

氏 名 Min, Cheulhong

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1900 号

学位授与の日付 平成29年3月24日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 VERA Observations of 43GHz SiO Masers toward a
Symbiotic Star R Aquarii

論文審査委員 主 査 准教授 泉浦 秀行
准教授 竹田 洋一
准教授 山村 一誠
助教 亀谷 收
准教授 今井 裕 鹿児島大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

Symbiotic stars are generally understood as interacting binary systems comprising a cool late-type star, which is a red giant (RG) or asymptotic giant branch (AGB) star, and a hot compact companion, which is usually a white dwarf (WD), surrounded by ionized nebulae. The interaction between the components presents a variety of astronomical phenomena that involve mass-loss and mass-transfer processes. In particular, the ionized nebulae are mostly found around D-type symbiotic stars, and a large proportion of those nebulae show a bipolar morphology. While the detailed mechanism has been longstanding topics of debate, the binary interaction is considered to play an important role in the formation mechanism. To acquire orbital parameters is indispensable to derive fundamental physical information for understanding various uncertain aspects of the formation mechanism. However, most of the known orbital parameters are limited to S-type symbiotic stars.

R Aquarii (R Aqr) is one of the well-known D-type symbiotic stars composed of a Mira variable and a WD companion. The characteristics of the system are the presence of bipolar jet-like features and the hour-glass-shape of two extended inner- and outer-bipolar nebulae. In addition, R Aqr is one of the symbiotic stars that exhibit circumstellar masers associated with the Mira variable. Several progresses were made in deriving orbital parameters for R Aqr, but the observations have not yielded consistent values for those parameters yet.

A radial velocity analysis has been widely used for determining orbital parameters of a binary system, but it cannot resolve the full parameters because of an inclination ambiguity. In order to disentangle the ambiguity, astrometry observation is complementary to the radial velocity method. For the astrometry, SiO masers allow us to determine the accurate positions of the central star from their distributions with a high spatial resolution of VLBI observation. Combining the astrometry and the radial velocity analysis, the full orbital parameters can be derived without any ambiguity.

In this study, we performed the VERA observations of SiO masers toward the symbiotic star R Aqr from 2011 to 2014 to determine its reliable orbital parameters. We made long-period, multi-transitional observations of SiO masers with the phase-referencing VLBI technique, which provides absolute positional information as well as high-resolution images, for the first time for R Aqr.

The SiO masers extended over an area of about 40 mas x 40 mas, forming clumpy, partial ring-like structure and predominantly occupying eastern portion of the shell. We determine the position of the Mira variable by fitting concentric circles to the observed SiO maser distributions for each epoch. Adopting previous VERA astrometry

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

observations, we extended the time coverage of the astrometry to about 10 years for R Aqr. Moreover, we also conducted Nobeyama and Mopra single-dish observations of the SiO masers from 2002 to 2014 to trace the radial velocity variation of the Mira variable in R Aqr for a longer period of time. Complementing previous radial velocity data, we covered about 85 years of radial velocities for R Aqr. Combining the astrometry and radial velocity data, we derive the full orbital parameters using a Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method.

Comparing the orbital parameters with the VERA observations of SiO masers in R Aqr, we found that the global distribution of dominant SiO maser features is closely related to the orbital phase of R Aqr system due to the binary interaction. In our VERA observations, most of SiO maser components were detected in eastern hemisphere during the three stellar phases. Our orbital solution suggests that the dominant SiO maser region tends to appear in the direction of the WD companion with respect to the Mira variable. Besides, this tendency has been persistently observed through VLBI observations for over 20 yrs. Since the strong maser emission is preferentially observed in the region where the material density and velocity coherence are higher, the observed tendency indicates that high density of material properly concentrates in the direction of the companion, where the mass-transfer process may occur between the components.

Moreover, the mass-transfer is likely to occur via the (wind) Roche-lobe overflow in R Aqr. The observed SiO maser region occupied over 70% of the Roche-lobe radius of 19.75 mas, and the material can effectively fill the Roche lobe with the assistance of the dust-driven winds. Applying a simple kinematic model, we define the inner boundary of the SiO maser region, where the radius and outflow velocity are $R_{\text{in}} = 12$ mas and $V_{\text{in}} = 7.7 \text{ km s}^{-1}$, respectively. Moreover, we derive the outflow velocity at the Roche lobe radius of $V_{\text{out}} = 12.6 \text{ km s}^{-1}$ for a logarithmic velocity gradient. Adopting the outflow velocities, the mass-loss rate of the Mira variable is as high as 4.6×10^{-5} solar mass per year in R Aqr.

Our orbital parameters imply that the formation mechanism of a bipolar nebula involves not only the binary interaction but also other process in R Aqr. For the bipolar nebulae, the binary interaction is the most preferred mechanism. From the morphology and structure of the bipolar nebulae, several orbital parameters can be estimated based on theoretical studies. Comparing our orbital solution and the morphology of R Aqr nebulae, we found a misalignment between our orbital parameters and morphologically estimated values. Our result indicates that the binary interacting scenario alone cannot explain this discrepancy, and other processes, such as some effects of magnetic fields, are necessary to explain the misalignment.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

共生星とは、高温天体の放射成分と低温天体放射成分が共存する不思議な恒星である。本研究は、固体微粒子円盤を伴う D 型共生星の代表格である R Aqr（みずがめ座 R 星）について、従来の困難を解決する方法を開発し、実際の観測に適用して、信頼度の高い結果を得られた世界で初めての例である。

共生星は従前より連星系と推定されてきたが、これまで直接的に軌道運動が求められることがなかった。出願者は、まずこの事実を見つめ直し、実際に連星系であることを示し、その軌道を明らかにすることがすべての土台になるとの考えから、それを実現するための方策を検討した。

次に出願者は、共生星 R Aqr が SiO メーザー輝線の放出源であることに着目した。過去における赤色巨星における同輝線の超高空間分解能 VLBI 観測による研究から、その分布が赤色巨星を中心とした星周縁中の同心円上のリング領域に集中して観察されること、従って、中心星の位置をそれらのメーザースポットの分布に円環を当てはめることにより高精度で決定できることに着目した。その結果、メーザースポットの分布中心としての R Aqr の赤色巨星成分の天球上での位置を決定し、その移動の様子を追えるようになった。それ自体は既に一般的な SiO メーザー源（赤色巨星）の固有運動と年周視差の測定の研究で確立され、実際の観測的研究で成功を収めていた方法である。しかし出願者は、まず 1 年以上の寿命を持つ安定したメーザースポットを見つけ、そのスポットに対する年周視差計測に成功し、次いで、上記手法によって推定される星本体の移動を直線運動だと仮定した場合その残差が共生星の軌道運動によるものであることに気が付き、軌道決定に利用しようとした。出願者のこの優れた着目点により、天球上に投影された R Aqr の軌道運動を調べることができるようになった。そして、R Aqr の軌道要素を決定するための VLBI 観測の企画・立案を行い、得られた観測データに対して画像構築、画像解析、天文学的な解析と情報の抽出を進めた。

出願者はさらに、非常に長期間にわたる天体の視線速度のデータを取得し、軌道決定に利用することを考えた。そのため、SiO メーザー輝線の単一鏡観測による視線速度の測定を企画・立案し、アーカイブデータの抽出や観測実行、データの解析を長期間にわたって続けた。それ以前に出版されていた多様な手法による視線速度データもよく吟味し、追加することで、前述の VLBI 観測実施期間よりも 10 倍長い約 100 年の期間にわたる視線速度データを構築した。

出願者は、これらのデータのクオリティを確認した上で、天球上での天体の移動を正確に測定するアストロメトリーの手法と、天体の視線速度の変動を測定する手法とを組み合わせた方法で、初めて共生星 R Aqr の 3 次元的軌道決定に取り組んだ結果、視線方向に対する軌道の傾斜角、実際の軌道長半径、昇交点経度を初めて決定できた。また、公転周期、軌道離心率、近点引数などを新たに決定し直すことができた。その際、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法を適用してパラメータ空間が適切に探索されるように注意を払い、この軌道決定の過程で同時に R Aqr までの距離を過去の研究とは独立に決定した。その距離

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

から天体の光度を算出し、ミラ型変光星に見出されている周期・光度関係から、この赤色巨星が赤色超巨星ではなく漸近巨星分枝にある太陽程度の低質量の星であることが推定された。その結果として連星系の相手である白色矮星の質量に強い制限を加え 0.8 太陽質量前後の値を与えた。さらに、R Aqr に関する既知の共生星としての特徴とその成因について考察を加えた。

以上のように、観測例の少ない D 型共生星の代表例である R Aqr について、これまで導出が困難であった基礎的な幾何学量、物理量を決定したことは、共生星の統合的な理解を進める上で重要なステップとなる研究である。したがって、審査員全員が博士論文として合格であると判断した。