VERAによる位置天文観測が示唆する長周期OH/IR星の新たな周期光度関係

中川亜紀治※、守田篤史、橋本真雄、大島夕佳、中島和也(鹿児島大学)、倉山智春(帝京科学大学) 、須藤広志(岐阜大学)　※ nakagawa@sci.kagoshima-u.ac.jp

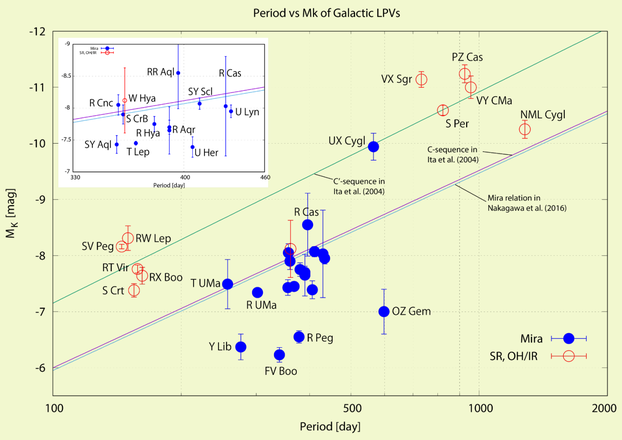
鹿児島大学では国立天文台VERAプロジェクトの開始から現在まで脈動変光星を主な対象として位置天文VLBI観測を行い、年周視差計測による正確な距離に基づく研究を進めてきた。2016年には周期300－400日を中心とするMira型変光星の観測から得られた近赤外線での周期光度関係を報告した(Nakagawa et al. 2016, 2018)。この間、欧州の位置天文衛星Gaiaの進展により多くの変光星の年周視差が可視光でも得られるようになったが、ダストを伴う脈動変光星においてその測定精度は十分と言えず、VLBIによる測定と大きな違いが生じている。変光星の距離計測についてVLBI位置天文は依然として重要な測定手段である。近年、我々はMira型星が進化して更に厚いダストを伴う状態へと進化した長周期OH/IR星の観測を始めている。Mira型星に続く進化の様子をつぶさに知ることはその後の惑星状星雲に続く進化を知る上でも重要である。これらの星は可視光で非常に暗く、かつ銀河面に位置することから、距離や運動の把握にVLBIが不可欠である。

本ポスター講演では始めに(１)Mira型変光星を対象としたこれまでの研究を紹介し、新しい話題として最近の我々の研究から(２)長周期OH/IR星の新たな周期光度関係の示唆、(３)長周期OH/IR星を用いて銀河系構造形成史を知る、(４)長周期OH/IR星での可視光とメーザーの時間変動の関係、の３つのトピックを取り上げて紹介する。

(１) Mira型変光星を対象としたこれまでの研究

(1-1) 天の川銀河Mira型変光星の周期光度関係

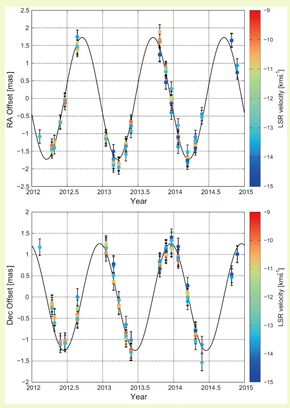
VERA及びVLBAによる年周視差計測に基づく近赤外線(K-band)での周期光度関係を右に示した(Nakagawa et al. 2018)。青い丸印がMira型変光星である。LMCの研究から良く知られる直線関係に沿うことが分かったと同時に、天の川銀河では、その関係より暗い星が多い事も分かってきた。鹿児島大学の浦郷らにより、こうした星はより長い波長(3.4μm)でのばらつきが小さく、良い直線関係が成り立つことも示唆されている。



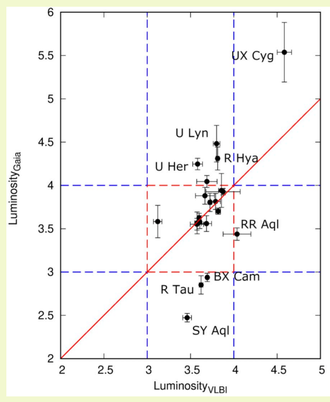
→図1:Absolute K-band magnitude (Mk) of Galactic LPVs obtained from apparent magnitude (mk) and VLBI parallaxes. Three solid lines show sequences in literatures. Filled and open circles are results of Mira and other type of variables.

(1-2) Gaia時代におけるVLBI位置天文の重要性

Mira型変光星は質量放出を起こすAGB段階にあるとはいえ、まだダストは薄く、光球からの放射は可視光域で十分に明るい。欧州の位置天文衛星Gaiaによる観測が進んでおり、多くのMira型星の位置天文計測が進む。そこで我々はVLBIとGaia DR2 (Gaia Collaboration 2018)による結果を比較した。図2はVERAによるBX Camの年周視差計測で、相対誤差はわずか2%である。年周視差はGaiaと2倍以上の違いがある。図3では星の光度についてVERAとGaia間で比較した。AGB星は大きく膨張した光球面、それを取り巻くダスト層などによりGaiaでの観測には困難が伴う。位置天文VLBIは依然として重要な計測手段である。



↑図2:BX Eriの年周視差によるRA(上)・Dec(下)方向の振動(Matsuno et al. 2020)

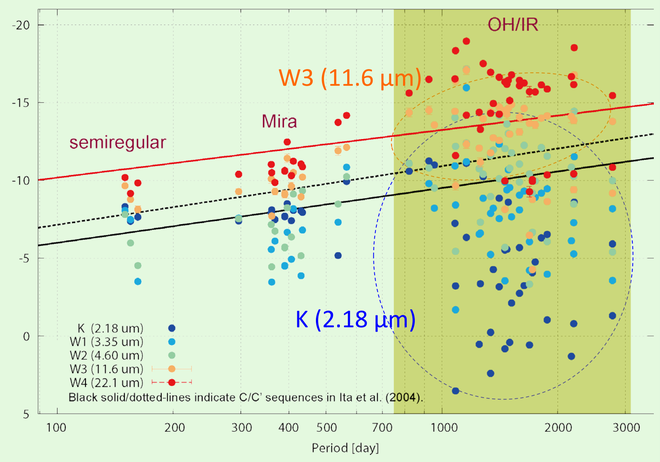


↑図3:色指数(V-K)から求めた光度のVERAとGaia間の比較。VERAによる推定値のばらつきは小さく、Mira型変光星の妥当な光度範囲に収まる。

- Source: BX Cam (Mira)
- Pulsation period: 486 day
- VERA parallax = 1.73±0.03 mas
- DR2　parallax = 4.13±0.25 mas

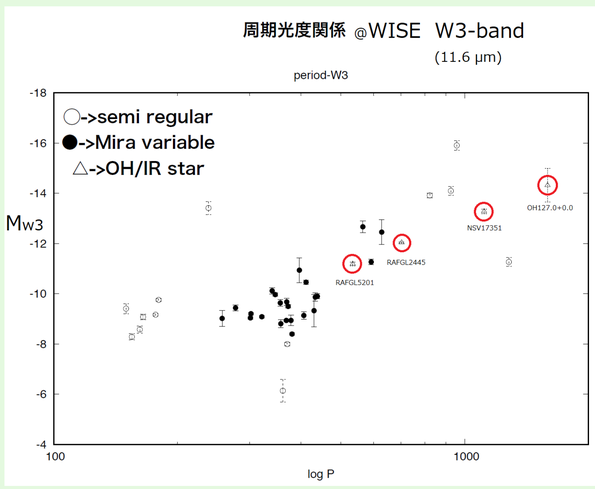
(２) 長周期OH/IR星の新たな周期光度関係の示唆

前章(１)で述べたこれまで研究は周期300-400日の星を中心としたものであった。より長い周期へ視点を移すと、そこには変光星の進化との関わりが見えてくる。Mira型星よりダストが発達した星はOH/IR星として知られるが、長周期側ではこの存在がとても多くなる。こうした長周期OH/IR星では発達したダストにより可視光域で暗く、Gaiaでの観測はますます困難となり、距離や星周構造を知るためにVLBIの重要性がますます高まる。



↑図4:Phase-lag法と運動学的距離に基づく、近赤外から中間赤外までの絶対等級と周期の関係。周期1000日を超える範囲でのMkのばらつきは星周減光による影響と考えている。

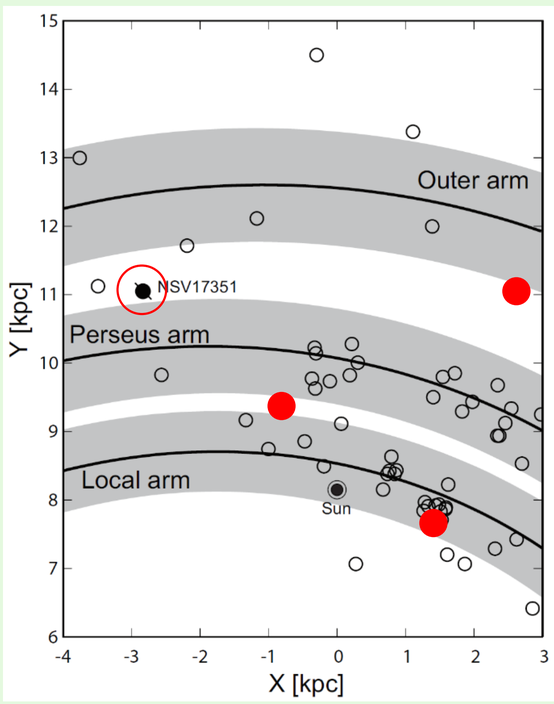
OH/IR星の星周構造を調べることはMira ⇒ OH/IR星 ⇒ 非変光OH/IR星 ⇒PPNへと至る進化の詳しい理解にもつながる。脈動変光星の進化理解の手法の一つが周期光度関係である。異なる振動モード毎にそれぞれの系列が想定されるが、これまで高精度な距離計測が困難であったために長周期側ではこの関係が十分に調べられていない。図4で1000日を超える長周期側の天体では年周視差法による距離は使えず、ばらつきが大きいままである。そこで我々は数年前からVERAによる観測を長周期側へと展開し、周期光度関係の解明を試みている。周期1000日以上の約15天体の年周視差計測を開始し、2020年にようやく予備的結果が得られ始めた(図5)。驚くことに我々が測定した4天体は直線的な関係を示唆する結果を示している。もしこの関係がシャープに決まると、新たな距離尺度としても活用が可能である。



↑図5:長周期OH/IR星のWISE W3バンド(11.6μm)絶対等級と変光周期の関係。赤丸○はVERAで得られた年周視差に基づくデータ。

(３)長周期OH/IR星を用いて銀河系構造形成史を知る

長周期のOH/IR星は質量が典型的なMira型星(0.8-2.5M◎)より重く、3-4M◎程と考えられている(Feast 2009)。この事から年齢は数億年と推定される。こうした中質量星の分布と運動を明らかにすることは、年齢数億年の天体が銀河系内で示す位置と運動を知ることにつながる。近年のシミュレーションの発達による銀河系構造形成モデルの代表的なものに動的渦状腕理論がある。そこでは渦状腕の時間的な不安定さが示唆され、腕構造が数億年の時間スケールで生成消滅を繰り返すことが予想される。表1は天体の年齢と銀河構造との関連を示す。本研究が対象とする中質量星がAGB段階に達するのは年齢が数億年の時期である。よって中質量OH/IR星の空間分布と運動の把握は、既知の渦状腕との位置比較や特異運動速度の比較を可能にし、銀河構造形モデル検証に役立つ。



↑図6: 長周期OH/IR星NSV17351の天の川銀河での位置。黒い曲線と影は渦状腕とその幅を表す。全ての長周期OH/IR星が渦状腕の腕構造から距離を隔てて分布する様子が捉えられている。(Morita et al. in prep)

図6に進行中の研究成果の一例を示す。中質量OH/IR星であるNSV 17351のVERAによる位置天文観測の結果を○で示している(Morita et al. in prep.)。この星がPerseusとOuterの２つの渦状腕の間に位置することが明らかになった。また新たに3天体の距離計測も進みつつあり、それらの位置を●で示した。今後も3年ほどをかけてこうした観測例を積み重ね、l-v図上でのシミュレーションとの比較などを通して、構造形成史の中で星の年齢と関連付けた検証を行いたい。

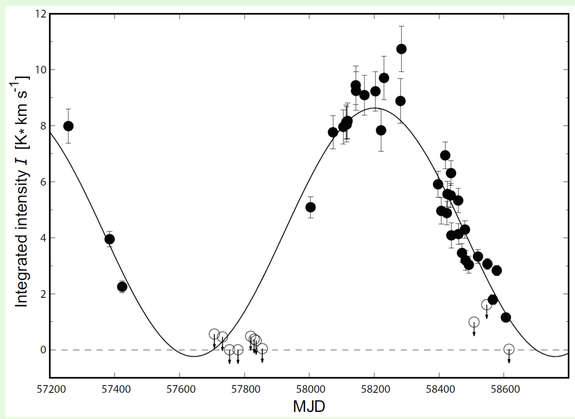
星の年齢		見える現象	観測対象	理論モデル		観測例
新しい	数百万年	誕生直後の星の分布と運動	星形成領域や赤色巨星	あり	⇔	あり
⇕	1- 3億年	渦状腕の生成と消滅	重いOH/IR星	あり	⇔	無し
古い	数十億年	力学的に緩和された系	Mira型変光星	あり	⇔	あり

↑表1:星と銀河系構造との関わりを、星の年齢と関連させて整理した。

(４) OH/IR星のメーザーモニターから決定する変光周期、可視光とメーザーの変動位相差

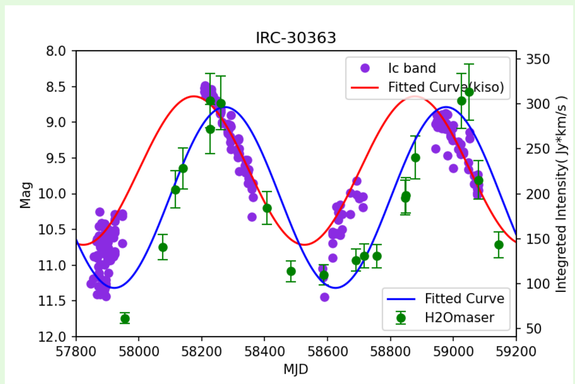
現在VERA入来局では約1100天体のOH/IR星カタログから絞り込んだ約100天体に対してH2OとSiO (v=1, v=2)の3種類のメーザー輝線を使ったモニター観測を進めている。可視光で非常に暗い天体についてはメーザーで独自に周期を決定することも目的としている。また恒常的にメーザーが検出され、かつ可視光でも明るい天体については、波長間の変動の様子を比較することが可能となる。

図7はメーザーにより周期を決定した一例(NSV17351)である。周期は非常に長く、1114日と得られた。

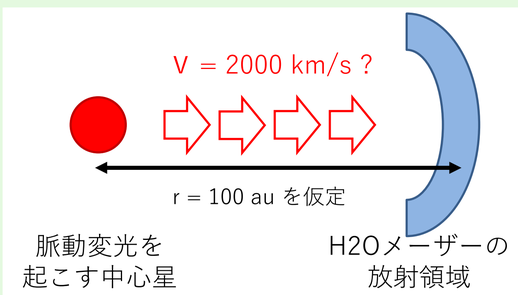


↑図7: 長周期OH/IR星NSV17351のH2Oメーザー変動の様子。この様子から変光周期=1114日が得られた。

かつてShintani et al. (2008)では主にMira型変光星について近赤外線での変光とメーザー変動の関係を調べたが、近年の我々の観測で長周期OH/IR星に対しても同様な比較が可能となってきた。図8はその一例であり、変光周期約490日のIRC-30363の結果である。可視光とH2Oメーザーの比較により約90日の遅延が確認された。典型的なMira型星と同程度の遅延であることが分かった。



↑図8: IRC-30363のH2Oメーザーと可視光の時間変動の様子。可視光に遅れること約90日でメーザーの変動が追随する。



←図9:H2Oメーザー領域を中心星から100auと仮定する。90日の遅延を何らかの物理状態の伝播で説明しようとすると、2000km/sの速度が必要であり説明が困難。中心星からの輻射が潜在的なメーザー放射領域へたどり着いた後、メーザーが励起されるまでに必要な時間が遅延として観測されると考えるのが一般的。

参考文献：
○Feast (2009). 2009asrp.proc.48F、○Gaia Collaboration (2018) 2020A&A.616A.1G、○Matsuno et al.(2020) 2020PASJ.72.56M、○Morita et al. in prep.、
○Nakagawa et al.(2016) 2016PASJ.68.78N、○Nakagawa et al.(2018) 2018IAUS.336.365N、○Shintani et al.(2008) 2008PASJ...60.1077S