部はHot Bottom Burning (HBB) という、AGB星表面の対流層底部で起こる核燃焼によって、一度、炭素星に進化した後、O-rich星に戻る可能性が示唆されている。HBBは、IRAS19312+1950の複雑な化学組成を説明する可能性の一つとして興味深い。

本研究では、SiOレーザー輝線の $J=1-0$ 、 $v=1&2$ の強度比が、ダストの温度と相関を持つことを初めて示し、この強度比がAGB星の進化の指標として利用出来る可能性を示した。また、低温のIRAS源を系統的に観測することによって、晩期型星進化の中の、ミッシングリンクとなっていた早期の原始惑星状星雲(SiOレーザーPPN)を新た検出し、晩期型星の進化(惑星状星雲の形成過程)を、観測的にシームレスに研究できる道を開いた。最近では、2MASSデータやMSXデータ等の赤外アーカイブの公開が始まっており、本研究の手法を用いれば、これらのアーカイブデータを利用して、将来より多くのSiOレーザーPPNを検出する事が可能となる。また、本研究で検出されたSiOレーザー源の多くは、近い将来、国立天文台が進めているVERA計画で、重要な観測対象となる。これらの観点から、SiOレーザーを使った晩期型星進化の研究は、本研究の成果を基盤として、今後より発展していくものと思われる。

## 論文の審査結果の要旨

中小質量星は、その進化の最終段階近くで漸近巨星枝(AGB)と呼ばれる時期を過ごす。この時期に星は表面から激しくガスを放出し質量を減少させ、その後、高温の中心星があらわとなって惑星状星雲を周囲につくり、最終的に白色矮星となり星の死を迎える。この漸近巨星枝から白色矮星へといたる進化の道筋は、様々な要因がからみ合うことにより理論的な計算は十分行われておらず、また、厚い外層に覆われ表面を直接観測しにくいことなどから、十分な全体像の理解が進んでいない。一方で、これらの星は、大量のエネルギーを赤外線波長域で放出する明るい天体であることから、銀河系内の遠方の領域にあるものでもたやすくその存在を知ることができ、銀河系内の星の分布やその運動学を調べるための絶好の材料として盛んに使われている。そこで、これらの天体をより深く理解する事が求められてきた。

申請者は、漸近超巨星枝星から惑星状星雲へと至る段階で、星の外層から放出される一酸化硅素の輝線を観測することにより、以下のような新しい現象を発見し、これらの星の進化と銀河系の構造への理解を深める新しい手がかりとなることを示した。

1. 野辺山宇宙電波観測所の4.5メートル電波望遠鏡を使い、これまで十分観測されて来なかった銀河円盤領域にある500個ほどの星のうち、およそ250個の星に、新たに一酸化硅素レーザーの輝線を見つけた。距離を推定することにより、それらの星の分布が銀河腕の分布と相関し、また、その速度分散が銀河中心に向かって増大する傾向のあることを示した。

2. 一酸化硅素レーザーの輝線の2本の輝線強度比が星の赤外線での色温度と相関することを見出し、輝線強度比が星の進化の指標として使えることをはっきりと示した。またこの相関は、これまで分子雲内に見つかっていた若い星起原の一酸化硅素レーザーにも適用できることを示した。

3. これらの星の観測中に、いくつかの特異原始惑星状星雲とおもわれる天体に、一酸化硅素レーザーを見出し、そのうちの一つ、IRAS19312+1950をさらに詳しく観測し、様々な分子輝線を検出することにより、その外層が酸素過剰型および炭素過剰型の2つの部分に別れた極めて特異な組成を持つことを発見し、その星の起原を推定した。

これらは、過去30年にもわたって研究され尽くされたと思われる分野において、最新鋭の観測装置による膨大なデータを元になされた発見であり、星の進化という古典的問題に新しい局面をもたらしたといえる。また、新たに発見された原始惑星状星雲は、これまで見出されたことのない特異な性質を持っており、この天体の研究から、恒星進化の物理学において新しい展開も期待できる。

この発見の一部は、既にレター論文として出版されている。申請者のこれらの研究は、漸近巨星枝星から惑星状星雲へと至る中小質量星の進化の研究に新たな発展をもたらすものであり、十分に評価できる。