

長周期ミラ型変光星を用いた天の川銀河の構造研究

2020年3月

浦郷陸

概要

ミラ型変光星は 100 日以上周期を持つ脈動型変光星であり、周期光度関係と呼ばれる変光の周期と星の絶対光度の関係性を持っており、それによって距離が決定できる。加えて、ミラ型変光星の質量はその周期と正の相関関係があり、長周期の天体ほど星の質量が増加すると考えられている。質量が重い天体は星が生まれた場所の近くに存在すると考えられているため、周期の長いミラ型変光星の分布は銀河の腕構造（ここでは、大質量星が形成されている領域の意）をトレースしていると考えられる。本研究では、鹿児島大学 1m 望遠鏡を用いて長周期ミラ型変光星に対して実施したモニタリング観測の結果について報告する。また、ミラ型変光星の従来の距離決定方法を見直し、精度の向上を図るとともに、天の川銀河上での長周期ミラ型変光星の 3 次元分布を得た。その分布と天の川銀河の腕構造を比較し、腕構造のトレーサー（腕構造によく付随している天体）としての可能性を考察する。

第 1 章は、ミラ型変光星についての情報をまとめた。ミラ型変光星は AGB 星といわれる星の進化の最終ステージにある星であり、非常に長い周期と、高い周期性を持った脈動型変光星である。本研究では、このミラ型変光星の持つ様々な特徴、物理的な関係を用いて議論を行う。そのため本章において、AGB 星の成り立ち、ミラ型変光星の概要、表面の化学組成とその形成モデル、これまで行われたミラ型変光星の研究などについて述べた。

第 2 章は、天の川銀河の構造についてまとめた。天の川銀河は我々が住む銀河であるため、最も詳細に調べられる可能性を持つが、我々がその内部にいるために、その全貌はいまだ明らかになっていない。他の多くの渦巻銀河と同様に、天の川銀河も、円盤構造、ハロー、腕などの構造を持っている。これらの構造に対応し、そこで起きている現象や存在している天体の種類に違いがある。このため、それぞれの構造は適切なトレーサーを用いることで分離することができる。本章はこれらの構造に対してトレーサーを用いた研究について述べた。

第 3 章は、観測を行ったミラ型変光星の選出方法、また、用いた観測装置、解析手法、その他に用いたアーカイブデータについてもまとめる。数多ある恒星から長周期ミラ型変光星を効率的に選択するため、IRAS 衛星によって得られた IRAS2 色図上のより星周ダスト構造の進化が進んだ領域 (IIIa, IIIb) より 800 天体を選出した。これらの天体は天の川銀河内で OH/IR 星といわれる星周に厚いダスト殻構造を持っている天体である。質量が大きいミラ型変光星はより多くのダスト殻をその身にまとっているとされていることから、これらは長周期ミラ型変光星の可能性が高い。鹿児島大学では 1m 望遠鏡と近赤外線カメラを用いて、これらの候補天体に対して 13 年間のモニタリング観測を行った。このモニタリング観測で得られたデータの詳細やデータの解析方法についてまとめた。また、他の望遠鏡などで得られ、広く公開されているデータを用いた議論を本研究では行っているため、それについてもまとめた。

第 4 章では、観測により得られた結果について述べた。本研究のモニタリング観測から得られたミラ型変光星の時系列データに対してフィッティングを行い、周期、平均等級、振幅を得た。また、得られた振幅、周期の分布を先行研究と比較し、本研究の天体は典型的なミ

ラ型変光星よりも長周期の傾向があることを示した。

第5章では、距離決定方法の再検討を行った。ミラ型変光星の近赤外線 (JHK バンド) の周期光度関係は大マゼラン雲での研究から、長周期側で直線の関係が崩れてしまうことが報告されている。これは長周期ミラ型変光星が持っている厚いダスト殻による減光の影響であると考えられている。そのため、波長 $3.4\mu\text{m}$ での周期光度関係を用いて距離決定を行った。この波長帯では、星の表面からの放射とそれを吸収して星周ダストが再放射する強度が一致するためである。周期光度関係によって求めた距離と、年周視差測定によって求められた距離を比較し、 $3.4\mu\text{m}$ での周期光度関係が高い精度を持つことを確認した。また、減光補正方法も従来の方法とは別の方法を考案した。個々の恒星に対する色だけから減光補正を行う従来の方法では、長周期変光星の厚いダスト殻の減光と前景の星間減光との区別ができない。そのため、星間減光量の見積もりに誤りがある可能性があった。本研究は厚いダスト殻を考慮した赤外線2色図を用いた減光補正法と赤化マップを用いた2つの方法を提案した。

第6章では、モニタリング観測を行った長周期ミラ型変光星の観測的な詳細とその天の川銀河内での3次元分布について考察を行った。長周期ミラ型変光星は天球面上の位置では銀河面（銀緯が低い領域の意味）に多く存在したが、立体的な位置でもやはり銀河面に多く存在した。特に天の川銀河の $|z| < 300\text{pc}$ は「thin disk」と呼ばれる、金属量が多く寿命が短い天体が存在している構造である。「thin disk」の中に存在した長周期ミラ型変光星は腕構造の付近、特にサジタリウス腕に付随した。腕と腕の間には天体の数が急激に減少している位置が見られ、長周期ミラ型変光星もこの位置で数が減っていることが確認できた。このことから、長周期ミラ型変光星は天の川銀河における若い構造をトレースするよい指標とできる可能性が高いことが確認できた。

目次

| | | |
|--------|----------------------------------------------------|----|
| 第 I 部 | 導入 | 3 |
| 1 | AGB 星 | 5 |
| 1.1 | ミラ型変光星 | 9 |
| 1.2 | 表面化学組成の変化過程 (Third Dredge Up と Hot Bottom Burning) | 17 |
| 1.3 | ミラ型変光星の観測的研究 | 18 |
| 1.4 | 半規則型変光星 | 21 |
| 2 | 銀河構造 | 23 |
| 2.1 | 円盤構造 | 23 |
| 2.2 | 天の川銀河の渦巻構造 | 24 |
| 第 II 部 | 長周期ミラ型変光星を用いた天の川銀河構造 | 31 |
| 3 | 導入 | 31 |
| 3.1 | 天体選出 | 32 |
| 4 | 観測機器とデータ校正 | 35 |
| 4.1 | 鹿児島大学 1m 望遠鏡 | 35 |
| 4.2 | Two Micron All Sky Survey;2MASS | 36 |
| 4.3 | WISE | 36 |
| 4.4 | VERA | 37 |
| 4.5 | Cosmic Background Explorer;COBE | 37 |
| 4.6 | データ校正 | 38 |
| 5 | 観測結果 | 45 |
| 5.1 | ライトカーブ | 45 |
| 5.2 | 周期分布 | 48 |
| 6 | 距離決定方法 | 49 |
| 6.1 | 周期光度関係 | 49 |
| 6.2 | 星間減光補正 | 61 |
| 7 | 議論 | 65 |
| 7.1 | 腕構造と Face-on 分布 | 65 |
| 8 | まとめ | 71 |

第 I 部

導入

天の川銀河とは我々の住む地球が存在している銀河である。数多く宇宙に存在している銀河の中で、最も特別な銀河である。それは、この銀河が他の銀河を知るための基準となっているからである。銀河とは星の集合体であり、また星を生み出すための工場でもあり、それを深く理解することは天文学にとって重要である。また、宇宙の距離スケールは人類の距離スケールと大きく異なり、その詳細を知ることは近い距離でない限り不可能である。最も身近にある天の川銀河を深く理解することで、別の銀河と比較した際のベンチマークとして使用でき、銀河の形成過程、星の形成過程を深く研究できるようになるだろう。しかし、一方で天の川銀河の物理的なパラメーターを決めることは困難である。天の川銀河のパラメーターは年齢、距離、質量、種類、速度など多岐にわたっている。これらのパラメーターを決定することは現代においてもほとんど達成できていない。地球が天の川銀河のなかに存在しているために、全体像の把握が困難になっているからである。この二律背反な性質を持つ天の川銀河の探求は長い歴史の中で行われてきた。

天の川銀河は、CO と HI ガス (Dame et al.2001) や星の数 (Benjamin et al.2005 など) の観測から分かるように、渦巻銀河である。ただし、地球の銀河内の位置により、正確な渦巻腕の数と位置、中央バーの長さや位置、および回転曲線などは決定することが難しく、その結果、天の川銀河の最も基本的なパラメーターでさえ高い精度では、まだ決定されていない。形態分類学の観点からも、天の川銀河と全く同じ銀河は 2 つと存在しないこともあり、別の銀河の全貌を天の川銀河へ適用させ、全体像を解き明かすアプローチ法は困難であると言わざるを得ない。そのため、歴史的に天文学者は天の川銀河を構成する細かい部分ごとに明らかにすることによって、天の川銀河の全貌を理解しようとしてきた。それは例えば銀河の中心にあるバルジ、渦巻腕やハローなどである。この方法は現在最も強力な銀河構造の研究法であり、様々なことを明らかにしてきた。特に重要なことは、部分的には構造的な類似がみられる他銀河も発見されていて、その形成過程も同様に類似しているだろうと考えることができる。注意点として、近年指摘されているそれぞれの構造の接続部分がどうなっているのか? という問題は無視できない。例えば thin disk や thick disk の構造は分離しているのか? という問題である。漸進的な移行を主張する人もいるが、今では、厚い円盤の大部分が支配的な薄い円盤と化学的に区別され、異なる起源を示唆している良い証拠がある (e.g. Quinn et al. 1993; Schneider et al. 2010)。

本研究で注目するのは腕構造である。腕構造は天の川銀河を構成する要素で最も重要な星を生み出している場所である。銀河の渦巻腕は現時点で多くの星を生成しており、生まれたての星やその源でもあるガスで満たされている。太陽質量程度の主系列星は生まれてから長い時間が経過しており、それによって現在観測される星の位置は、銀河の回転によってかき混ぜられていて、生まれた場所から遠く離れた位置に移動している可能性が大きいと思われる。質量が重い天体は、生まれてからの時間が非常に短いため、生まれた場所の近くにいると考えられる。つまり、質量の重い天体の分布は腕構造をそのままトレースしていると考えられる。例えば、Kerr (1962) では最初の HI ガスの分布が得られ、現在もその観測結果をもとに腕構造の分布のモデルが構築されている。腕構造のトレーサーとなる星はセフィイド型変光星と embedded cluster である。どちらの星も質量が重く、誕生してから長い時間が経過していない。実際のタイムスケールとして 100 Myr 程度である。一方でこれらの天体は可視光によって観測が行われるため、現在では ~3 kpc 程度の範囲で星までの分布が得られている。別の例として、バルジでは異なった種類のトレーサーが用いられる。バルジは古い構造であるので、年老いた星が構成要素になっている。その代表例はミラ型変光星とレッドクランプ星である (e.g. Weiland et al.1994; Lopez-Corredoira et al.2007)。レッドクランプ星はその星でいられる期間が短いミラ型変光星は

それよりも長い期間存在していただけるため、天体数が多い。

Matsunaga et al.(2005); Catchpole et al.(2016) はミラ型変光星を用いて、バルジの構造を研究した。構造を把握することにおいて問題になることはいくつかあるが、トレーサーの絶対数、星間減光が挙げられる。トレーサーの数の問題は、そもそも距離を精度よく決められる天体が限られていることにも起因しているが、特に腕構造などは若い天体しかトレーサーになりえないために、その数は他の星と比べてより少なくなる傾向がある。また、星間減光も少なくない影響を及ぼす。可視光で観測される天体は、特に銀河面、銀河中心方向において観測可能な範囲が狭くなってしまふ。この二つの影響によって腕構造の把握は星の生成工場というべき場所であり銀河研究において最も重要であるにもかかわらず、現在も完全には解明されていない。そのため、遠くまで正確な距離決定が可能な腕構造のトレーサーを増やすことが重要である。星間減光が強く影響する銀河面を遠くまで見通すことができるのは赤外線である。そのため、私はミラ型変光星に注目をした。ミラ型変光星は赤外線で見えるため、星間減光の影響も可視光と比べて小さく、銀河を遠くまで見通すことに長けている。では晩期型星であるミラ型変光星は腕構造のトレーサー足りえるか？ミラ型変光星は初期質量 $1\sim 8M_{\odot}$ の星が進化する星である。そのためその質量範囲の中で重い星であれば、年齢は十分に若く生まれた場所の近くに存在しているであろうと考えられる。重要なことは多くのミラ型星の中から重い質量の星を選択的に観測可能かどうかである。その条件を満たすミラ型変光星の特徴が周期質量関係である (Feast & Whitelock 2000; Feast 2009)。この関係によれば緩やかではあるものの、周期が長くなればその初期質量は大きくなると考えられる。周期が 300 日程度で年齢 ~ 7 Gyr に相当し、400 日程度で ~ 3 Gyr、それよりも周期が長くなればその年齢も小さくなっていく。要するに、周期の長いミラ型変光星は初期質量の重い天体である。私はこれら周期の長いミラ型変光星が腕構造のトレーサーとなりえるのではないかと考えた。鹿児島大学 1m 望遠鏡では 2006 年から近赤外線を用いてミラ型変光星のモニタリング観測を行ってきた。IRAS2 色図を用いて周期の長いミラ型変光星の候補を選択し、ライトカーブを取得した。また、従来のミラ型変光星の距離決定方法では長周期ミラ型変光星は正確な距離決定ができないことが分かった。

本研究は、銀河の腕構造の詳細をより明らかにするために、長周期ミラ型変光星の天の川銀河上での 3 次元分布を求める。1 章ではミラ型変光星についての情報やこれまでの研究成果についてまとめる。2 章には銀河の研究について包括的にまとめる。3 章以降は長周期ミラ型変光星の距離決定方法と銀河内の 3 次元分布についてまとめる。

1 AGB 星

Asymptotic Giant Branch(AGB) 星は、中間-小質量星が核燃焼の末にたどり着く、恒星進化の最終段階である。この進化段階の特徴は、炭素 (C) と酸素 (O) の縮退した核 (より重い星では酸素、ネオン、マグネシウム) を包んでいる水素とヘリウムの薄い燃焼殻である。また、星の構成物や放射エネルギーをかき混ぜる”対流” (mixing 現象) が水素とヘリウムの層で発生していることも特徴的である。この対流によって引き起こされるフラッシュ現象は元素の生産効率が高くなるような環境を構築することに影響を及ぼす。そのため AGB 星内では様々な元素が生産され、その過程を知ることは宇宙全体で元素や星の起源を説明することにおいて重要である (例えば、銀河外の恒星種族; Battinelli & Demers 2004)。

図 1 には太陽と同じ金属量を持った $2M_{\odot}$ の星の進化経路図を T vs log L からなる Hertzsprung-Russell 図上に示した (Herwig 2005)。星の進化は主系列星で始まり、このときの放射エネルギーは水素の核燃焼である。このとき、燃焼核で水素がすべてヘリウムに変換されると、核エネルギーの放出が停止し、中心の核は重力収縮を起こし始める。続いて、ヘリウム燃焼核の周囲に水素の薄い膜 (水素殻) ができ、そこで核反応が

開始する。これを水素殻燃焼と呼ぶ。このとき、中心の核が重力収縮を続けると、水素殻の光度が増加していき、水素の外層は膨張していく。HR 図上では光度の増加、外層の膨張などの影響により、主系列星の位置から右上に移動する。いわゆる Red Giant Branch (RGB) Phase への移行である。このときに初期質量が約 $1.8 M_{\odot}$ 以上であった場合、星が RGB の先端に到達したときに、中心のヘリウム燃焼核が縮退を始める。その結果、ヘリウムの燃焼核が爆発的に増光現象 (ヘリウム核フラッシュ) を起こしたのち、落ち着くことによってヘリウム核燃焼へ移行する。そのため、星は HR 図上の同じような位置で動きを止めることになる。これが Zero-Age Horizontal Branch(ZAHB) である。このとき、より重い星は non-violent mode で軽い星と同じようにヘリウム燃焼核が燃焼を始める。

ヘリウム核の燃焼段階は、水素燃焼核の燃焼段階よりも 10 倍速くその段階を終える。ヘリウム核燃焼により、ヘリウム及び水素燃焼殻に囲まれた酸素と炭素の核ができる。このとき、 $8 M_{\odot}$ 未満の星では炭素が燃焼せず、酸素と炭素の核は重力収縮を起こし縮退を始める。この段階が AGB の初期の状態である。

AGB 段階に到達すると、ヘリウム層が元素合成や星の構造に対して支配的になってくる。ヘリウム層での核反応が始まると、複雑な対流などの要因によりヘリウム殻フラッシュ現象を定期的に起こすようになる。この段階を TP-AGB phase と呼ぶ。C/O の核が縮退すると、水素とヘリウムの燃焼殻ができ、水素とヘリウムの燃焼を交互に繰り返していく。水素の燃焼が進んでいくとヘリウム層が厚くなり、やがてヘリウム層の底でヘリウムの核反応が始まる。このとき、ヘリウムの層の厚さが半径に比べて十分に小さいと、ヘリウム燃焼殻の燃焼率が上昇、つまり、ヘリウム層の温度が高くなる。この段階でヘリウム層に対流が発生し、対流によってヘリウム層が広がり、発生した熱によってヘリウム燃焼殻が膨張を始める。このとき、ヘリウム層では総質量が増えるわけではないので、膨張するとヘリウム層の密度は減少する。膨張にともない、ヘリウム層の圧力が減少していくと、膨張による温度の減少が燃焼による加熱を上回るようになる。完全に加熱を上回るようになると燃焼率が減少してしまう。このヘリウムの燃焼殻で起きる一時的な増光現象をヘリウム殻フラッシュ現象、または Thermal Pulse(TP) 現象と呼ぶ。

AGB 星はこの段階からさらに進化し、最終的にその質量のほとんどを質量放出することにより失い、白色矮星へとその姿を変える。その間の進化はモデル計算によって求められている。その進化は AGB 星の初期質量に強く依存する。初期質量と AGB 星の進化の関係性を図 2(Herwig 2005) に示した。初期質量が小さい星 ($M < 1.8 M_{\odot}$) は主系列星ののち、ヘリウム殻フラッシュを経験し、最終的に白色矮星になる。一方で初期質量が中間の星 ($1.8 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$) はヘリウム殻フラッシュは経験しないものの、その最後は白色矮星である (それよりも重い星は白色矮星にならない)。一方で、TP-AGB 星の進化では初期質量の分類と少し異なった分類分けとなる。初期質量が小さい星 ($1 M_{\odot} < M < 4 M_{\odot}$) は AGB 星段階でヘリウムの燃焼殻にてトリプル α 反応によって炭素を多く作る。この質量帯では Third Dredge-Up(TDU) によって、ヘリウム層に多くあった炭素が CNO サイクルによって減らされることなく、対流によって星表面に多くあらわれる。より重い星 ($4 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$) では Hot Bottom Burning(HBB) をおこす。それ以上に質量が重ければ、星の核は炭素、マグネシウムなどより重い元素となる。

AGB 星の幾何学的な構造を図 3 に示した。中央には先にも述べた酸素と炭素の縮退核がある。この核を中心にヘリウムと水素の薄い燃焼殻ができる。重元素を作る s-process などの反応はこの薄い燃焼殻で起こる。その外側には星の体積の割合のほとんどを占める水素の対流層ができていて、ここで起きる対流が対流層が含んでいる元素をかき混ぜることによってさまざまな反応が起きる。たとえば、燃焼殻によって作られた炭素を外層に運ぶ TDU がその例である。その結果、ミラ型変光星の星表面の化学組成は O-rich と C-rich に分類される。それぞれの元素を含んだ分子の吸収線が現れ、加えて星が質量放出を行うときのダスト形成で星表面の化学組成の違いによって生成されるダストが異なると言われている。また、O-rich の AGB 星の表面からは

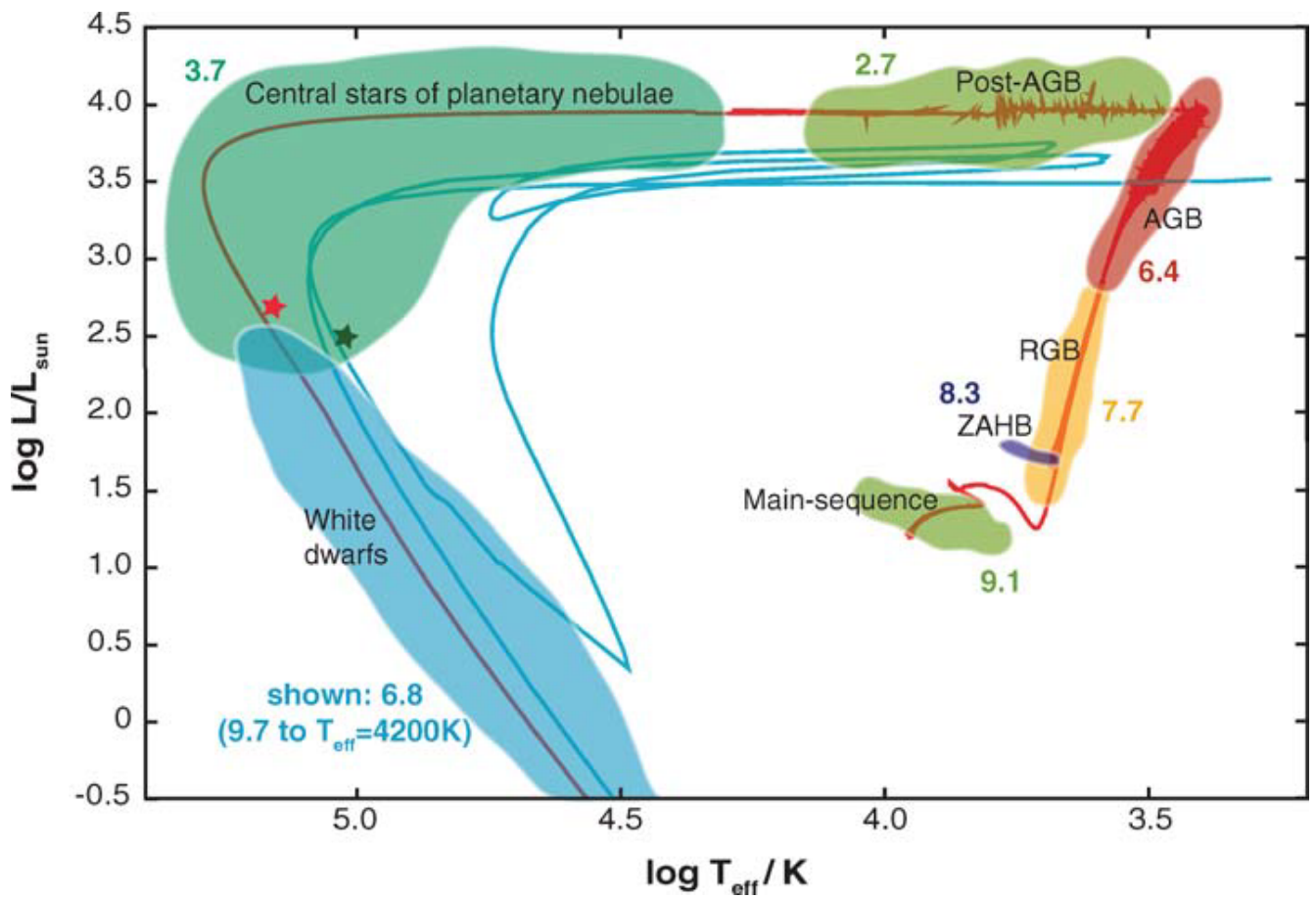


図1 $2M_{\odot}$ の星の進化トラックを示した Hertzsprung-Russell 図。Herwig(2005) より引用

レーザーがよく観測される。SiO レーザー、 H_2O レーザー、OH レーザーである。これらのレーザーは AGB 星の質量放出に伴うガス衝突によって励起されている。

AGB 星はそのフェーズの中でも段階が分かれている。一般的にそれは Thermal Pulse AGB phase (TP-AGB) と Early-AGB phase (E-AGB) と呼ばれている。この区別は TP を起こすかどうかで区別されている。

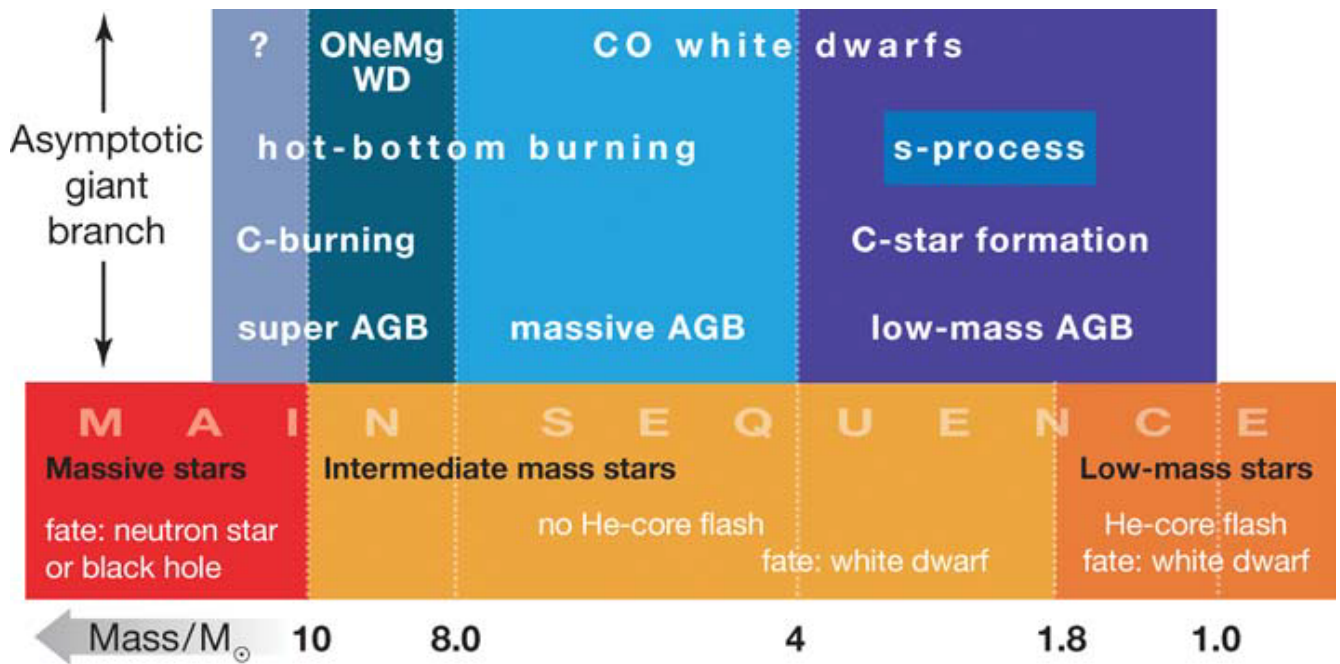


図2 初期質量に対して AGB 段階で起こす現象と結果的にできる構造の模式図。この図はあくまで大マゼラン雲の金属量を想定した量であり、他銀河では質量の範囲が若干異なる。Herwig(2005) より引用

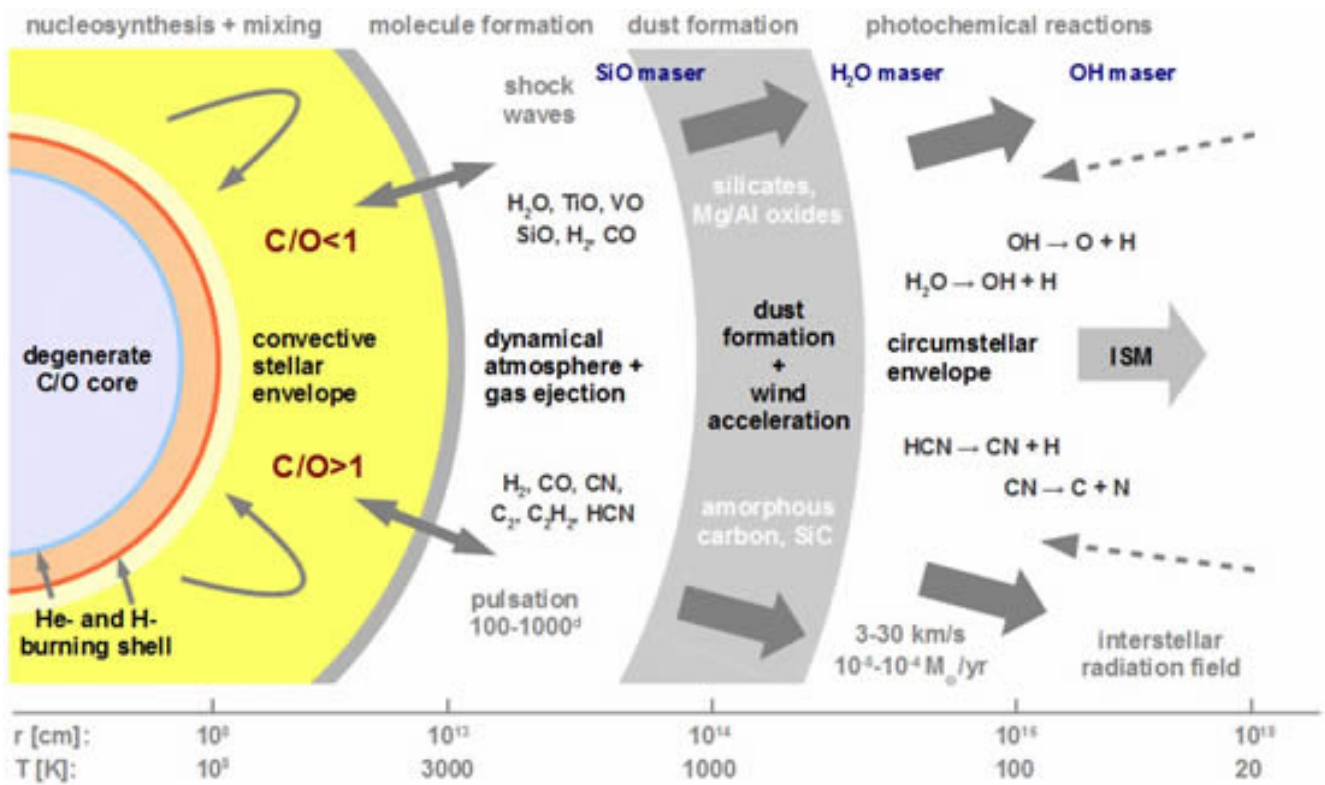


図3 AGB星の幾何学的構造図。Horn氏が作成した図を引用

1.1 ミラ型変光星

変光星とはその明るさを変化させる星である。その変光は基本的に幾何学的な変化か星そのものの物理現象で説明される。例えば、前者であれば連星系による食現象や自転、後者はフレアや膨張、突発的な爆発などである。

ミラ型変光星は AGB 星の一種であり、大きく規則的な光度変化を起こす。典型的には変光周期が 100 日以上、V バンドにおける光度変化が 2.5 等以上である。変光星の中でも特に長周期の変光星であるため Long-Period-Variable(LPV) と呼ばれる場合もある。最初に確認されたミラ型変光星は α Cet である。最初にミラ型変光星を発見した人物はイスマエル・ブリアルドゥスであり、彼は α Cet の変光周期は 333 日と報告した。以降、 α Cet は約 200 年間もの間、人類によって観測が行われてきた。図 4 には α Cet の可視光 (V バンドと B バンド) のライトカーブを示した (AAVSO; <https://www.aavso.org>)。示した期間は 1000 日間である。規則的な周期変動はサインカーブと酷似していて、これは星の外層が膨張と収縮を繰り返すことによって起きていると理解されている。

ミラ型変光星の脈動のメカニズムはいまだ議論されており、完全に解明されていない。星、特に主系列星は外層の大気が平衡状態、つまり圧力勾配と重力が釣り合っている状態である。この平衡状態から何らかの影響によってずれてしまった場合、力学的な復元的な力がはたらくことになる。これが連続的に起こるならばそれが振動現象として観測される。一方で振動を長期的に続けるには原動力が必要である。現在最も有力なモデルは κ -mechanism (Umurhan et al. 1998) である。このモデルは典型的な脈動変光星の一種である δ Cep や RR Lyr の脈動を説明した。 δ Cep や RR Lyr の星の中心部分に存在するヘリウムの部分電離層を疑似的な原動力として見立て、脈動を説明した。星が収縮すると、部分電離層の圧力と密度が高くなり、不透明度 (opacity; κ) が上昇し、エネルギーがその位置でたまりやすくなる。また膨張したときは逆に圧力と密度が下がるために、エネルギーは星の外へと出ていきやすくなる。収縮時に不透明度が高くなっていた部分電離層でエネルギーをため込むと、次の膨張時にそのエネルギーによって強く膨張し、その反動で収縮が大きくなり、結果として長く振動を続けることになる。しかし、より複雑なミラ型変光星の脈動は、 κ -mechanism だけでは説明できない。

一般にミラ型変光星は動径方向の脈動を行っており、ガス球に覆われている振動は粗密波であるから、その振動モードは音波と一緒になる。そのため、ミラ型変光星の振動は星のパラメーターに依存することが以前から示唆されていた (無限小に小さい振動を仮定した古典的な論文 ; Cox 1981)。ミラ型変光星の振動はガス大気の密度に反比例することが知られており、そのパラメーターを Q 値と呼ぶ (e.g, Fox & Wood 1982; Wood et al. 1983)。また、単一の振動モードではなく星の中に節をもった振動モードを持つ天体も存在している。通常の振動を Fundamental mode、それ以降の振動の節の数によって、First overtone mode、Second overtone mode と呼称している。これまでミラ型変光星の脈動を説明するモデルが多く提唱されてきたが、ミラ型変光星の大きすぎる半径と振幅を十分に説明できるモデルはいまだ現れていない。最新の研究 (Trabucchi et al. 2019) はミラ型変光星の周期には、その星の生まれた環境が寄与し、銀河の金属量を考慮することが必要と述べている。銀河ごとに炭素や酸素の量が異なり、星の持つ初期の金属量が異なるからである。この金属量の違いが星の不透明度に影響を与えるため、周期が変化すると言われている。図 5 には Fundamental mode の Period-Mass-Radius Relation (PMRR; 周期-質量-半径関係) を示した。脈動の周期は質量と半径に深く依存し、このモデルでは通常のミラ型変光星の脈動が単純な動力学では説明できないことを示している。

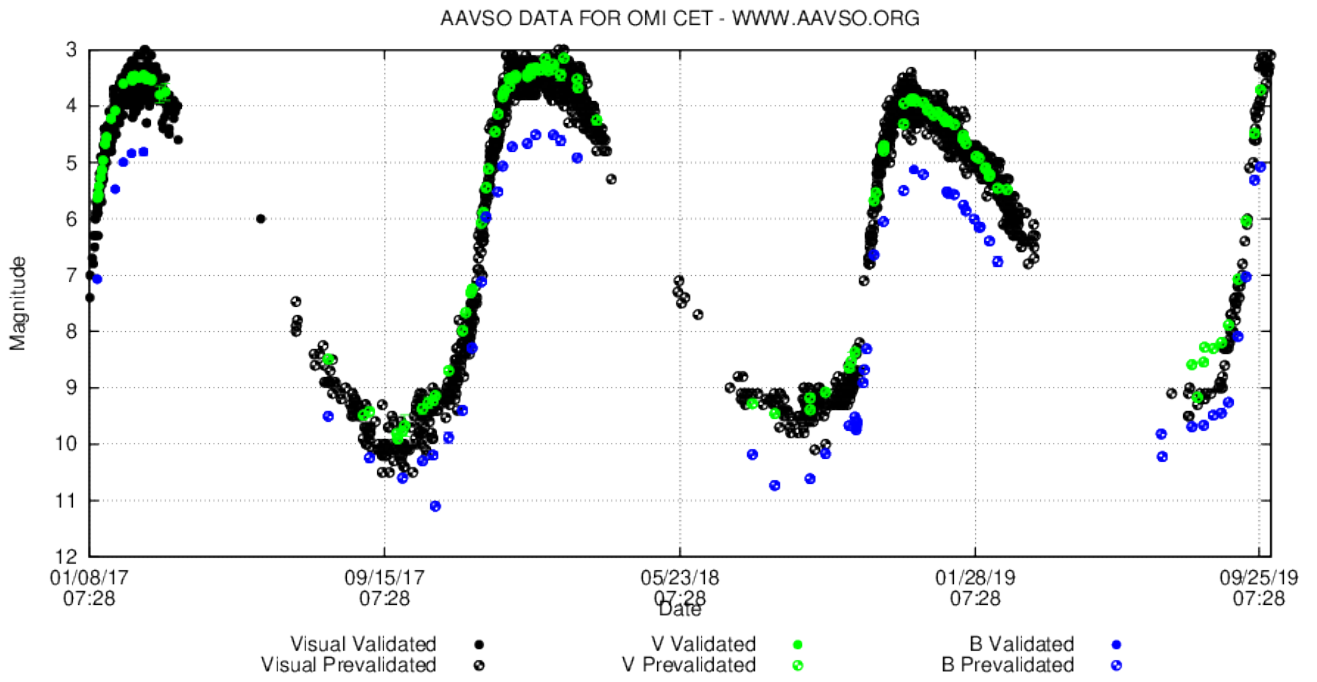


図4 oCet の見かけの明るさによる 1000 日間のライトカーブ。AAVSO データベースより引用

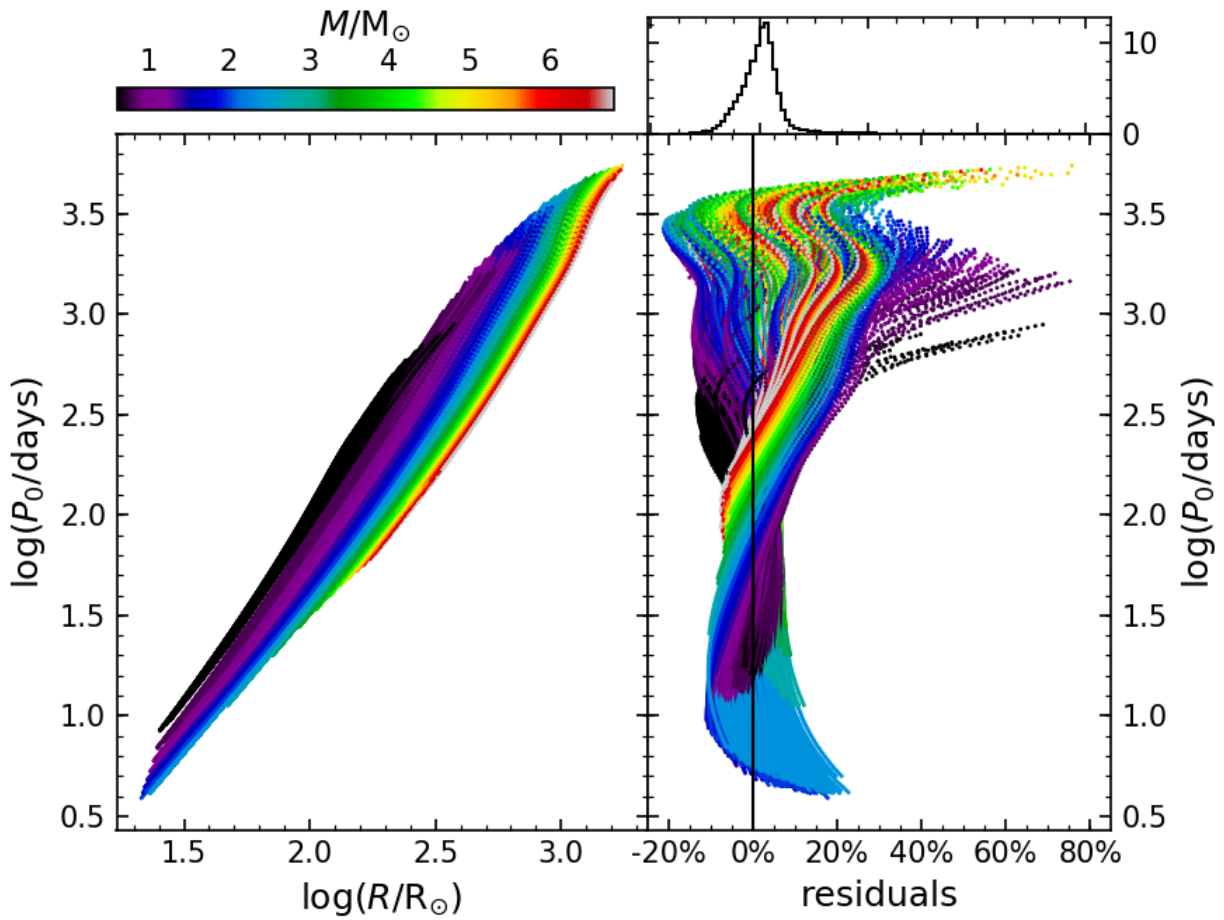


図5 Fundamental mode の Period-mass-radius relation(左) と、フィッティングの残差(右)。Trabucchi et al.(2019) より引用

1.1.1 周期光度関係

ミラ型変光星の最も興味深い特徴の一つが周期光度関係 (Period-Luminosity Relation; PLR) である。そのため、距離が決定できる星であり、宇宙の距離の基準となる星として重要な意味を持つ。周期光度関係とは、星の絶対等級は脈動の周期の対数に対して線形関係であり、周期が長いほど星が明るくなる関係のことである。最初の周期光度関係は Leavitt が発見した小マゼラン雲におけるセファイド型変光星の周期光度関係である。この周期光度関係の発見により他の変光星にも同様の関係がある可能性が考えられていた。ミラ型変光星に周期光度関係が存在している可能性を示唆したのは Gerasimovic(1928) である。それから数多くの赤外線観測が行われ、周期光度関係の構築が行われた (e.g. Catchpole et al. 1979, Feast et al. 1989)。こうして確立したミラ型変光星の周期光度関係は距離決定の使いやすいツールとなった。

変光星の周期光度関係の観測的研究の多くは大マゼラン雲で行われてきた。図 6 は Ita et al.(2004) が示した大マゼラン雲で得られた様々な天体の周期光度関係である (K-log P 図)。この図の C 系列がミラ型変光星である。この系列はタイトな関係を示しているが、この関係性は赤外線でも成り立つ。図 7 は Ita and Matsunaga (2011) が示した、様々な赤外線波長で構築されたミラ型変光星の周期光度関係である。このミラ型変光星の JHK バンドの周期光度関係では、新しい発見があった。それまでの周期光度関係は短周期側 ($\log P < 2.7$) の関係は知られているが、長周期側がどこまで関係が成り立っているのかは確認できていなかった。これは周期決定に数年以上の長い期間が必要だからであった。長周期ミラ型変光星 (特に $\log P > 2.7$) の周期光度図上での位置は、それまでに発見されていた数天体から予想されていて、Feast et al.(1989) では O-rich のミラ型変光星が外挿線よりも明るくなる傾向を示していることは分かっていた。Ita and Matsunaga (2011) でも新たに発見された長周期ミラ型変光星は同様に外挿線からの増光傾向を示し、この傾向が O-rich の長周期ミラ型変光星でおこる普遍的現象であることを明らかにした (図 7)。

加えて Ita & Matsunaga(2011) では新たに減光の傾向を示すミラ型変光星が示された。近赤外線 JHK バンドの C-rich のミラ型変光星では $2.6 < \log P < 2.9$ 付近の関係性が崩れていることが図 7 から分かる。これはいわゆる星周ダストの影響で星からの放射がダストによって吸収され、減光に転じている。ミラ型変光星は晩期型星であるため、星は最終的に星の中心核を残し、その外層の大気をすべて失ってしまう。これを質量放出とよび、ミラ型変光星はすべて例外なくこの質量放出 (典型的には $10^{-5} \sim 10^{-7} M_{\odot}/yr$) を経験し、白色矮星へと至る。このとき放出された外層のガスが凝結され、ダストとなり星の周りを膜のように覆い隠す。これを星周ダストと呼ぶ。このダストの放出の機構はまだ謎が多く、明確な解明には至っていないものの観測的な証拠として多数のミラ型変光星で確認されている (e.g Ita & Matsunaga 2011, Whitelock et al.2000)。また、これは C-rich のミラ型変光星だけの問題ではなく、 $\log P = 3.0 \sim 3.2$ 付近では O-rich のミラ型変光星も減光に転じている。Ita & Matsunaga(2011) はこの O-rich のミラ型変光星が天の川銀河に存在する OH/IR 星 (OH メーザーを放出し、赤外線で見える星、ミラ型変光星でもある) であると述べている。

一方で、より波長が長くなると (特に $4.5\mu\text{m}$ より長い波長帯)、C-rich が O-rich より明るくなる。これも星周ダストの影響である。星周ダストは星から数十 R_{\odot} の位置に存在し (Herwig2005)、星からの放射で温められている。その温度は $1000\text{K} \sim 2000\text{K}$ であるため、その黒体放射のピークが星の 3000K 程度から波長の長い方向へずれることになる。そのため $4.5\mu\text{m}$ 以上の長波長ではダストを多く纏っている C-rich のミラ型変光星のほうが明るくなっている。

$3.6\mu\text{m}$ の周期光度関係は非常に興味深い性質を持っている。これは近赤外線で見える星 (まだダストを十分に纏っておらず、光球が見えている星) と、中間赤外線で見える星 (ダストを纏っている星) の明るさが一致する。この周期光度関係に関しては本稿の 5 章で詳しく述べる。

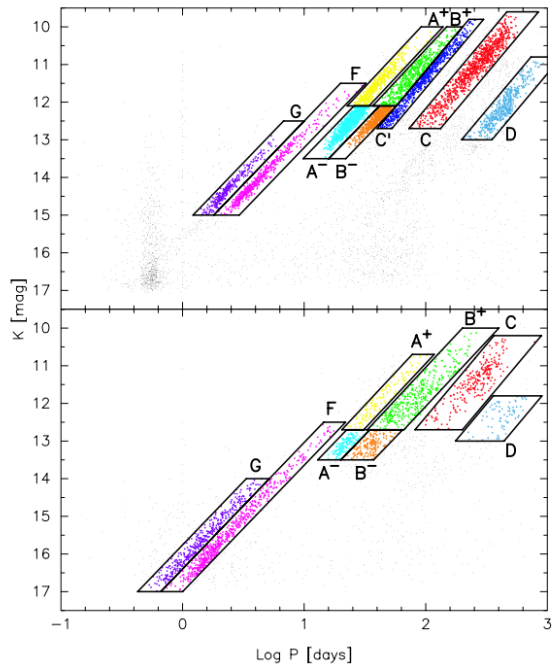


図 6 大マゼラン雲の様々な周期光度関係の系列。Ita et al.(2004) より引用

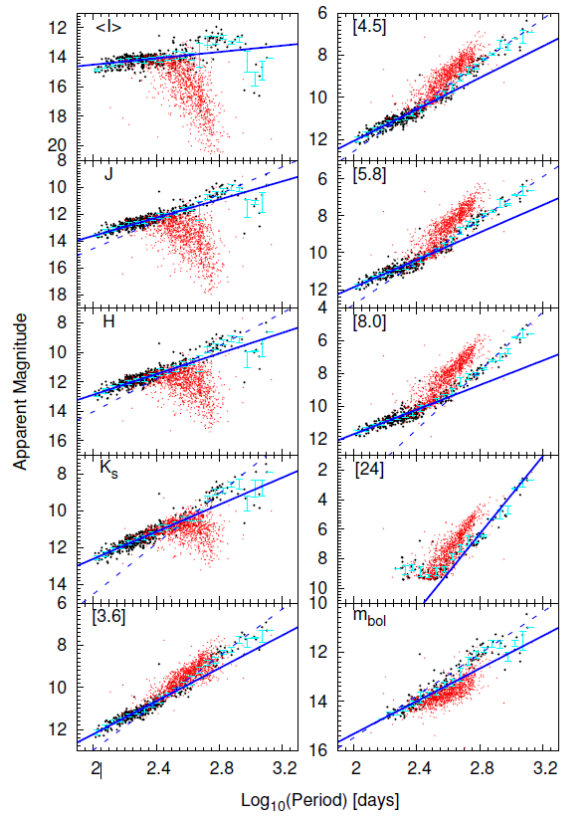


図 7 ミラ型変光星の J バンドから $24\mu\text{m}$ と bolometric magnitude の周期光度図。黒色;O-rich, 赤色;C-rich 青色線; 短周期 ($\log P < 2.4$) の天体の周期光度関係。黒の点線; 長周期 O-rich の周期光度関係。Ita and Matsunaga(2011) より引用

ミラ型変光星の周期光度関係はマゼラン雲だけでなく、天の川銀河でも研究されてきた。ただ、マゼラン雲と大きく違う点は天の川銀河では、各天体までの距離を個別に決定しなければならないことである。そのため、天の川銀河での構築はまだまだ不十分である。図 8 は Whitelock (2006) が示した天の川銀河におけるミラ型変光星の周期光度関係である。ミラ型変光星一つ一つの距離を決定する必要があるため天体数がマゼラン雲よりも少ない。また、より周期の長いミラ型変光星 ($\log P > 2.7$) が地球周辺には存在しておらず、そのため、マゼラン雲で O-rich と C-rich の化学組成による周期光度関係の違いが表れていた周期範囲にデータ点が存在していない。

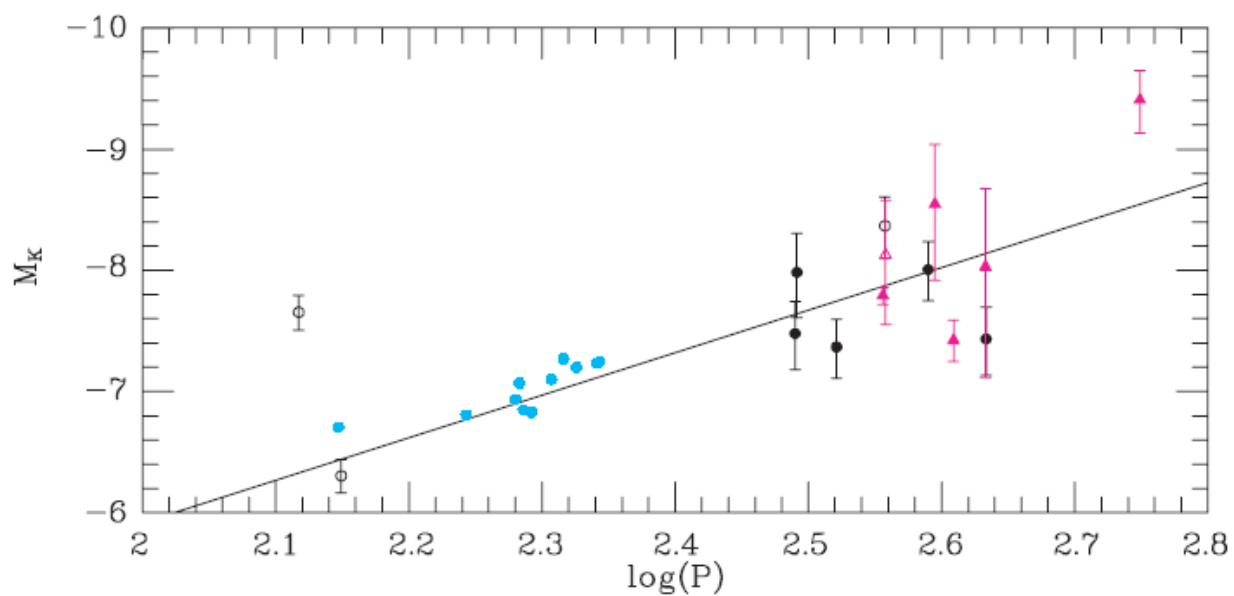


図8 天の川銀河に位置するミラ型変光星の周期光度関係。Whitelock(2006)より引用

1.1.2 様々なミラ型変光星の物理量の関係

ミラ型変光星には周期光度関係を起点として様々な派生の関係がある。それは、観測結果から求められることもあれば、理論計算から求められることもある、この多様な関係式をこの項ではまとめる。最も周期光度関係と密接な関係は Core Mass–Luminosity Relation (CMLR) である (e.g, Lattanzio 1989、Karakas 2010)。この関係によれば AGB 星の縮退した C/O の核の質量が星の光度を決めており、星の大きさや初期質量にかかわらず C/O 核の質量が重いほど星の光度は明るくなる。そのため、ミラ型変光星の周期光度関係を M_{bol} -log P で表すならば、縦軸は核の質量で決まることになる (星の核の質量がこの程度大きくなるならば、明るさはこの程度の大きさであるという緩い関係である)。周期は星の密度の逆数であるため、その星の半径を表している。 M_{bol} -log P の図では、ミラ型変光星は AGB 星の状態でもいくらか進化していくから、AGB 星になった時の星の核の質量がスタート位置を決め、そこから右上に周期光度関係の線にそって進化していく。

ミラ型変光星は近赤外線の色 (intrinsic color) と周期に関係があることが観測から分かっている。Whitelock (2006) は地球近傍のミラ型変光星を近赤外線によって観測を行い周期と色の関係性、周期色関係 (Period–Color Relation: PCR) を求めている。周期が長くなれば intrinsic color は大きくなっていく。逆にいうならば周期が決まれば、intrinsic color が決まることになる。これは、銀河の中で距離を求めることになるミラ型変光星において重要な関係である。この関係によって銀河の中に充満している星間減光の影響を取り除くことが可能になるからである。この周期色関係の物理的意味は、周期が長くなると星のサイズが大きくなり、表面の温度が下がる。星のサイズが大きくなることで、質量放出も大きくなっていて、その影響を観測していると考えられている。

ミラ型変光星は初期質量と周期に関係性があると考えられている。Feast (2009) は球状星団のミラ型変光星を観測し、phase-lag 法を用いて星団中のミラ型変光星の平均質量を決定し、周期と質量の関係性を調べた。phase-lag 法とは星団では星が一斉に誕生し、星の質量によって主系列から離れるまでの時間が異なることを利用して、HR 図上で屈曲点 (Turn off point) を調べ、そこから、星の質量を推定する方法である。これによってミラ型変光星は質量と周期に正の緩い相関があることは分かっている。

ミラ型変光星は周期–質量放出率関係 (Period-Mass loss Rate Relation) を持っている。これは周期が長くなれば質量放出が大きくなる関係である。ミラ型変光星の質量放出のメカニズムは脈動と輻射圧によってダストを放出するメカニズムが現在最も有力である。そのため、周期が長くなれば質量放出量も大きくなる。

1.1.3 C-rich/O-rich 星

ミラ型変光星は水素層に含まれている元素によって分類分けが可能である。いわゆる O-rich と C-rich のミラ型変光星である。これらの天体は、星の放射的な違いは一切ない。しかし、星を取り巻く星周の環境は全くと言っていいほど違う。例えば、C-rich のミラ型変光星では CN、C₃、C₂H₂ などの炭素を含んだ分子のガスが存在している。一方で、O-rich では TiO や H₂O などの酸素を含んだ分子のガスになる。共通している点として一酸化炭素はどちらにも存在していて、これは一酸化炭素が最も生成しやすく、酸素と炭素が共存した場合には、まず一酸化炭素が生成されるからである。それよりも外層には星周ダストが形成している。C-rich ではアモルファスカーボンが主であるのに対して、O-rich のミラ型変光星はシリケートが主であると言われている。そのため、C-rich のミラ型変光星には星周環境に一酸化炭素以外の酸素を含んだ分子は存在しないと考えられ、SiO や H₂O のメーザーは O-rich のミラ型変光星に付随する。

ミラ型変光星の表面の化学組成を決める方法は大きく分けて 3 つある。それは星の色を用いる方法と分光観測を行う方法、メーザーを観測する方法である。星の色を用いた分類分けは様々な波長での観測を用いることで達成される。化学組成が異なるミラ型変光星が持っている様々な分子の吸収線の違いを反映するためである。大マゼラン雲での分類分けは Wesenheit 指数を用いて行われた。そもそも Wesenheit 指数はセフィイド型変光星の星間減光を補正するために考え出された量である。Soszyński et al.(2009) では近赤外線と可視光の Wesenheit 指数を用いることによって OGEL-III で発見された、ミラ型変光星と不規則型変光星を C-rich と O-rich に分類分けできることを示した。しかし、分光観測による確認を数天体でしか行われていないため、すべての天体で正しい分類分けができていない可能性に注意しなければならない。別の方法として、Ishihara et al.(2011) では AKARI の観測により得られた中間赤外線の色を用いて分類分けを行った。ミラ型変光星は分子の吸収線によって J-K vs K-[9] と J-K vs [9]-[18] の 2 色図ではミラ型変光星の 2 色図は明確に 2 つに別れる (例えば、[9] は 9 μ m のバンド帯の意味である)。実際に AKARI で観測された AGB 候補星に対し、この分類分けを行い、約 100000 個の O-rich のミラ型変光星と 10000 個の C-rich の候補星を示した。O-rich のミラ型変光星には 10 μ m と 20 μ m の波長帯に大きなシリケートの吸収線があり、AKARI の 9 μ m と 18 μ m のバンド帯はこれを多く含んでいる。一方で、C-rich のミラ型変光星ではこの特徴はもたない。よって AKARI の 9 μ m と 18 μ m を用いた色を比較すれば、C-rich と O-rich が分類可能である。

図 9 は Yao et al.(2017) によるミラ型変光星の可視光での低分散分光のスペクトルである。O-rich と C-rich のミラ型変光星は可視光で全く違う形を示す。全体の特徴としても違いがあるが、最も注目したいのは O-rich の TiO の吸収線、C-rich の CN の吸収線である。今のところ、この特徴から大きく外れたミラ型変光星は存在していない。特に TiO、CN の吸収線は SN が悪くても見えるので、化学組成を決める最も強力な指標であるといえる。

最後に示すのはメーザー源である。これは SiO、H₂O、OH メーザーが観測されたならば、これらの天体は O-rich であると分類するものである。特に OH メーザーや SiO メーザーは星周環境でよく観測されており、OH メーザーを放射している OH/IR 星はその代表例である。ただ、この方法は制限が多くあって、可視光や近赤外線と比べると距離が遠くなると、メーザーが検出される可能性が格段に落ちる。これは星が放射しているメーザーが弱いからである。また、シリケートカーボンスターの可能性を考慮しなければならない。これは酸化物のメーザーを放射しているものの、星表面の化学組成は C-rich の星というものである (Kwon & Suh 2014)。この天体は天の川銀河で数天体しか見つかっていないので、全体の割合としては少ない特殊な天体であると考えられている。この星はシリケートのダストを放出した後に C-rich になったと考えられている星である。そのため、この方法だけで選別を行うと間違ってしまう可能性があることに注意する。

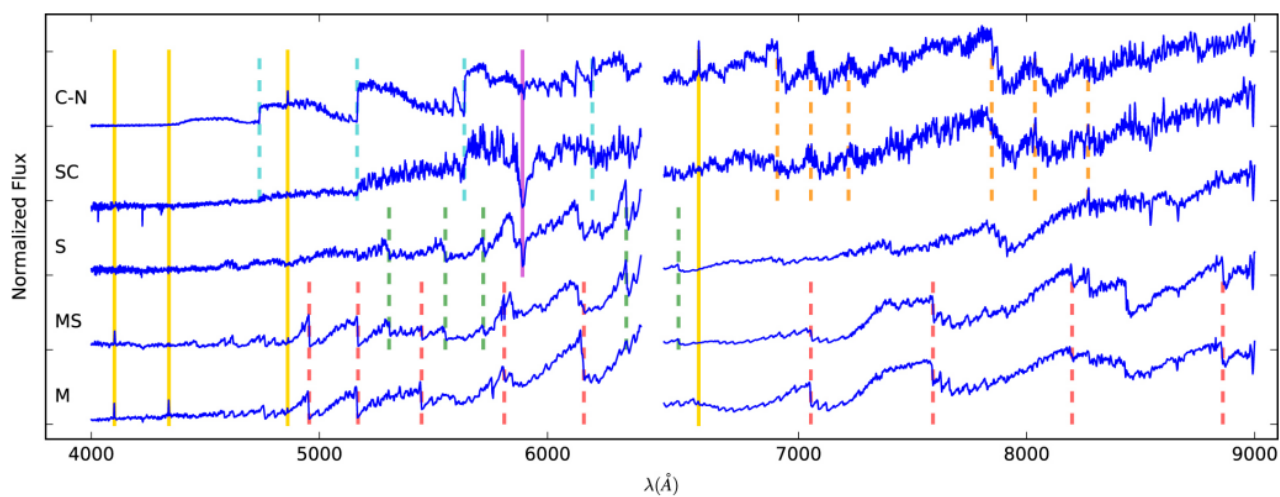


図9 C-rich と O-rich のスペクトル。ミラ型変光星のスペクトルタイプによるスペクトルの違い。実線は輝線を表す (黄色：バルマー系列、紫：NaI)。破線は分子の吸収線を表す (赤：TiO、緑：ZrO、シアン：C2、オレンジ：CN)。Yao et al.(2017) より引用

1.2 表面化学組成の変化過程 (Third Dredge Up と Hot Bottom Burning)

ミラ型変光星の星表面の化学組成には違いがあることは前節で述べた。その化学組成は現在のモデルでは、AGB 星の初期質量によって Third Dredge Up と Hot Bottom Burning と呼ばれる現象の有無が異なることで違いが生じる。

TDU は元素合成によって作られた元素を星表面へと押し上げる対流による混合過程である。これによって、星の核近くで作られた元素を星表面へと運び、星表面から質量放出現象を通して宇宙に供給されることになる。主系列星から進化した星には中心に核があり、その周りに薄い燃焼殻が存在していて、そのまわりに対流を起こす外層が存在している。この中にある核がその段階で主要な核燃焼イベントの終了後に、中心核が収縮を起こし外層が膨張を始める。このときに対流が一時的に深化する現象を Dredge-Up と呼ぶ。そのため、星はその寿命のうちに数回の DU を経験することになる。最初の DU は水素核燃焼後、その次はヘリウム核の燃焼後に DU が起きて、それぞれを First-Dredge-Up、Second-Dredge-Up と呼ぶ。TDU はそのあとに起きる現象で、これには TP が深くかかわっている。TP によってヘリウム層が膨張すると、その外側の水素の燃焼殻も温度が下がる。それとともに、水素燃焼殻の燃焼率も落ちてやがてなくなってしまふ。このとき AGB 星はエネルギー源を完全に水素の燃焼殻からヘリウムの燃焼殻に移行することになるが、燃焼殻の外の質量はヘリウム層の分だけ増加することになる。このときに、星表面の対流層がもともと水素燃焼殻であったところを超えてヘリウム層の上部も巻き込むことになる。これが TDU である。TP ではヘリウム層にてヘリウム以降の元素をたくさん生成している。特にヘリウム、s-process の生成物、炭素を多く含んでいて、TDU で最も重要な元素が炭素である。この TDU は C-rich 星の生成理由そのもので、AGB がスタートした時にはもともと C/O が 3 分の 1 にも満たない量しか炭素を含んではいないが、この量の差を覆すほどの炭素を星表面へと供給していく。もともとヘリウム層では炭素が酸素の 3 倍近く含まれているため、TP の度に TDU を起こすことによって星表面を C-rich へと変化させていくのである。この TDU は $M > 1.0 \sim 1.5 M_{\odot}$ の星が起こすと言われている。初期質量が小さい星の場合、ヘリウム層は輻射の吸収係数（不透明度）が小さいため、対流が小さくてよく、対流の深化はヘリウム層まで到達しない。

HBB は質量が重い AGB 星 ($M > 4 M_{\odot}$) でおこる燃焼殻の発火現象である。質量が重い場合、水素の燃焼殻へ対流による燃料供給が始まる。これによって重い星は水素の燃焼殻が活発な分、CMLR によって導かれた星の明るさよりも、光度が明るくなる。質量が大きければ大きいほど、水素の燃焼殻はより多くの対流層に挟まれているので HBB は活発になる。そのため外層によって熱も効率的に運ばれて、ヘリウム層の底部の温度が上昇していく。これが HBB である。

AGB 星の星表面の組成は TDU と HBB の複合で決定される。まず低質量の星 ($M < 1.0 \sim 1.5 M_{\odot}$) は TDU が起きない。これによって星の組成は初期の酸素過多のままである。そのため O-rich 星になる。中間質量の星は ($1.5 M_{\odot} < M < 4 M_{\odot}$) は TDU のみが起きる。これによって星表面の組成は炭素がくみ上げられることによって C-rich 星になる。最後に質量が重い星は ($M > 4.0 M_{\odot}$)、TDU と HBB がどちらも起きる。HBB によって温度が高くなった AGB 星のヘリウム層の底で炭素が核融合を起こし、窒素が生成されることになる。そのため、TDU でくみ上げることになるのは炭素ではなく窒素になり、いくら TDU を起こしても C/O 比に変化を与えることはない。そのため O-rich 星になる。

1.3 ミラ型変光星の観測的研究

この章ではミラ型変光星の観測的研究結果をまとめる。一般的にミラ型変光星はマゼラン雲などで活発に観測が行われてきたが、ヒッパルコス衛星を筆頭に、衛星による長期のサーベイデータなどの副産物として、また AAVSO のアーカイブデータなどのプロ、アマチュア問わないミラ型変光星の長期観測によってデータが蓄積されてきた。加えて IRAS が示した赤外線で見えていない星の発見は選択的にミラ型変光星の候補天体を観測する方法を提供した。最も重要な発展はより遠くの銀河までの距離をミラ型変光星を使って決める研究が増えてきたことである。ミラ型変光星は赤外線で見えるので観測しやすく、また、AGB 星であることからある程度の年齢が予測できることも系外銀河の恒星種族を知る重要な手段として期待されている。

周期の長いミラ型変光星の観測ができるようになったのは赤外線によって観測ができるようになってからである。Two Micron Sky Survey(TMSS) Infrared catalog(IRC) により見つかった多くの赤外線源は厚いダストに覆われた恒星を選択的に観測する手段をもたらした。これにより、いわゆる OH/IR 星といわれるミラ型変光星と似た周期性と振幅をもった、可視光では見えていなかった天体が存在することが分かった。OH/IR 星を起源とする OH メーザーが典型的なダブルピークの速度パターンをもって赤外線源から放射されていることは Wilson and Barrett (1968) によって報告された。それらの天体の可視光における対応天体を調べたところ、ミラ型変光星 (M 型巨星) に付随していることが確認された。このことから OH メーザーと IRC 天体で OH/IR 星と名付けられた。この天体は H_2O ($2\mu\text{m}$ 付近) と CO ($2.3\mu\text{m}$ 付近) の幅のある吸収線を持っていることも分かった。加えて、可視光で見える天体に対し、周期と振幅を調べたところ、通常ミラ型変光星は 300 日程度であるのに対して、それらの天体では、周期も振幅も長くなる傾向があることが分かった。また、近赤外線での色からミラ型変光星よりも明らかに赤化の影響を受けている天体が多いことが分かった。Engels et al.(1987) は IRAS で見つかった 17 天体に対して K バンドでモニタリング観測を行った。これらの天体の周期は 500~1800 日で、周期性から明らかに長周期ミラ型変光星であった。当時のミラ型変光星のモデル (Wood & Cahn 1977) ではミラ型変光星は質量が $1\sim 2M_{\odot}$ の星が進化すると言われていたが、Engels たちが観測を行った天体はその長い脈動の周期と振幅をこのモデルでは説明できず、また OH メーザーや近赤外線での観測から大きい質量放出を行っていることは明らかであった。このことから、Engels たちは OH/IR 星がより重い星が進化している可能性を示唆した。

OH/IR 星の観測データの蓄積には長い期間を要した。もともと周期が長い最低でも 2 年のモニタリング期間が必要だったからである。2000 年までにさまざまな観測報告がなされた (eg, Nakashima et al.2000; Blommaert et al.1998; Wood et al.1998)。Esteban (2006) ではそれまでに観測された OH/IR 星と新たに 1991 年から 2000 年までに観測された長周期の OH/IR 星を報告した。新たに、近赤外線の色と平均等級が増加する天体と減少する天体が見つかった。変化する近赤外線の色は IRAS 16029-3041 で見つかった。この天体は約 10 年間で、近赤外線の色 H-K が約 1 等大きくなった。これはこの期間に劇的な質量放出現象が起きたことにより、星周ダストによる赤化を受けたと彼らは推測した。また、IRAS 18576+0341 は明るさが減少し続ける天体である。この天体は色の観点から非常に青いミラ型変光星である。この論文ではこの天体に関しての推論は書かれていない。また一方で、ミラ型変光星ではない星も混ざっていることも分かっている。その判別は振幅によって行われる。例えば post-AGB 星は OH/IR 星のように非常に長い変動を見せるが、その振幅は OH/IR 星に対して非常に小さい ($\Delta K < 0.4$)。以上のような OH/IR 星の特殊な例の観測も行われてきた。

Menzies et al.(2019) には現在までの長周期ミラ型変光星の観測結果がまとめられている。現在 GCVS に登録されている天の川銀河の周期が 1000 日を超えるミラ型変光星は 11 天体である。特に C-rich のミラ型変光

星は1天体しか報告されていない。それ以外の天体は O-rich である。Marigo et al.(2017) のモデルでは金属量の高い銀河で周期の長い C-rich を作ることは難しいとされている。大マゼラン雲よりも金属量が高い、天の川銀河ではそのモデルを反映した結果を示しているといってもよい。一方で周期が1000日よりも長いミラ型変光星のほとんどは非常に質量が重いミラ型変光星の可能性がある。それらの多くは銀河面近くに存在しているために、星間減光もしくは星周減光のせいで中間赤外線でしかみえない。さらなる調査の必要性はあるものの、それらの天の川銀河における絶対量は少ないと考えられる。それは星の理論から導かれる一つの推論で、重い星の速い進化、AGB星の期間の短さ、また、重い星の出生率すべてを複合した結論である (AGB星の周期と質量の考察については Marigo et al.(2017) で述べられている)。

OH/IR 星やミラ型変光星の観測的証拠を考慮して OH/IR 星の質量を推察することはできる。先のセクションにも示したが、Feast (2009) が求めた質量と周期の相関は周期400日以下、かつ、緩やかな相関である。Whitelock (2017, 2018) では HBB を起こしていると示唆される星を見つけている。それは $4M_{\odot}$ 以上であることがモデル計算から考えられる。これよりも周期の長い傾向のある OH/IR 星は一般的なミラ型変光星よりも重い可能性がある。また他のミラ型変光星と比較すると、明らかに OH/IR 星は銀河面内におさまられているので、重い初期質量天体であると考えられる。

ミラ型変光星の観測は、特にバルジと矮小楕円銀河に対して多く行われてきた。バルジに対する最初期の観測的研究は Whitelock & Catchpole (1992) である。天の川銀河のバルジには比較的古い天体が多い傾向があり、ミラ型変光星はそのためにバルジ構造、恒星種族のトレーサになると考えられていた。Whitelock らは IRAS で観測されたバルジ方向にある44天体に対して JHKL バンドの近赤外線のモニタリング観測を行った。これらの天体は周期400日から500日の変光星であった。これらは IRAS によって得られた中間赤外線と近赤外線のデータを用いて黒体放射の色と比較した結果、C-rich の星と比べて、冷たいダストに覆われていることが分かった。Matsunaga et al.(2009) ではバルジのある領域に対して近赤外線サーベイ観測を実施し、ミラ型変光星の分布から天の川銀河の中心までの距離を求めた。彼らは、ミラ型変光星の距離を決定する際に、JHK バンドの2色図より星間減光の補正を行った。intrinsic color は Whitelock et al.(2006) で得られた周期色関係を用いて行った。この研究では近赤外線の平均等級を用いて色が算出されており、周期の短いミラ型変光星を用いて距離を決定した。この減光補正方法は以降のミラ型変光星の距離決定を行う際に、用いられる方法の一つである。ミラ型変光星の変光は JHK バンドすべてで同じ振幅をしているとは限らない。ある1観測における色を用いて議論する場合、その振幅による差を考慮しなければならず、精度が悪くなる。一方で、平均等級であればその影響はほとんど除去できるだろう。バルジ観測の最新は Catchpole et al.(2016) によるバルジ全体のミラ型変光星を用いた構造の研究である。彼らが行ったのは周期の違いによるバルジ構造における年齢勾配の同定である。ミラ型変光星といっても、その初期質量は $1\sim 8M_{\odot}$ と幅があることが分かっている。また、その初期質量が周期に関係があることが分かっているために、周期ごとの分布による違いが構造的年齢の違いによって現れると考えられる。しかし、長周期ミラ型変光星は厚いダストに覆われている。そのため彼らは先に述べた JHK3 色を用いた減光補正を行わず、減光マップを用いた減光補正を行い、色の赤化の影響が星周と星間どちらによるものなのかを明らかにした。そうして距離決定したミラ型変光星を周期ごとにプロットすると、バルジには古い構造と新しい構造があることが分かった。古い天体は全体に薄く広く分布しているのに対して、年老いた天体は2か所に集中するような構造を示した。天の川銀河の同一の構造体の中でも年齢による違いが存在し、それが星形成の形跡を追跡する際に重要なツールになることが明らかになったのである。

系外銀河でのミラ型変光星の観測は、天の川銀河以外の恒星の種族を知るために用いられることが多い。加えて近赤外線で見ると、周期光度関係によって距離も決められるため、最も重要な手段の一つといってもよいだろう。また、ミラ型変光星は銀河の金属量を追跡する際に有用である。Menzies et al.(2019) では、窒素の

金属量が天の川銀河銀河よりも低い NGC3109 で非常に周期が長い C-rich のミラ型変光星が発見された。この星の質量は $5 M_{\odot}$ と推測されており、星の進化モデルとは異なる結果になった。特にこの星は質量放出率が著しく低い星で、その原因は母銀河の金属量が低いことだと考えられる。金属量が高い銀河（例えば天の川銀河や大マゼラン雲）では周期 1000 日を超える C-rich が作れないことは Marigo たちがモデルによって示しており、高い金属量は O-rich 星に対しては高い質量放出率を誘導することが知られている。一方で低い金属量は C-rich 星において質量放出率を下げる方向に働くので、このような星が生まれたという解釈である。また、矮小楕円銀河 Leo I の観測では長周期ミラ型変光星（特に 1000 日を超える）が見つからなかった。これは Leo I の金属量が著しく小さいためであると考えられている (Menzies et al.2010)。

1.3.1 質量放出

AGB 星は中小質量星の進化の最終段階の星であり、結果的にその質量のほとんどを失い、中心の核が白色矮星になることが分かっている。宇宙の組成を見てみると、水素がそのほとんどではあるが、重元素も多くあり、その起源は星である。そのため、AGB 星における元素合成とそれにもなう質量放出の研究は宇宙や天体物理において重要である。一般的な AGB 星は表面の温度が 3000K であるが、その一方で光度は $10^3 L_{\odot} \sim 10^4 L_{\odot}$ と太陽と比較すると高い。星の半径は数百倍に大きくなっているため表面の重力は結果として 4 桁から 5 桁低くなることになる。星表面近くのガスが十分な速度まで加速するプロセスが起きたならば、AGB 星の表面から脱出していくことになるが、膨張している AGB 星では容易に達成できるのである。ガスの加速はおそらく脈動によって引き起こされる衝撃波が起源であると言われている。

1.4 半規則型変光星

ミラ型変光星以外にも晩期型星に分類される変光星がある。半規則型変光星とよばれるものもその一つである。この変光星は変光のライトカーブがミラ型変光星とくらべて不規則である。半規則型変光星の変光周期はミラ型変光星と同程度に長い総じて振幅が小さい (eg, Whitelock 2000, Matsunaga et al.2009)。

古典的な半規則型変光星の分類は SRa と SRb の 2 種類である。GCVS によって決められたこの分類方法は明確な基準を持っているわけではないものの、長く天文学者に用いられている。SRa 星は、振幅と光度曲線の形状が変化する持続的な周期性を示すが、SRb 星は、周期的もしくは緩やかな不規則変光を示す。これまでのところ、両方のタイプが連続的な進化を表しているのか、LPV の異なるクラスを表しているかは明らかではない。近年、この分類方法は見直され新たな分類方法が確立した。半規則型変光星もミラ型変光星と同様な周期光度関係の系列を、それぞれの脈動の違いごとに持つことが分かったからである。Wood & Sebo(1996) によって発見されたこの関係はマイクロレンズプロジェクト (MACHO; 可視光重力レンズ実験、OGLE; EROS) と大規模近赤外線サーベイ (たとえば、2MASS、DENIS、IRSF) で得られた周期光度図上での複数の系列として得られた。Wood(2000) と Wood et al.(1999) ではより詳細に区別されて 5 つの系列として分類された。Ita et al.(2004) などでは、ミラ型変光星とセファイド型変光星を除いて、5 つの系列に分類されている (図 7、表 1)。このように、半規則型変光星は、ミラ型変光星以外の脈動を起こしている変光星群の総称であるともいえる。また、半規則型変光星はそれぞれの周期で周期光度関係の系列間を遷移する可能性も示唆されている (Wood 2000)。

この現象はモデル計算からもわかっており、最新の計算は Trabucchi et al. (2019) に示されている。図 10 は COLIBRI code(Marigo et al. 2017, Marigo et al. 2013) と呼ばれる新しいコードを用いて AGB 星の進化の軌跡を計算している。図 10 の左パネルに、初期質量 $1.5M_{\odot}$ の星の進化トラックを示す。TP-AGB の開始時の光度が低い場合、3O(overtone) モードが支配的であり、系列 A' の左端に周期がある。音響遮断周波数に達すると、3O モードが安定し、系列 A で 2O モードが支配的になる。その後、系列 B と C' を横切る周期で 1O モードが支配的になり、最後に C 系列で基本モードが支配的になる。質量が $2.6M_{\odot}$ 程度でも軽い質量の天体と似たような進化の軌跡を描く。ここで重要なことはより周期は長くなり、光度は明るくなることである。そのため、半規則型変光星やミラ型変光星の長周期天体は質量が重い星が支配的にであることを示している。より重い星 ($\sim 5M_{\odot}$) になるとそれよりも軽い星とは全く違った進化を示す。ほとんど系列をまたぐことがなくなり、同じ系列にとどまり続けることになる。これも周期が長ければ質量が重くなる関係を示している、その位置にいるミラ型変光星も確かに存在しているが、このときのミラ型変光星は質量に応じてその寿命も短くなっているため、数が少なくなっていると考えられる。

半規則型変光星ではしばしば、脈動ではない変光を示す星の存在が示唆されている。これらの星は近接連星系をなしている可能性がある。これらの星の周期光度図上の位置はそれぞれの系列の間に多く存在していて、しばしば混同の種となる。

より長周期の天体に D 系列がある。これらの星は long secondary period と呼ばれる、通常の変光ではなくより大きな傾向として規則的な変光を示す天体である。この天体はまだ脈動の起源は謎の星であり、今後の解明が期待される。

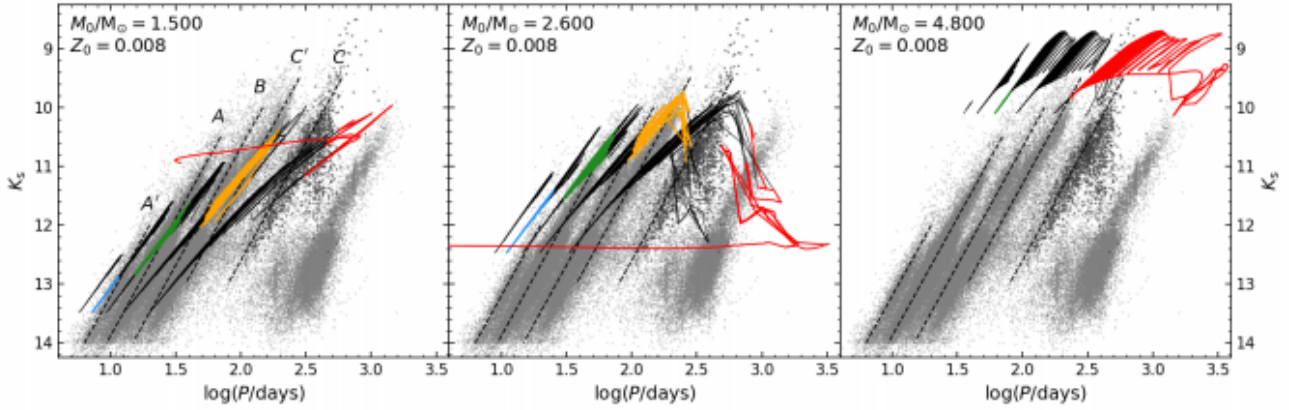


図 10 COLIBRI code によって計算された進化の軌跡を、観測された LPV の観測された K_s - $\log P$ ダイアグラムに重ね合わせた図（背景；OGLE III によるの大マゼラン雲の周期光度関係）破線は、観測されたそれぞれの周期光度関係の系列の位置を示している。ミラ型変光星として分類されたものは、系列 C として濃い色で表示される。各進化のトラックについて、5つのモードの周期が支配的な場合は色付きの実線、そうでない場合は黒い線で示した。Marigo et al.(2017) より引用

表 1 周期光度関係の分類分け (Ita et al.2004)

| Label | Color | Population |
|-------|------------|------------------------------------------------------|
| A - | Cyan | RGB variables & metal poor and old AGB variables |
| A + | Yellow | less regularly pulsating AGB variables |
| B - | Orange | RGB variables & metal poor and old AGB variables |
| B + | Green | less regularly pulsating AGB variables |
| C' | Blue | Mira variables pulsating in the 1st overtone mode |
| C | Red | Mira variables pulsating in the fundamental mode |
| D | Steel-blue | Some obscured variables & Unknown variables |
| F | Magenta | Cepheid variables pulsating in the fundamental mode |
| G | Purple | Cepheid variables pulsating in the 1st overtone mode |

2 銀河構造

夜空を見上げると、一筋の光の帯が走っている。古代の人々はこれを、川、牛乳、小道などさまざまなものに例え、最終的には可視化されている天国と例えていた例もある。このように人々にとって、非常に魅力的であった光の筋は現代の天文学では天の川銀河と呼ばれる星の集団の一つであることがわかっている。宇宙には無数の銀河が存在することが分かっているが、天の川銀河は最も重要な銀河である。天の川銀河をよく理解しようとするのは非常に困難である。それは、地球が天の川銀河の中に存在しているためである。我々は他の銀河の場合、その全体像や空間的な構造については、撮像観測を行うことで直接知ることができるが、天の川銀河の場合には同じ方法が使えない。他の銀河と同じように銀河内から全体像を把握することができないからである。そのため、天文学者たちがさまざまなアイデアを用いてこの問題を解決しようと試みた。しかし、近年にいたるまで十分な精度でそれを果たすことは実現していない。特に、太陽系は円盤の外側にあり、その反対側を見ることは容易ではない。特に、太陽系の位置からでは天の川銀河がダストで満ちていることが大きな影響を与えていて、可視光線の観測ではダストを見通すことが不可能であるからだ。しかしながら、電波と赤外線領域では話が一変する。これらの波長では星間減光が作るダストの壁を突破し、天の川銀河の全体像を知るための努力をしてきた。この章では銀河の包括的な構造とその研究についてまとめた。構造の詳細な研究については天の川銀河に焦点を当てて述べる。

2.1 円盤構造

円盤構造はハッブルが提唱した銀河の形態分類における晩期型銀河で最も顕著な構造である。この円盤部分を横から見た「天の川」は地平線から反対の地平線まで空を横切る光の壮大な帯として見える。内部から見るか、外部から見るかの違いを考慮に入れば、天の川のこの光の筋が空に走っている姿は渦巻銀河によく似ている。銀河円盤における恒星の分布に関する最初の研究は、William Herschel が著書 [On the Construction of the Heavens] に載せられた図がある。これは、同一立体角内にある恒星の計数 (star count) に基づく奥行き推定によって描かれたものであり、現代の星の明るさと比較すると V~15 等までに相当する、非常に一貫した計測を行っていることが分かっている。得られた図は、太陽が中心近くにある平坦な分布であり、全体として 1 つの系をなしていると結論づけた。これは銀河円盤の持つ平坦な性質の最初の記述である。

天の川銀河における星の分布に関する研究として次の大きなステップは、Jacobus Kapteyn の星の分布 (Kapteyn & van Rhijn 1920; Kapteyn 1922) である。銀河構造は全体が約 40000 光年のレンズ状で太陽は銀河中心から約 2000 光年の位置にあるとするもので Kapteyn モデルと呼ばれる。Kapteyn (1909a) は、距離の増加に伴って星の光が赤くなる効果があることから星間減光が存在すると推論していたにもかかわらず、星間減光の程度を定量的に導くことができなかった。このため Kapteyn model を導く際には星間減光を無視して結果を示した。その結果、太陽近傍が中心におかれた銀河円盤となっている。

銀河構造としての渦巻腕構造は天の川銀河の外にある別の銀河で 1845 年に William Parsons によって発見された。有名な M51 のスケッチである。ただし、この時点では現代天文学で言う銀河の概念が確立しておらず、天の川銀河が宇宙で唯一の銀河であり、渦巻腕構造が見られる天体は正体ははっきりしない「渦巻星雲」とされていたことには注意したい。円盤の重要性と銀河ごとの渦巻構造の違いは、John Reynolds と Edwin Hubble が提唱した銀河の形態分類の基礎となっている。銀河の円盤構造に対する次のステップは、Baade(1944) による恒星種族の概念の提案である。Baade は灯火管制がひかれたウィルソン天文台で、アンド

ロメダ銀河 M31 とその伴銀河の中心部を個々の星に分解することに初めて成功し、「渦巻星雲」が恒星の集団である「銀河」であることを直接示した。また、アンドロメダ銀河までの距離の見積もりが天体の種類によって2倍程度食い違うことを説明するために、恒星が二つの種族を持つことを提唱した。これによって、銀河の構造とそこに位置する恒星種族との間に関係があることが判明したのである。

多くの天文学研究と共通しているが、銀河の研究も初期には可視光による恒星の分布から始まっている。しかし、銀河の性質とその形成を理解するには、それだけでは不十分である。次の段階として特に重要だったのはダークマターハローの発見と銀河の形成時での階層的な物質集合がどのように進んだのかの理論的検討であった。階層的な物質集合で形成されるという概念は1970年初頭にはすでに存在しており、1977年にイェール大学で開催された銀河と恒星の進化に関するシンポジウムで広く受け入れられるようになった。ダークマターハローの発見により、White & Rees(1978)は二段階銀河形成モデルを導いた。そのモデルではダークマターが自己重力により階層的な集合を起こし、それに続いて集積したダークマターによってガスの圧縮と冷却が起これ、銀河の形成がなるとするモデルである。この概念を裏付ける観測は、ハッブル宇宙望遠鏡によってもたらされた。高赤方偏移の銀河の高分解能撮像により、巨大銀河の形成において合体と階層的集合が重要であることが直接示された。

ダークマターは現代天文学では様々な局面で登場するが、銀河に関するものではハローに存在するとされるダークマターが重要である。その最初の手がかりと言えるのが、アンドロメダ銀河において、van der Kruit & Allen (1978)、van der Kruit (1990) および Sofue & Rubin (2001) が、可視光の吸収線、輝線、およびHIの輝線を用いて、銀河の長軸に沿った視線速度の分布を調べ、銀河円盤の傾きを補正した上で、銀河の中心からの距離の関数として回転速度をプロットしたものである。

最終的には、ほとんどの銀河が平坦な回転曲線を示すことが発見され、その説明としてダークマター (van der Kruit & Allen 1978) の存在が信じられるようになった。回転曲線は質量分布の指標となるが、ダークマターの存在を示すためには通常物質の分布との比較が必要である。そのためには、円盤銀河の光度分布を知る必要がある。円盤銀河の定量的表面測光は、M31 のバルジに対する研究から始まり、より暗い円盤の光度測定も行われた。のちに、半径方向表面光度分布は指数的に減少することが明らかになった。特に de Vaucouleurs (1958, 1959b) は M31 と M33 における表面輝度の体系的な調査を行い、銀河円盤における動径方向の平均面輝度は普遍的に「exponential disk」(半径方向に対して指数関数的に表面輝度が減少する円盤)であることを観測的に確立した。

2.2 天の川銀河の渦巻構造

天の川銀河は渦巻銀河であることが知られているが、その詳細な渦巻構造はあまり明らかにされていない。天の川銀河には2本もしくは3本の腕、さらに複雑な枝のような腕構造があることを Vallée (2008) は示した。彼らは2005年から2007年までの腕構造に対する観測研究をまとめ、渦巻腕の位置(ピッチ角、形状、数、腕間距離)および速度(回転曲線)を決定し、以前までの結果と比較した。これらの結果に基づいて、銀河の象限ごとに、天の川銀河の腕の位置を予測するモデルを作成した(図11)。しかし、現在もそれぞれの腕のパラメーター(ピッチ角および渦巻腕の内縁と外縁の銀河中心半径)は十分に正確に決定されていない。一方で、天の川銀河の構造について、

- (1) 渦巻腕の接線方向はCOやその他の分子輝線の積分強度が極大となる方向(Englmaier & Gerhard, 1999)として同定されている(図11の破線参照)。
- (2) サジタリウス腕とカーリーナ腕は1本の腕としてつながっている。

- (3) 太陽はペルセウス腕とサジタリウス腕の間にある。

が共通認識となっている。

これらの手がかりだけから天の川銀河の腕構造を決定することは不可能である。したがって、これを決めるためには、腕構造に付随しているとされる、トレーサーの3次元分布を調べる必要がある。腕構造の最も主要なトレーサーはHII領域である。HII領域は若い星が誕生する場所である。HII領域から放射される電波はダストによる吸収・散乱によって減衰されないため、銀河面の非常に遠方の天体でも検出できる。Georgelin & Georgelin (1976) は、当時入手可能だったHII領域の分布を調査し、4つの銀河象限ごとの腕の分布の概要を研究した。Downes et al.(1980) は、第1象限でより多くのHII領域を観測し、Caswell & Haynes(1987) は、銀経 $l = 210^\circ$ から $l = 360^\circ$ にわたってHII領域に関するデータを報告し、渦巻構造、特にカーリーナ腕とクルックス腕の分布を求めた。Bar And Spiral Structure Legacy (BeSSeL) Survey ではVLBAを用いて大質量の星形成領域の年周視差を計測した。対象天体は、若い大質量星と渦巻構造をトレースするコンパクトなHII領域に付随しているメタノールおよび水メーザーである。正確な距離測定により、渦巻腕の位置を特定した。Honma et al.(2012), Reid et al.(2014), Reid et al.(2019) ではVLBAとVERAによるVLBI観測で年周視差測定を行った約200天体の大質量星形成領域の距離を計測し、いくつかの渦巻腕を特定している(図12)。彼らは腕構造の幾何学形状として対数周期螺旋を仮定してフィッティングを行い、すべての腕とそのパラメーター(ピッチ角、幅、銀河中心からの距離)を決定した。また、位置、距離、固有運動、および視線方向の速度を組み合わせることで、完全な3次元の運動情報が得ることができている。彼らは測定値を銀河のモデルに当てはめることにより、銀河中心までの距離 $R_0 = 8.15 \pm 0.15$ kpc、回転速度 $\Theta_0 = 236 \pm 7$ km/secと決定した。

分子雲は分子ガスの巨大な集合体であり、その質量は $10^4 \sim 10^6 M_\odot$ 、サイズは数十pcである。平均密度は $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ だが、中心密度は $10^6 \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ に達することもある。分子雲の間の領域にある星間物質はCO輝線に対してほとんど光学的に薄いので、銀河面の遠方の雲を検出できる。Cohen et al.(1986) は、巨大分子雲がカーリーナ腕の良好なトレーサーであることを示した。分子雲の3次元位置を確定するには距離の見積もりが必須である。これには視線速度と銀河回転運動モデルを組み合わせた運動学的距離がよく用いられる。しかし、太陽系よりも内側にある分子雲の場合、解が2つ存在するという問題がある。Dame et al.(1987) は、第1象限のいくつかの巨大分子雲について運動学的距離の不定性を解決し、それらがサジタリウス腕の輪郭を描くことを示した。Solomon et al.(1987) は、角分解能 $1'$ の銀河面主要部に対する粗いサーベイデータを用いて、第1象限の分子雲の3次元位置を推定し、主として可視光観測に基づいた研究によってそれまでに知られていたペルセウス腕とサジタリウス腕に加えて、スクータム腕と呼ばれる腕のような構造を描いた。銀河中心をはさんで反対側に当たる第4象限では、Grabelsky et al.(1988) がチリに設置した1.2m望遠鏡を使った角分解能 $9'$ のデータに基づき、銀経 $l = 270^\circ$ から $l = 300^\circ$ までの巨大分子雲をカタログ化し、23pc以上の大きさを持つ巨大分子雲の銀河面上での分布(銀河面を銀河北極から見下ろした図でface-on分布ともいう)を描いた。これを用いて、巨大分子雲がなす列として、サジタリウスカーリーナ腕を描き出している。Dame et al.(2001) は、ボストンのハーバード・スミソニアン天体物理学研究所に移設された1.2m鏡とチリの1.2m鏡によって新たに観測された角分解能 $9'$ のサーベイデータを公開している。これは天の川銀河全体にわたるCOマップであり、多くの巨大分子雲が同定されている。

分子雲は距離の見積もりにしばしば疑義がはさまれるのに対し、セファイド型変光星は距離指標として最も使いやすい天体のひとつである。なぜならセファイド型変光星は非常に精度の高い周期光度関係を持っているからである。セファイド型変光星は質量が重いので寿命が短く、したがってその存在自体からその年齢は中小質量星に比べて非常に若い。星は分子雲から形成されるので、ガスと若い星の集団は実質的に同じ腕に集中し

ていると考えられる。したがって、若い星や星団は巨大分子雲と同じく渦巻腕の良いトレーサーになるはずである。実際、M51 など他の銀河では渦巻腕は星形成領域・若い星や星団・暗黒星雲などが複合して集中している構造として把握されてきた。恒星を渦巻腕のトレーサーとして使用することができれば他にも利点がある。巨大分子雲よりも対象天体が1桁程度多くなることが期待でき、個々の天体の同定や距離測定が可能だからである。例えば、M31 の観測では2000 を超えるセフィイドが発見されている (Kodric et al.2013)。このうち、約150 個はタイプIIセフィイドであり、渦巻腕への集中は見られないが、それ以外は渦巻状の腕に集中していることが分かっている。したがって、天の川銀河でもセフィイドの3次元分布から渦巻腕を描き出せることが期待できる。Dambis et al.(2015) は天の川銀河で565 天体の古典的セフィイドの空間分布を解析することによって、4つの渦巻腕を断片的に同定した (図13)。これらの渦巻腕に対するフィッティングの結果は Reid (2014, 2019) の結果と比較しても矛盾しない。しかしながら、やはり星の分布は銀河回転方向に幅があり明確な渦巻腕として列をなしているわけではない。セフィイド型変光星は若い星ではあるが約100Myrの時間が経過しているため、形成時の速度分散によって位置がばらついてしまった可能性もある。速度分散が十分にランダムならば、多数の恒星について調べることで精度よく腕のパラメーターを決定できる。そのためには星の数が重要である。

散開星団の中でも若い種族は腕のトレーサーになると考えられる。散開星団とは同時に生成された恒星が集団を形成する天体である。散開星団は種族Iの代表的な天体で、銀河面に集中した分布をしている。いくつかの星団は散開星団を生成した巨大分子雲に埋め込まれていることがあり、このような星団を embedded clusters と呼ぶ。星団なので、それを構成する恒星についていくつかの方法で距離を求めることができ、運動学的距離よりも信頼性が高い距離を得ることができる。星団に存在している星に対して赤外線の色を観測して同程度の赤化を受けている天体をその星団の構成天体であると同定できる。この点に着目し、Camargo et al.(2015) は embedded clusters の3次元分布を用いて腕構造を求めた。この研究は先行研究の結果を支持している。得られた embedded cluster の分布は thin disk 内にあり、先行研究によって示されている渦巻腕に沿っていることがわかった。

最後に Spitzer/GLIMPSE Survey から得られた天の川銀河の想像図を図14に示す。ここまでで紹介した方法は、いずれも、基本的には個々の天体までの距離を求め、その3次元分布から渦巻腕を描き出そうとしてきた。しかし、統計的手法を用いることでそれ以外の方法でも渦巻腕の構造を調べることは可能である。地球から各方向に沿って検出される星をすべて合算した場合、各渦巻腕の接線方向で、腕を通る視線の経路長が長くなり、検出される星の数が増加し、その方向での積分強度が大きくなる。Spitzer は赤外線の観測を行っているため、星間減光の影響を受けにくい。実際、天の川銀河で最も減光の大きい場所ではVバンドで30等の減光を受けるが Spitzer の $3.6\mu\text{m}$ では星間減光が1.5等程度まで小さくなる。そのため、銀河の反対側まで星の数を損なうことなく観測が可能である。ただし、この絵はあくまで「印象絵」であるのでデータをもとに書かれてはいるが注意が必要である。

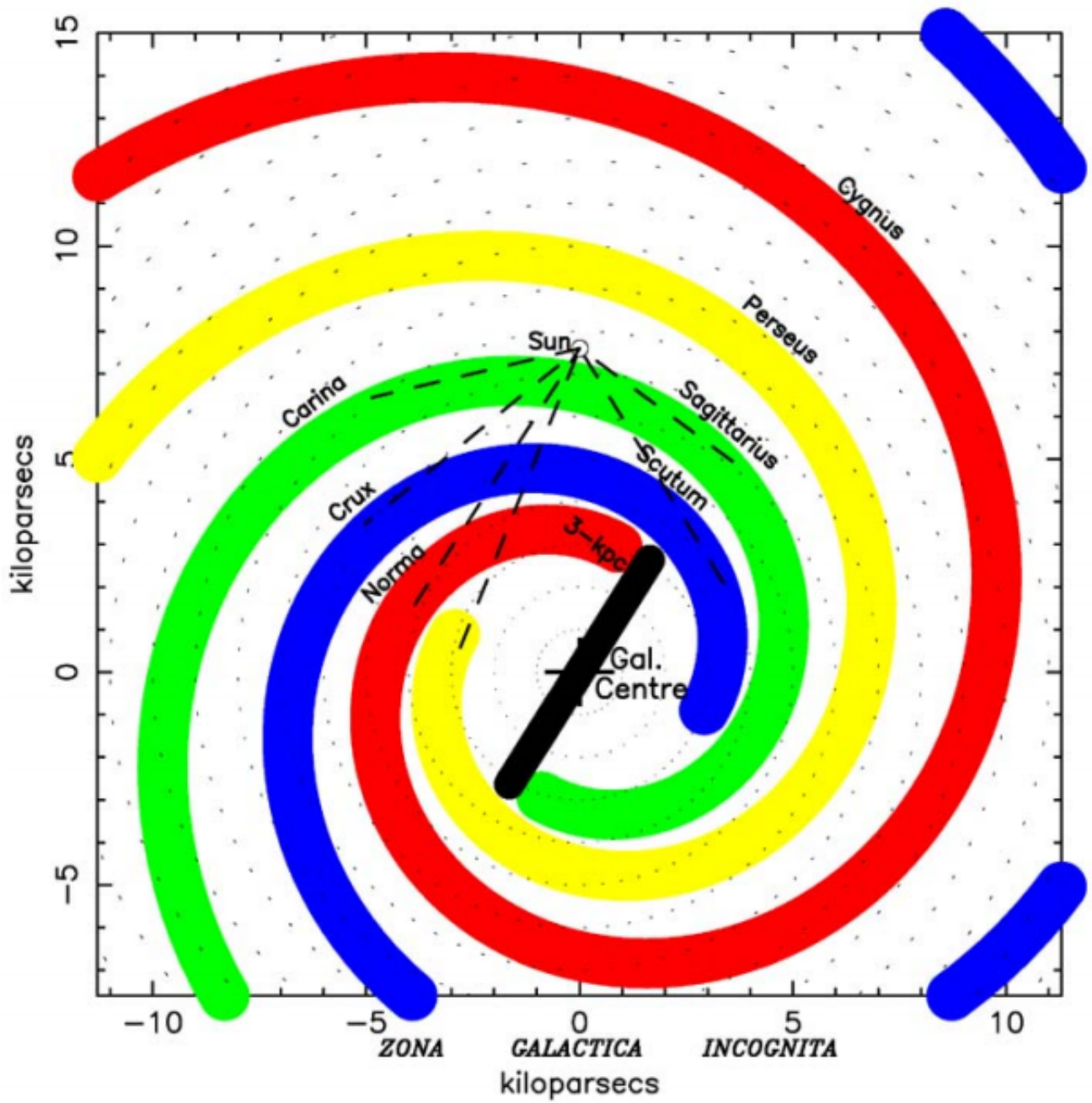


図 11 観測より得られた運動学的距離から構築された天の川銀河のモデル。破線は、ガス、ダスト、星の観測から得られた実際の腕の接線を示す。右端にある 2 つの青い腕のセグメントは、Crux Scutum 腕の続きである。Vallée (2008) より引用。

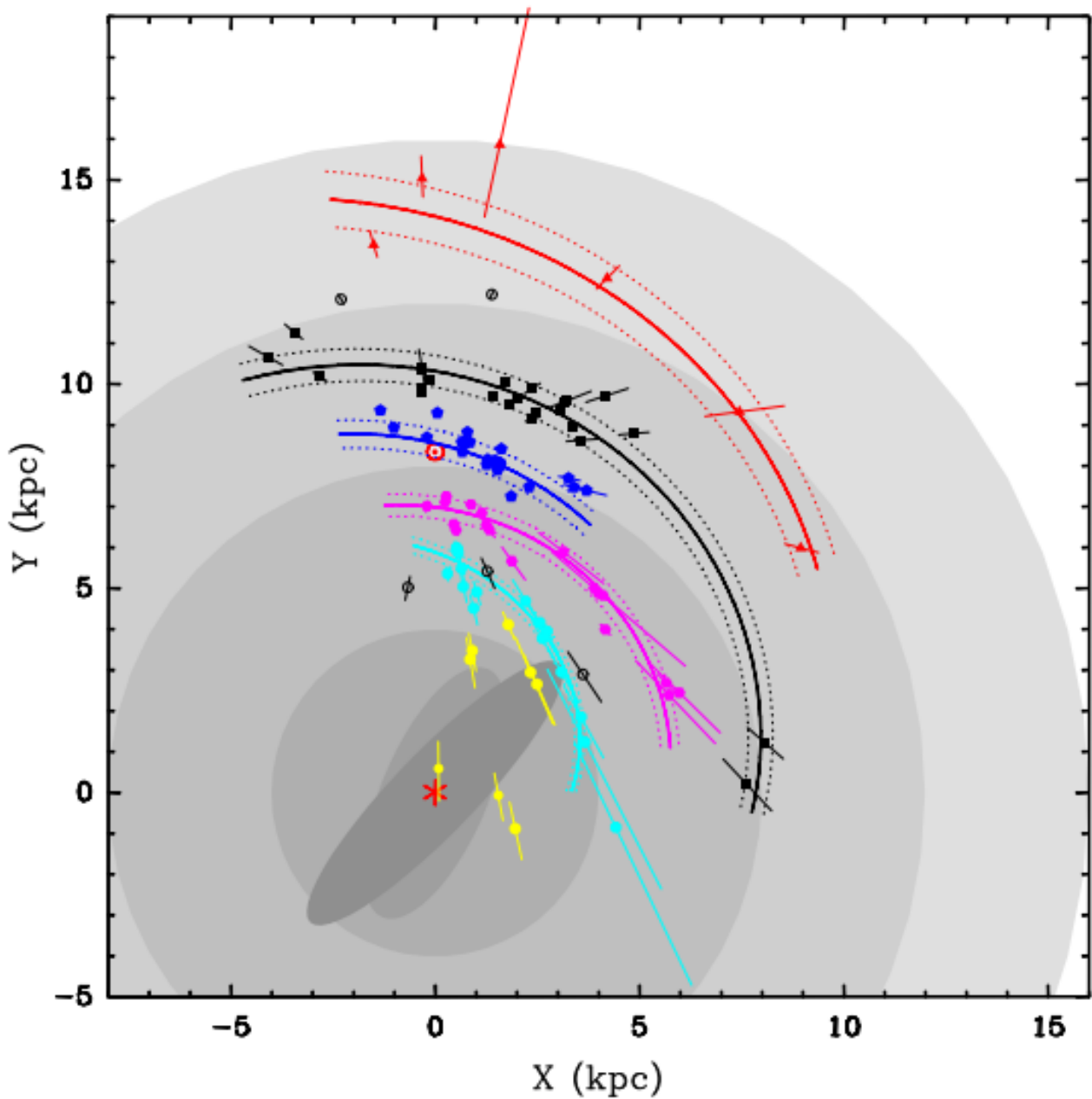


図12 VLBA、VERA、EVNで測定した三角視差による高質量星形成領域(HMSFR)の位置を示す天の川銀河の平面図。縦横の座標は、銀河中心(赤色アスタリスク)を原点(0,0)、太陽(赤い太陽記号)位置を(0,8.34)としたもの。バルジ内にある天体を黄色、スキュータム腕をシアン、サジタリウス腕をマゼンタ、ローカル腕(オリオン腕)を青、ペルセウス腕を黒、アウター腕を赤で示した。白丸は、属する腕が決められなかった天体を示す。各プロットに附された直線は距離のエラーバーを表すが、プロットの記号よりも小さい場合は形式上表示していない。灰色に着色した領域は、楕円形の部分が銀河棒領域として提唱されている2つの異なるモデルのそれぞれを表し、円は銀河中心から等距離以内の範囲を表す。実線の曲線は、対数周期螺旋によってフィットした渦巻腕の中心をトレースする。この図では、天の川銀河の回転は時計回りである。Reid et al.(2014)より引用。

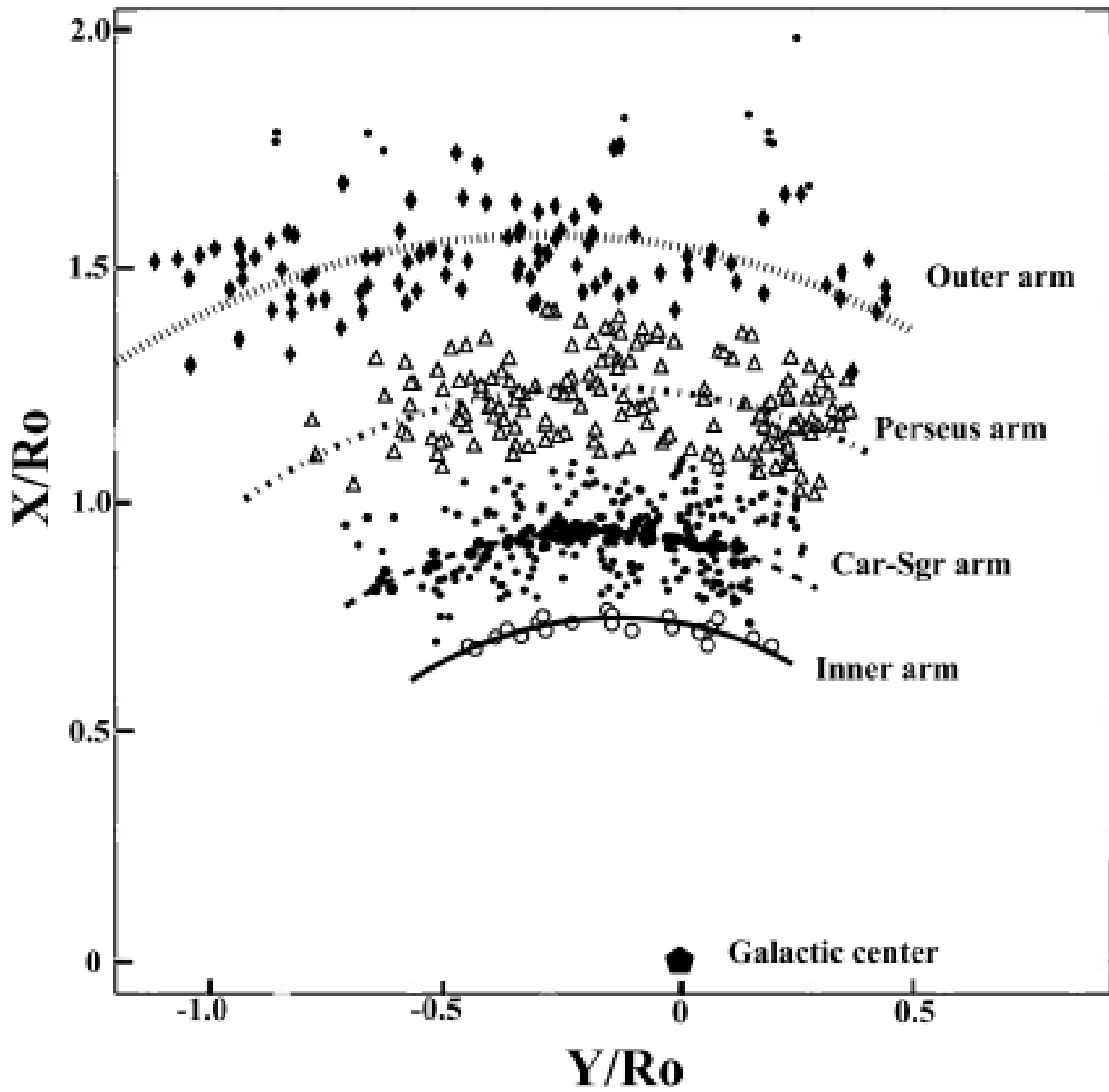


図 13 銀河面に投影された渦巻腕の位置。スキュータム腕、サジタリウス腕、ペルセウス腕、アウター腕に属する星は、それぞれ白丸、黒丸、三角形、ひし形で示されている。Dambis et al.(2015) より引用。

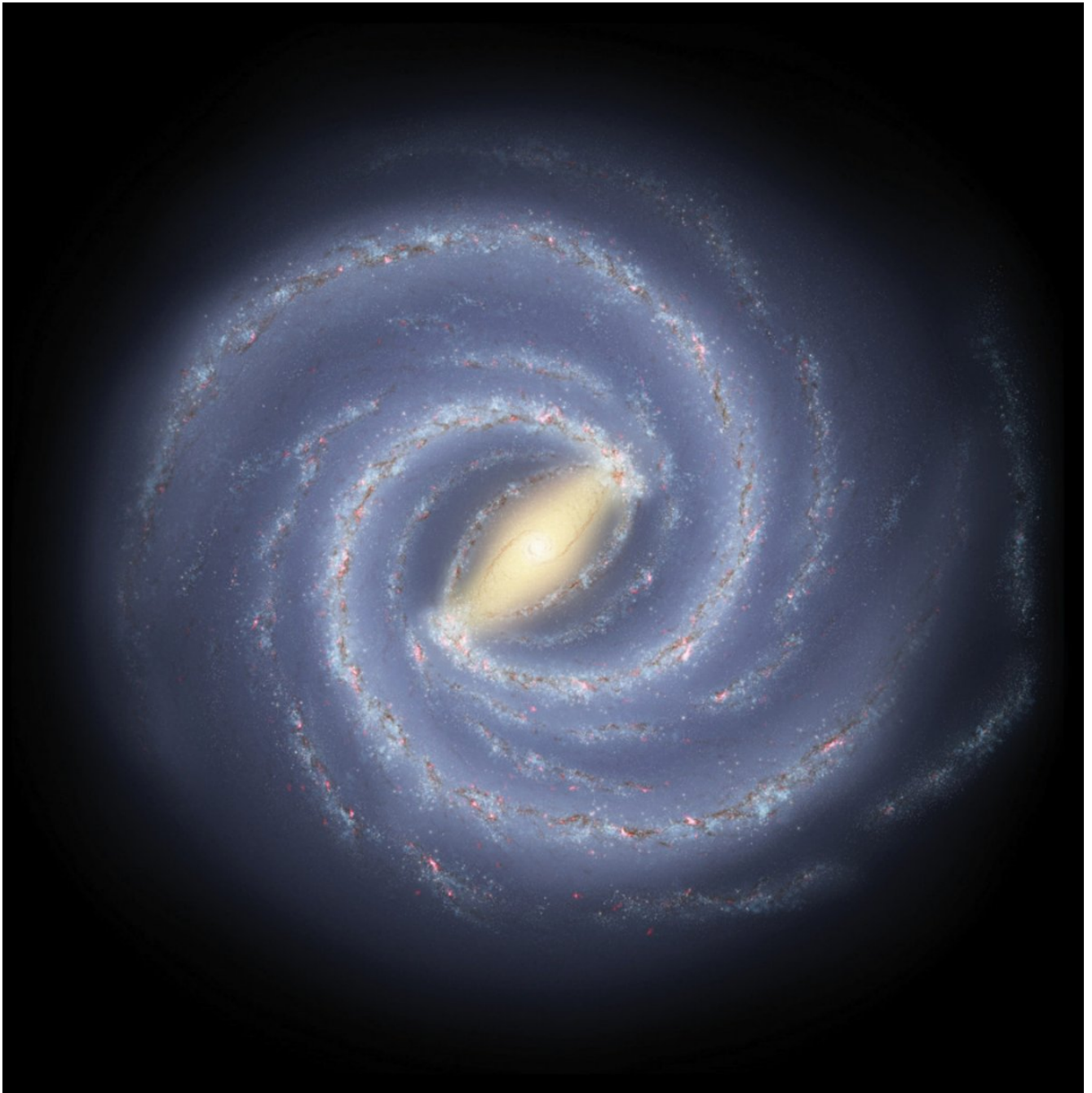


図 14 Robert Hurt (Spitzer science Center) による Spitzer/GLIMPSE Survey のデータを用いた、天の川銀河の想像図。

第 II 部

長周期ミラ型変光星を用いた天の川銀河構造

3 導入

天の川銀河のすべての構造はいまだその全貌は明らかにされていない。それは我々の住む太陽系が、天の川銀河の中に存在してしまっているため、その全貌を直接をみることは不可能だからである。その全貌を調べるには個々の天体までの距離を計測し、その三次元分布を求めるしかない。その一方で、天の川銀河は銀河の詳細な三次元構造が分かる現在唯一の銀河であるといつてよい。天の川銀河の構造をよく知ることは天文学において最も重要な研究であるといつてよい。一方で、天の川にあるすべての天体は多すぎるため、一つ一つの天体の距離を求めて行くのは時間がかかり、現実的ではない。多くの研究によって大まかな描像は得られ、例えば、腕構造やバルジ、ハローなどが存在していることは分かっている。現在はより詳細な構造を調べるために、その特徴的な構造によく付随し、なおかつ、その構造をトレースする天体の分布を知ることが主流である。例えば、銀河の腕構造を調べるならば、まず HI ガスと星形成領域の分布を調べるのが適している。Kerr(1962) では最初の HI ガスの分布が得られ、現在もその観測結果をもとに腕構造の分布のモデルが構築されている。ただ一方で、天の川銀河の構成要素はガスと星であるため、ガスだけでその分布をすべて把握するだけでなく星の構造を調べることも重要である。星の分布として腕のトレーサーとなるのはセフィイド型変光星と *embed cluster* である。どちらの星も質量が重く、誕生してからの時間が大きく経過しておらず、実際のタイムスケールとして ~ 100 Myr 程度である。一方でこれらの天体は一般的に可視光によって観測が行われるため、現在では ~ 3 kpc 程度の範囲でしか分布が得られていない。別の例として、バルジでは異なった種類のトレーサーが用いられる。バルジは比較的古い構造であり、年老いた星が構成要素になっていて、その代表例はミラ型変光星とレッドクランプ星である (e.g, Weiland et al.1994; López-Corredoira et al.2007)。レッドクランプ星はその星でいられる期間が短いがミラ型変光星はそれよりも長い期間をミラ型変光星でいられるため、天体数が多い。Matsunaga et al.(2005) や Catchpole et al.(2016) ではミラ型変光星を用いて、バルジの構造を研究している。

天の川銀河の構造を研究することにおいて問題になることはいくつかあるが、トレーサーの絶対数、星間減光の二つが主要な問題として挙げられる。トレーサーの数の問題は、そもそも距離を精度よく決められる天体が限られていることにも起因しているが、特に腕構造などは若い天体しかトレーサーになりえないために、その数は他の星と比べてより少なくなる傾向がある。また、星間減光も影響を及ぼす。可視光で観測される天体は、特に銀河面、銀河中心方向において観測可能な範囲が狭くなってしまふ。この二つの影響によって腕構造の解明は星の生成工場であり銀河の進化研究において最も重要であるにもかかわらず、現在も完全には解明されていない。そのため、遠方でも距離決定が可能な腕構造のトレーサーを増やすことが重要である。星間減光が強く影響する銀河面を遠くまで見通すことができるのは赤外線である。そのため、私はミラ型変光星に注目をした。ミラ型変光星は赤外線で見えるため、銀河の反対側まで観測可能である。では晩期型星であるミラ型変光星は腕構造のトレーサー足りえるか？ミラ型変光星は初期質量 $1\sim 8M_{\odot}$ の星が進化する星である。これらの中でも重い質量の星は腕構造付近に存在していると考えられるが、重要なことはその重い質量の星を選択的に観測可能かどうかである。そのカギとなるミラ型変光星の特徴が周期-質量関係である (Feast Whitelock 2000; Feast 2009)。この関係は緩やかではあるものの、周期が長くなればその初期質量は大きくなると考えられる。周期が 300 日程度で年齢 ~ 7 Gyr に相当し、400 日程度で ~ 3 Gyr、それよりも周期が長くな

ればその年齢も若くなっていく(いわゆる OH/IR 星と呼ばれる星もこれに該当する)。要するに、周期の長いミラ型変光星は初期質量の重い天体である。私はこれら周期の長いミラ型変光星が腕構造のトレーサーとなりえるのではないかと考えた。

鹿児島大学 1m 望遠鏡では 2006 年から近赤外線を用いてミラ型変光星のモニタリング観測を行ってきた。IRAS2 色図を用いて周期の長いミラ型変光星の候補を選択し、ライトカーブを取得した。また、従来のミラ型変光星の距離決定方法では長周期ミラ型変光星は正確な距離決定ができないことが分かった。そのため私はミラ型変光星の距離決定方法について見直し、より精度の高い方法を考案した。また、この方法を用いて得られた天の川銀河内の 3 次元マップを用いてミラ型変光星が腕構造のトレーサー足りえるかどうかについて議論した。

3.1 天体選出

天の川銀河で長周期ミラ型変光星を効率的に観測を行うため、候補星を選出する必要がある。ミラ型変光星は 100 日以上長い周期を持ち、ミラ型変光星の進化段階である AGB 星は銀河内では確認できただけでも 10 万個程度ある。そのため、これらの中から長周期ミラ型変光星を選択的に観測する方法を考えなければならぬ。そこで、ミラ型変光星の質量放出から考察される、質量に対する仮説を立てる。白色矮星はチャンドラセカール質量の $1.4M_{\odot}$ までしか成長できない。初期質量の小さい天体は質量放出率が大きくなくても外層の質量を捨てることは可能であるが、質量が重い星は大きな質量を捨てなければならない。そのため、質量の重いミラ型変光星ほど質量放出率が高くなるはずである。質量放出率が高くなると、星間空間に放出した特定のガスの温度が下がり凝結することでダストになる。そうすると、星は星周ダストと呼ばれる星周構造を持つことになる。星周ダストは星の色を赤化し、質量の重い天体ほど 2 色図上で赤くなると予想される。そこで、赤化された天体を選択的に選出するために中間赤外線 IRAS の $12\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ の観測を用いて 2 色図をつくる。これは IRAS2 色図と呼ばれるもので、天体ごとの赤外線帯の放射強度の比を図上の領域で分類分けしている。図 15 には以下で示す選出基準をすべて満たした天体の IRAS2 色図を示した。IRAS2 色図は O-rich 星の星周環境の進化を反映していて、右上に進めば進むほど星周環境の進化が進んだ天体である。ミラ型変光星で周期の長い天体は質量が重いため、ダストの放出量が多くなると予想される。そのため周期の長いミラ型変光星は IIIa と IIIb 領域に多く存在していると予想される。選出に用いた基準は以下のとおりである。1) Dec $> -25^{\circ}$ 以上に位置している天体。この基準はモニタリング観測を行う望遠鏡が鹿児島 (北緯 32.5°) に位置しているためである。そこから十分な観測時間が稼げるような基準である。2) IRAS point source catalog(PSC) のクオリティフラグが 3 の天体。クオリティフラグは、IRAS PSC の観測で S/N が十分良いものを 3、最も悪いものを 1 と定義している。S/N が悪い天体の色は本来の性質を反映していない可能性が高いため、本研究の対象から外す。3) IRAS2 色図上で IIIa、IIIb に所属している天体。以上の基準を満たす約 800 天体をミラ型変光星候補天体として選出した。本論文ではこの中で複数回観測が実施された約 550 天体について報告を行う。

また図 17 には選出天体の $l-b$ 図を示した。多くの天体が低銀緯 ($|l| < 10^{\circ}$) に位置していることが分かる。IRAS 天体は銀河中心方向に多数が集中している。IIIa、IIIb 領域の天体も例外ではなく、その影響を受けているため、銀河中心方向に多くの対象天体がある。 $l = 80^{\circ}$ 付近では天体の数が明らかに減少していることが分かる。この方向には厚い暗黒星雲が存在していて、IRAS 衛星が検出した天体数自体が少なくなっているためである。

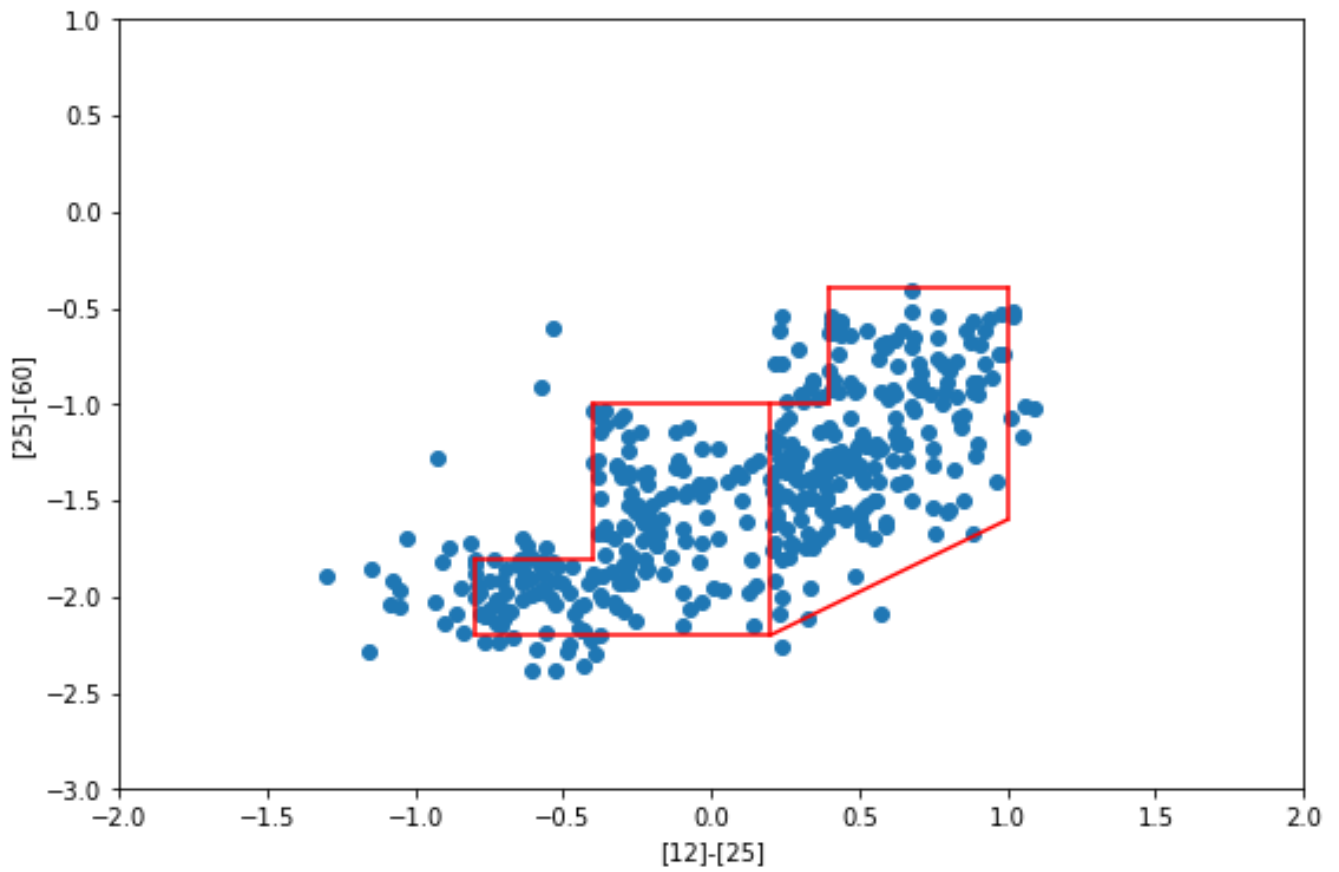


図 15 本研究で選出した 800 天体の IRAS2 色図上での位置。赤い線の内側が IRAS IIIa,IIIb (左 ; IIIa, 右 ; IIIb) 領域に該当する。

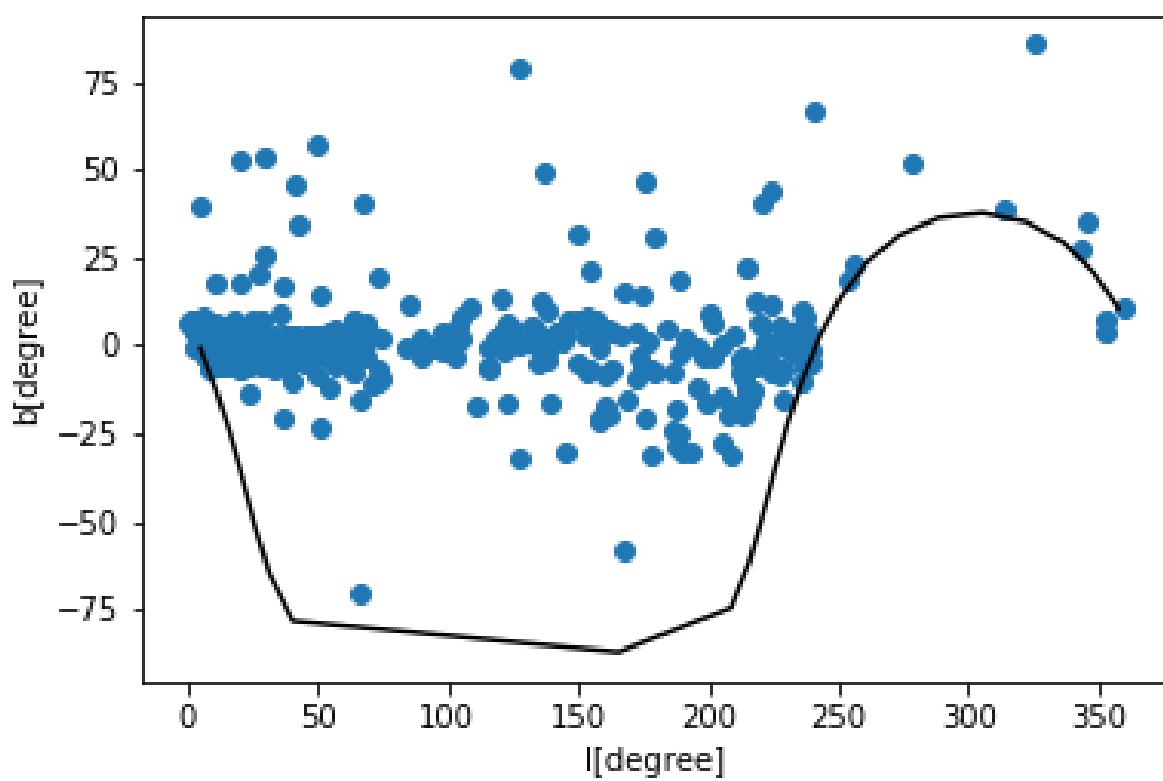


図 16 本研究で選出した 800 天体の LB 図。黒線は $\text{Dec}=-25^\circ$ の線

表 2 1m 望遠鏡

| | | | | | |
|--------|---------|------------------|--------|-------|------------------------------|
| 1m 望遠鏡 | 光学系 | Ritchey-Chretien | 赤外線カメラ | 検出器 | HAWAII アレイ 512×512pixel |
| | 焦点 | カセグレン F12 | | 視野 | 5.4 × 5.4 分角 (0.64 秒角/pixel) |
| | ハルトマン定数 | 0.21 秒角 | | フィルター | J,H,K' |
| | 架台 | 経緯台 | | 限界等級 | J=17.6,H=17,K'=16.3 mag |

4 観測機器とデータ較正

この章では観測に使用した望遠鏡と解析手法について記述する。また、本研究はさまざまな公開アーカイブデータを用いて後の議論などを行っているため、それらの望遠鏡やデータの情報についても記述する。

4.1 鹿児島大学 1m 望遠鏡

本研究で実施したモニタリング観測は鹿児島県薩摩川内市、鹿児島大学入来観測所にある 1m 望遠鏡を用いて行った。観測期間は 2004 年から 2018 年である。鹿児島大学 1m 望遠鏡の緒元を表 2 にまとめた。使用した赤外線カメラは 512×512 の HgCdTe 検出器を搭載しており、視野 5'.38×5'.38 (0".63 pixel scale) である。観測で使用できるフィルタは J(1.25 μ m)、H(1.65 μ m)、K'(2.15 μ m) バンドであり、それぞれの限界等級は 17.6 等、17.0 等、16.3 等である。入来観測所の典型的なシーイングサイズは 1.5" である。

モニタリング観測は IRAS PSC から選出された天体を中心にとらえて行われた。それぞれの観測は 5 回のディザリングを 1 つのセットとし、1~12 秒の積分時間でおこなわれた。観測はバックグラウンドのスカイレベルに合わせて積分時間を調整し、中心に IRAS 天体である目的星、さらに較正に使用する明るい参照星を同じ視野に導入して撮像を行う。このとき、鹿児島大学の赤外線カメラは K' バンドで 6.5 等より明るい天体であればサチュレーションをおこす。そのため、目的星が K' バンドで 6.5 等よりも明るい場合、デフォーカス観測を行う必要がある。デフォーカス観測は望遠鏡の焦点をわざとずらすことによって星の明るさのレベルを下げ、サチュレーションしないようにする方法である。参照星が同じ視野内に存在しない場合、Elias et al.(1982) に掲載されている標準星を別に観測した。目的星が明るい場合、部分減光フィルターを用いて観測を行うことがある。部分減光フィルターとは視野の一部のみを減光して撮像する観測手法(井上 2015) である。部分減光フィルターはデフォーカス観測の問題点を改善するために 2014 年から導入した。このフィルターを用いることで明るい星のみを減光させて撮像することができる。さらに同一視野内の大気の状態は様とみなすことができるため、周りの減光されていない領域に写っている星の中から変光しない星を用いて等級較正をすることが可能である。この手法は天気による影響を受けにくいため明るいミラ型変光星に対して視野内相対測光観測を行うことができる。鹿児島大学が所有している部分減光フィルターは 1/200000、1/5000、1/100 の 3 種類の減光率があり、等級に直すとそれぞれ約 13 等、約 9 等、約 5 等の減光である。本研究では一部の天体に対して 1/5000 部分減光フィルターを用いて観測を行った。井上 (2015) によると 1/5000 部分減光フィルターの減光補正量は J バンドで 9.302 ± 0.029 等、H バンドで 9.485 ± 0.027 等、K' バンドで 9.414 ± 0.025 等である。等級較正についての詳細は測光の章で述べる。

IRAS の位置精度は 30" 程度であるため、私はその付近に存在している赤外線で見つかる明るい天体を探した。表 5 には観測を行った IRAS 天体の近赤外線源の座標 (J2000) を示す。

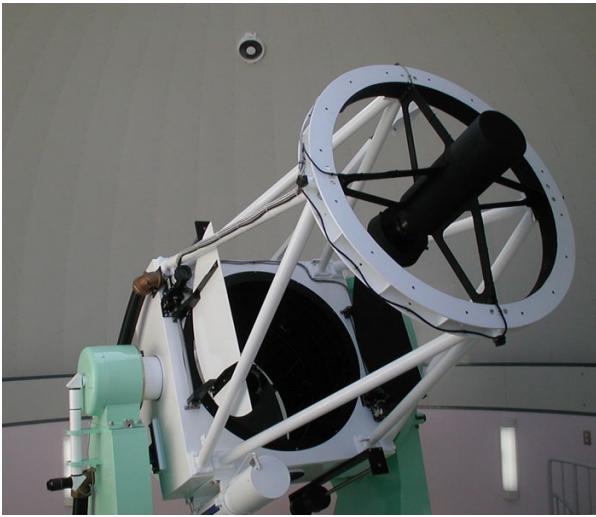


図 17 鹿児島大学 1m 望遠鏡

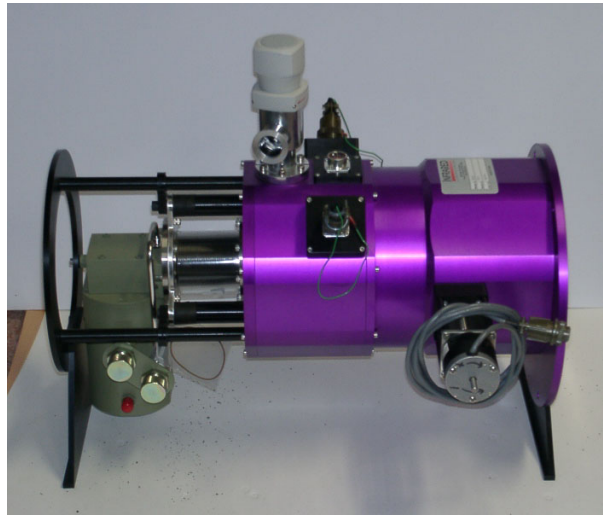


図 18 鹿児島大学赤外線カメラ

4.2 Two Micron All Sky Survey;2MASS

Two Micron All Sky Survey(2MASS) は、1997 年 6 月から 2001 年 2 月の間に、近赤外 J($1.25\mu\text{m}$)、H($1.65\mu\text{m}$)、Ks($2.16\mu\text{m}$) バンドで天球の 99.998% をカバーする 25.4T バイトの生画像データを収集した。赤外線観測アレイ検出器は 1990 年に開発が進み、十分な観測精度が出せるようになると、重要視されたのが掃天観測である。地上から良好な感度でアクセスできる最長波長である $2\mu\text{m}$ 帯で完全かつ信頼性の高いサーベイデータの完成を最終目的とした。星間減光の影響を区別し、星と銀河系外の天体の研究を実施するには、少なくとも 3 つのバンドが必要であり、Ks バンドのほかに、選択されたのが J、H である。主なサイエンス目標は褐色矮星の発見、低質量星（われわれ自身の銀河系においても他銀河においても最も一般的な恒星）の広域サーベイなどが挙げられる。2MASS は、2 つの特別にカスタムされた 1.3 m 赤道儀望遠鏡を使用した。全天の観測を行うために、北半球と南半球どちらにも望遠鏡を設置した。北半球の望遠鏡はアリゾナ州ホプキンス山のホイップル天文台（標高 2306 m）にある。南半球の望遠鏡はチリのセロトロロ山の天文台（標高 2171m）にある。

2MASS カメラには NICMOS3 と呼ばれる 256×256 画素の HgCdTe 検出器を 3 個を搭載している。これらのアレイのピクセルピッチは $40\mu\text{m}$ で、 $0.8\sim 2.5\mu\text{m}$ の波長に感度がある。各カメラ内の 2 つのダイクロイックミラーにより光を分割し、JHK を同時に撮像する。測光精度は約 0.03mag、位置精度は約 100mas である。空の任意の二点間の校正オフセットは、0.02 mag 未満である。2MASS All-Sky Data Release には、空全体をカバーする 4099999 枚の FITS イメージ、4 億 7100 万個の点源カタログおよび Extended Source Catalog と呼ばれる、銀河などの広がった天体のカタログがある。

4.3 WISE

Wide-field Infrared Survey Explorer(WISE) は 2009 年に打ち上げられた、アメリカ航空宇宙局 (NASA) によって開発された赤外線天文衛星である。WISE 衛星は観測波長帯において他の衛星よりもはるかに高い感度を持っていることが特徴である。WISE は地球上では達成が困難である $2\mu\text{m}$ 以降の次世代全天観測装置として計画された。最も類似した以前のミッションである赤外線天文衛星 (IRAS、Neugebauer et al.1984;

Beichman et al.1988) は 1983 年に打ち上げられ、4 バンドで空全体をマッピングした。WISE は、3.4、4.6、12、22 μm を中心とする 4 つの赤外線バンド W1~W4 で空全体をマッピングしている。WISE は、12 μm 帯域で IRAS の 100 倍以上の感度を達成している。

4.4 VERA

VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) は国立天文台によって運用されている日本の VLBI プロジェクトであり口径 20m のパラボラアンテナを水沢局 (岩手県奥州市水沢区)、入来局 (鹿児島県薩摩川内市入来町)、小笠原局 (東京都小笠原村父島)、石垣島局 (沖縄県石垣市) の 4 局に設置し運用している。日本国内に設置された 4 つのアンテナからなり、最大基線長は水沢-石垣島間の 2270 km で、最小基線長は入来石垣島間の 1019 km である。2 ビーム機構により対象天体と参照電波源を同時に観測することができ、これによる位相補償で 10 μas の年周視差決定精度を実現している。現在、主に天の川銀河の三次元構造の解明を目的として、ミラ型変光星や大質量・中小質量星形成領域のアstrometryが行われている。

4.5 Cosmic Background Explorer;COBE

Cosmic Background Explorer(COBE) は宇宙背景放射を主たる観測対象として打ち上げられた天文観測衛星である。DIRBE プロジェクトでは 1.25 μm から 240 μm で赤外線の空の輝度マップが得られた。7°を超える角度スケールで宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルと異方性を正確に測定し、拡散宇宙赤外線背景の探査を行う 3 つの科学機器が搭載されている。ミッションの目標は、これらの測定を物理学のモデルによって説明されている限界まで行うことである。3 年間の掃天観測の副産物として、繰り返し観測が行われた天体を解析して変光星をまとめた DIRBE 3 years catalog がある。

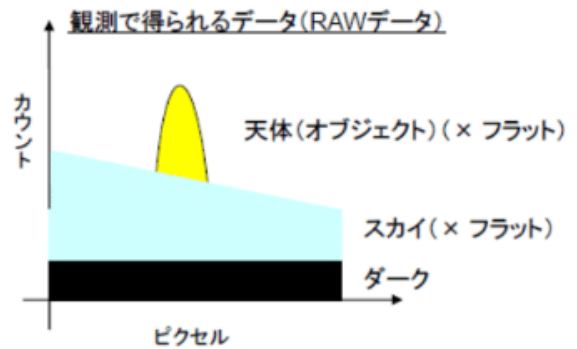
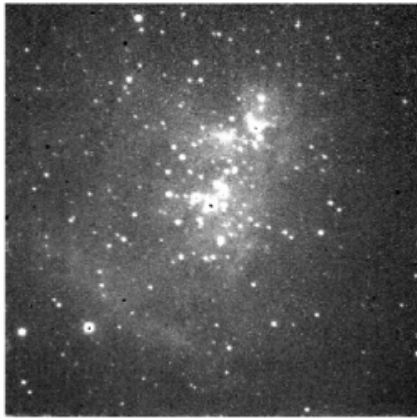


図 19 左図；鹿児島大学 1m 望遠鏡によって取得された K バンドの生画像データ。右図；生画像に存在するノイズやムラの模式図

4.6 データ較正

鹿児島大学で撮像された生画像データ (図 19 左) は IRAF を用いた鹿児島大学 1m 望遠鏡グループで開発された一次処理パイプラインで一次処理を行う (山下 2015)。一般に、天体の撮像データには本来必要な天体の光以外の様々な放射や機械的なムラが同時に存在している (図 19 右)。これらは天体データ上ではノイズとなるので、より質の良いデータを取得するために、1 次処理と呼ばれるいくつかの作業によってこれらの影響を除去していく。一次処理が施された画像に写っている星の明るさは較正されていないので、画像に写っている既知の星の明るさを用いて較正する必要がある。本研究ではこの測光を IRAF によって行った。また、天体の撮像方法によって異なる測光方法を用いているので、その説明をこの章で行う。

4.6.1 一次処理

鹿児島大学 1m 望遠鏡の観測で得られる画像データは、2 次元配列 (512 × 512 ピクセル) のデジタルデータである。2 次元配列には、光の強度に相当する数値が格納されている。また、ヘッダーと呼ばれる観測時刻や観測装置の情報なども決められたフォーマットで記録されている。これらの画像データと観測条件などの情報を 1 つのファイルとして扱える規格として、FITS (The Flexible Image Transport System) が用いられている。データ整約に使用するソフトウェアは、鹿児島大学 1m グループが開発した一次処理パイプラインである。このパイプラインに用いられているソフトウェアは IRAF と FITS ブラウザ「SAOImage DS9 (以下：DS9)」、天体検出測光ソフトウェア「Source Extractor (以下：SExtractor)」、「OPM」である。一次処理の手順は以下に示す 5 つのステップで構成される。

1) ダーク引き；生画像には検出器に起因する暗電流とよばれる天体の光とは無関係なカウントが上乗せされている。暗電流は、熱によって励起された電子によって電流が流れる現象である。そのため、暗電流の影響を除去するために、生画像からダーク画像を差し引いた。ダーク画像とは検出器に一切の光を与えない状態にして撮像した画像のことである。一次処理に使用するダーク画像は、観測されたターゲットと同じ夜に、観測と同じ露出時間で 10 枚のダーク画像を撮像し、それらを 3σ クリッピングを使用して重ねて作成した。2014 年以降は機器のトラブルによりダーク画像を取得していない。そのため、ダーク補正を行っていないことになる

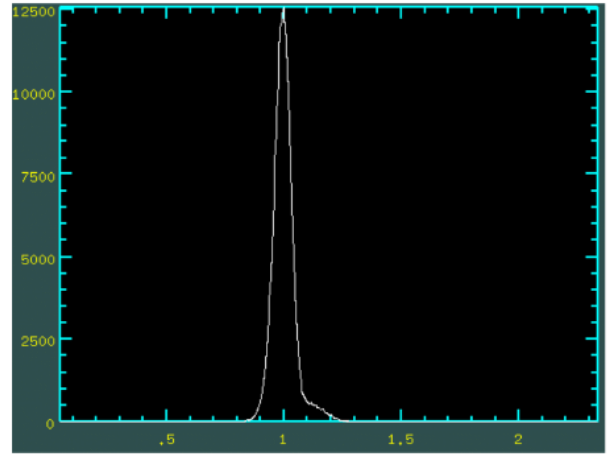
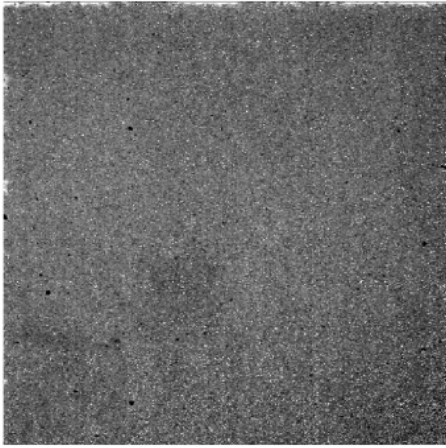


図 20 左図；規格化されたフラット画像。右図；横軸に強度（カウント値）、縦軸にピクセル個数を取り作成した右図の規格化されたフラット画像のヒストグラム。

が、大気放射の成分を取り除くスカイ引きの処理において、同時に暗電流も取り除かれるので実質的にダーク引きは行われている。

2) フラット割り；次に、フラット画像を使用して生画像を規格化し、検出器の感度の不均一性を補正した。取得した直後の画像は検出器の量子効率の非一様性と光学系の非一様性による感度ムラを持っているのでこのムラを補正する。補正にはフラット画像（図 20 左）を用いる。フラット画像は望遠鏡に一樣な光を入射させて取得した画像の平均が 1 となるように規格化した画像である。フラット画像の作成方法にはトワイライトフラットとドームフラットと呼ばれる 2 つの手法がある。トワイライトフラットは、明け方もしくは夕方の方角で星が写っていない領域に対して画像取得を行う。ドームフラットは望遠鏡のトップリングに取り付けられたライトから観測ドーム内に備え付けてあるフラット補正板に光を照射し、その反射光をカメラに入射させることで、フラット画像を取得する。2003 年から 2012 年まではトワイライトフラットを使用して、フラット画像を取得した。2013 年からは、ドームフラットに移行した。どちらも毎週 10～30 枚の画像を取得し、特にドームフラットはオン-フラットとオフ-フラットと呼ばれる光源が点灯時と非点灯時の画像を取得した。これらの画像は各ピクセルごとに中央値を取り、フラットオン画像とフラットオフ画像で引き算を行う。これは、暗電流成分を取り除くためである。暗電流成分を除去した画像は、画素が持つ感度ムラの成分のみが含まれる。その後、この画像のカウント値の平均を取り、各ピクセルを平均値で割り算することで 1 に規格化する（図 20 右）。ここまでの処理が規格化されたフラット画像の作成である。最後に規格化されたフラット画像で天体画像の割り算を行うことで、天体の画像の感度ムラを補正することが出来る。

3) スカイ引き；空の背景放射による固定パターンを減らすために、スカイ引きを実行した。生画像には空の放射によるカウントが乗っていて、これらは天体の放射ではないため取り除く必要がある。そのため、スカイ画像（図 21 左）と呼ばれる空の放射のみの画像を作成し、生画像から差し引く。オンフォーカス画像については、中央値の組み合わせ画像（図 21 右）であるセルフスカイ画像を差し引く。中央値で重ね合わせを行うことで重ね合わせをする前の画像に天体が写り込んでしまっても、その影響を取り除くことができる。デフォーカス画像については、スカイ画像はターゲットの視野に隣接する星が少ない視野を個別に観測し、それらの中央値をセルフスカイ画像と同じ手順の手法を使用して作成した。

4) 重ね合わせ；ディザリングして取得され、1～3 の処理が施された画像を重ね合わせる。赤外線検出器にはバッドピクセルと呼ばれる、感度がないピクセルが検出器上にいくつかある。これらの上に天体の光が乗っ

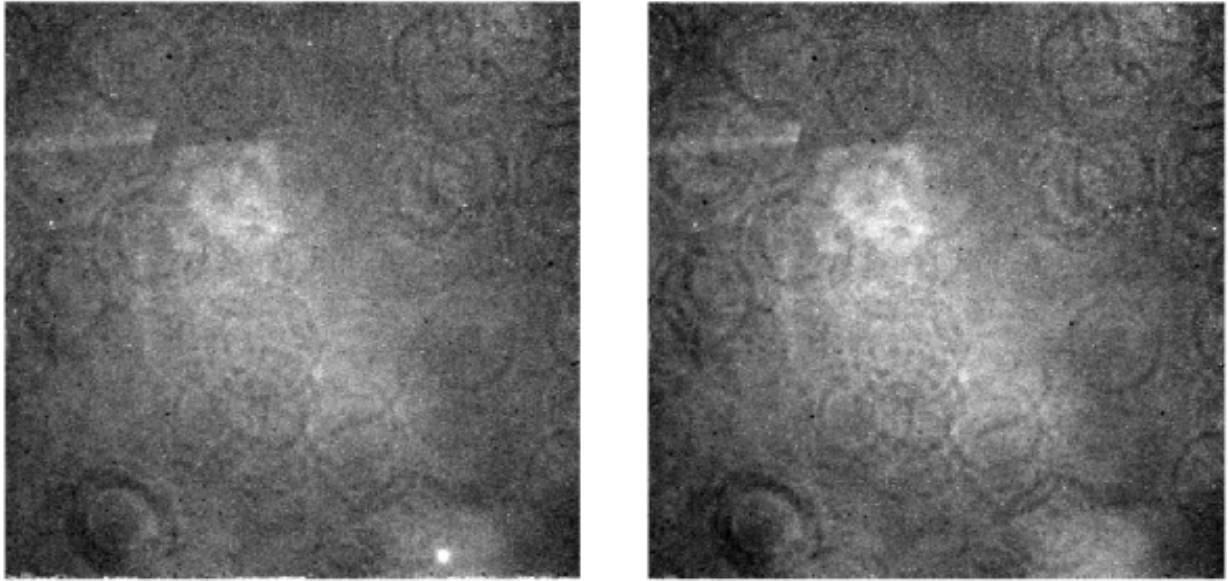


図 21 左；中央値で重ね合わせる前のスカイ画像 右；中央値で重ね合わせした後のスカイ画像

た場合、総光量を正しく計測できないため、この影響を除く必要がある。そこで、検出器上での天体の位置を少しずつ変えながら撮像を行うディザリング観測という手法を用いる。本研究の観測では、ディザリング観測は5点の位置に移動して撮像を行う。ディザリングの移動量は典型的に15秒角である。ディザリングされた画像では天体の位置がずれているため、まず同じ星の論理座標(x,y)を測定する。これらの位置の差を計算し、ずれを補正する。上記の情報に基づいて、IRAFの*imcombine*タスクでそれらを重ね合せた。図22には1から4までの手順を行った画像を示している。この操作によって生画像では見えていなかった暗い天体が現れていることがわかる。

5)World Coordinate System (WCS) 決定；画像処理されたFITS画像は、2次元配列の座標軸がピクセル座標系(論理座標系：X,Y)であるため、そのままでは天球面上の天体の座標を知ることが出来ない。そこで、天体の座標が掲載されているカタログを用いて、位置較正を行う必要がある。検出された星を2MASS PSCと比較することにより、WCSをFITSファイルに挿入した。まず、画像内で検出された星の2MASSカタログ内での対応天体を検索した。同定された星の論理座標と天球上の座標から両者間の変換式を求めた。天体同定および座標変換式の決定は、Tabur (2007)で提案されたOptimistic Pattern Matching (OPM) アルゴリズムに基づいて計算された。

4.6.2 測光

ターゲットの等級を決定するために、IRAFのAPPHOTパッケージを使用して、ターゲットと参照星の開口測光を行った。開口測光とは星の中心から任意の半径を決め、その半径内に存在する強度を足し合わせることで星の強度を計算する。任意の半径は測光担当者ごとの個人差や天体の混み具合、シーイングサイズなどによって変化するものの典型的には星像のFWHMの2倍から2.5倍の半径の大きさである。またこのとき、同一画像内に参照星がある場合、同時に参照星に対しても開口測光を行う。これにより以下の式でまず器械等級が得られる。

$$m_{inst} = -2.5 \log(Flux) + zmag \quad (1)$$

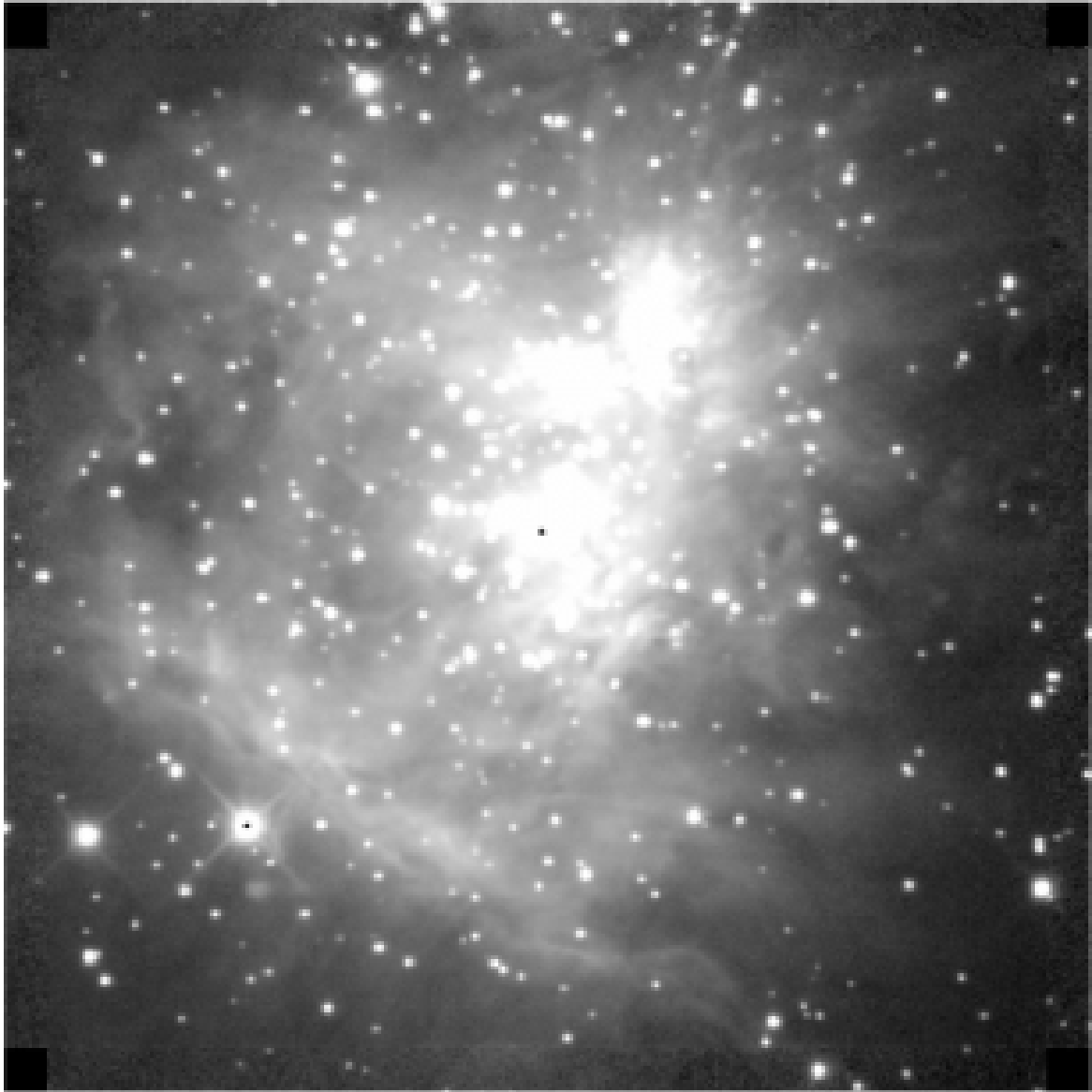


図 22 図 19 左図に対して、手順 1～4 までのリダクションをすべて行った画像

m_{inst} は器械等級、 $zmag$ はいわゆるゼロ点と呼ばれる定数である。このゼロ点を決定することによって目的星の等級を決めることができる。このゼロ点の決定には参照星を用いる。 $zmag$ は以下の式で記述できる。

$$m_{stand} = m_{cat} - zmag \quad (2)$$

このとき、 m_{stand} は参照星の器械等級、 m_{cat} は参照星のカタログ等級であり、本研究では 2MASS PSC よりこれを引用する。

次に等級を較正するための参照星の決定方法を記述する。鹿児島大学 1m 望遠鏡では以下の 3 つ手法で画像が取得されている。

- 通常の観測によって取得されたオンフォーカス画像
- 明るすぎる天体に対してサチュレーションを回避するためのデフォーカス画像

- 部分減光フィルターを用いて取得されたオンフォーカス画像

である。1) 通常の観測によって取得されたオンフォーカス画像では、同一の視野内に存在している参照星を用いて測光を行う。この参照星は時間による変動がない天体である必要がある。しかし、単一の天体の器械等級でこれを調べることはできない。変光していない天体でも観測時の空の状況によって器械等級は変動するからである。そのため、以下の方法を用いて適当な参照星を決定する。まずある時間 t における同一視野内の異なる 2 天体 a 、 b の器械等級 $a(t)$ 、 $b(t)$ の差 $\Delta m(a - b)$ をとる。

$$\Delta m(a - b) = a(t) - b(t) \quad (3)$$

$a(t)$ 、 $b(t)$ は双方の星の見かけの等級 (a_0, b_0) から、観測状況による影響 E だけずれた値である。したがって、

$$a(t) = a_0 + E, \quad b(t) = b_0 + E \quad (4)$$

このとき、観測状況による影響 E は十分に狭い同一視野内では同じであると仮定すると、式 (4) を用いて式 (3) を書き直せば、

$$\Delta m(a - b) = (a_0 + E) - (b_0 + E) = a_0 - b_0 \quad (5)$$

となる。つまり $\Delta m(a - b)$ は同一視野内では、時間によらず一定となる。複数回の観測において双方に明るさの変動がない場合、この値はある一定値を取り続ける。一方で、双方もしくはどちらかが変光星であった場合、この値は時間に対して変動する。このペアを同一視野内に写っている星に対して総当たりで取り、変動がない組み合わせを探した。実際に参照星として決められた星は変動が 0.1 等以下で 10 等以下の明るさの星である。

2) デフォーカス画像では多くの場合、同一視野内に星が写らない。このような場合には、目的星とは別に、標準星と呼ばれる高精度に等級が測定されていてかつ変光しないと分かっている星を撮像する必要がある。このとき、1) の場合と同じように大気の影響を考慮する必要があるが、同一視野内のように標準星が目的星の近くにあるとは限らない。そのため、観測日ごとにエアマス補正式と呼ばれる関係式を求める必要がある。星の光は望遠鏡に届くまでに、地球の大気を通過してくる。このとき、天頂と低高度では大気を通過する距離が異なる。天頂からの角度 (天頂角) を z として、大気が平行平板状とみなせる $z < 60^\circ$ の範囲では大気による減光量 $F(z)$ は $\sec z$ の 1 次式で近似できる。具体的には様々な高度にある標準星を一晩で複数天体撮像し、測光結果から器械等級とカタログ等級の差をとることで、高度による $F(z)$ の変化を求めることができる。

$$F(z) = a \sec z + b \quad (a = \text{const}, b = \text{const}) \quad (6)$$

標準星の器械等級とカタログ等級の差を 1 次式 (6) で最小二乗フィッティングすると、図 23 のようにエアマス補正式と呼ばれる補正式を求めることができる。観測に使用した標準星は Elias et al.(1988) の標準星カタログの天体を使用した。この観測方法は晴天度が非常に重要である。そのため、観測回数が限られてしまう問題があったが部分減光フィルターの導入によりこの問題点が解決された。

3) デフォーカス観測の問題点を改善するために、2014 年から部分減光フィルターを導入した。これは視野の一部分のみを減光することができるフィルターである。これを用いると明るい目的星のみを減光させて撮像することができる (図 24 右)。さらに、同一視野内では大気の状態は様とみなすことができるため、まわりの減光していない領域に写っている星の中から変光しない星を見つけることで、その星を用いて等級較正が可能である。部分減光フィルターを用いて観測することで、天気による影響を受けにくい等級較正方法を用いることができるため、検出器がサチュレーションを起こしてしまうような明るい天体の観測頻度が上がるこ

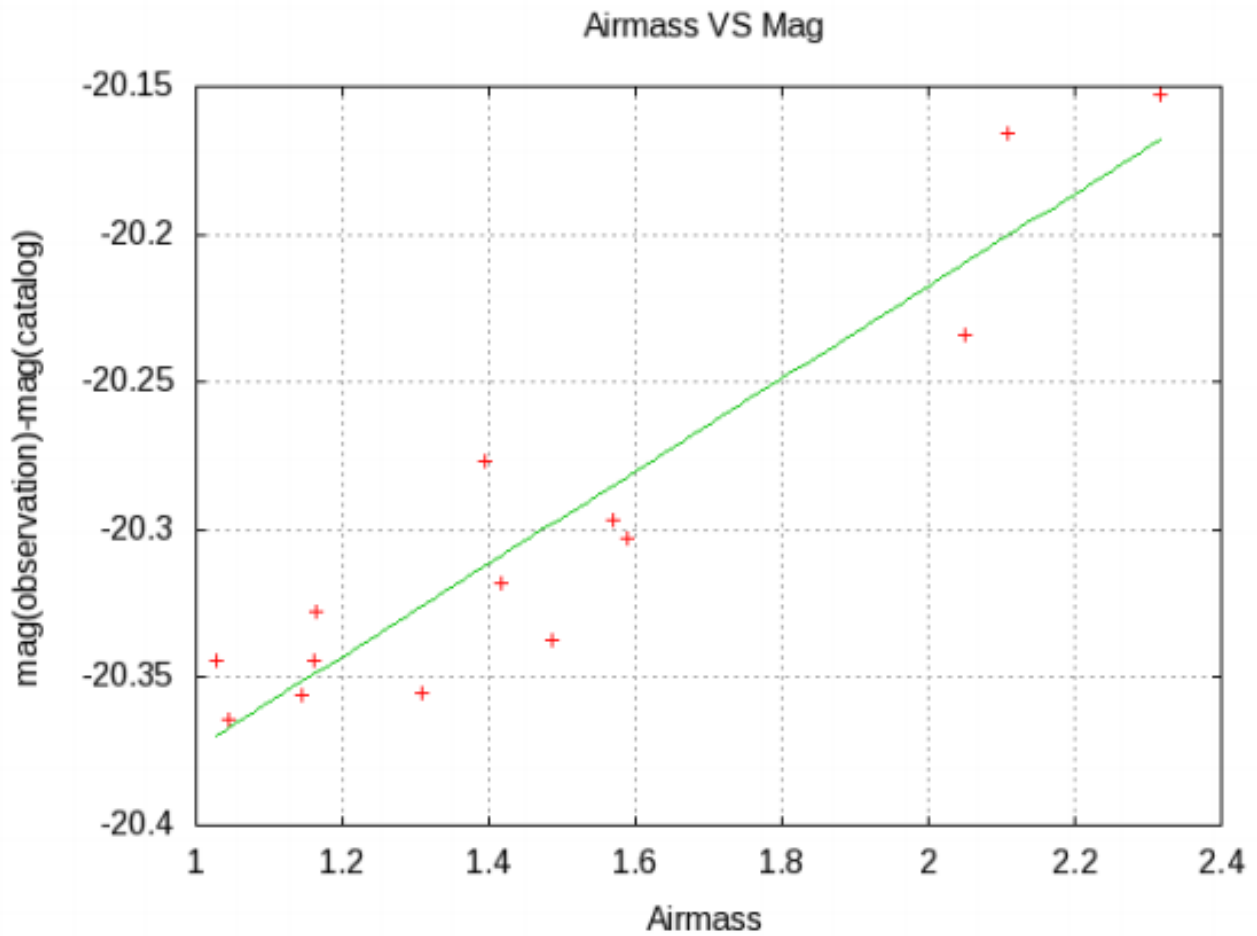


図 23 ある日のエアマス補正式のフィッティング結果。縦軸に参照星の器械等級とカタログ等級の差、横軸にエアマス (sec z) をとる。赤い点はその日に撮像した参照星のプロット、緑の線は赤い点での最小二乗フィッティングの結果を表す。

期待できる。さらに、部分減光フィルターは視野の四隅に減光領域が配置されるように設計されているため、フィルターの向きを変えることで減光領域の場所を 4 つのパターンで変更することができる (図 24 左)。これにより、視野内に参照星となり得る星がより多く入るレイアウトを天体ごとに選ぶことが可能となる。

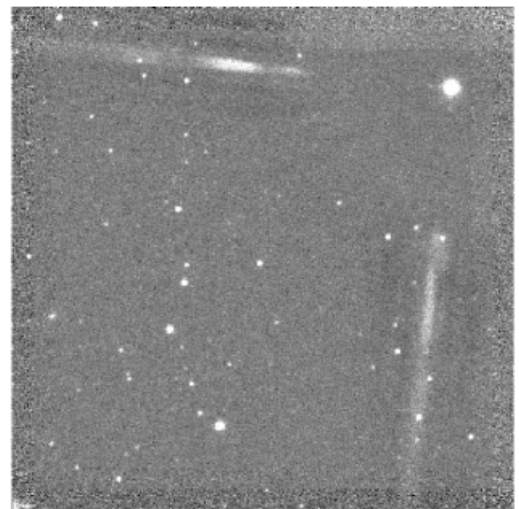
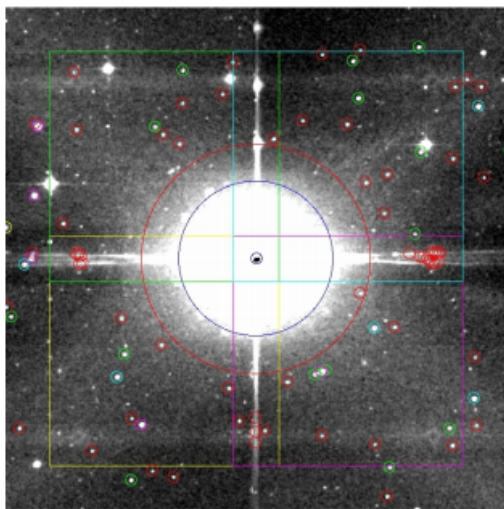


図 24 (左図)SV Peg の 2MASS 画像。これを用いて観測に最も適したレイアウトを決定する。水色、ピンク、黄色、緑の 4 つの四角は観測時の視野を示しており、この中から周りに星が最も多く写るレイアウトを選ぶ。中心の青の円の内側は減光領域、青の円と赤の円の間は減光量が一定でない領域である。(右図)1/5000 部分減光フィルターを用いて観測した SV Peg の近赤外線画像。減光領域が右上に配置されるレイアウトで観測を行った。

5 観測結果

5.1 ライトカーブ

ミラ型変光星の周期を決定するために、各天体の明るさの時系列データに対して周期解析を行った。ミラ型変光星はサイン関数のような光度変化を示すことが経験的に知られているため、一次のフーリエ級数で最小二乗フィッティングを行う。IRAS 18511-1041 の光度曲線を例として図 25 に示す。フィッティングは以下の式で行った。

$$m = B + (A/2)\sin(2\pi t/P + \phi) \quad (7)$$

ここで、 m は等級、 B は正弦波の中心値、 A は peak to peak の振幅、 P は周期、 t は修正ユリウス日 (MJD)、および ϕ は $t = 0$ の位相である。まず 100 日以上に周期の検索範囲を限定し、 P を一日ずつ変化させて RMS 残差が最小になる周期を検索した。ミラ型変光星は経験的ではあるが、100 日以上周期を持つと言われていたからである。そしてこの RMS 残差が最小になる周期に対して、折り返し図を作成し、その周期性について確認を行った (図 25 下)。以降の議論でミラ型変光星の振幅、平均等級という語句はそれぞれ式 (7) の A 、 B に該当する量である。この操作を対象天体 550 天体すべてに対して実施した。

観測した天体はすべてがミラ型変光星とは限らないので、ライトカーブの特徴からミラ型変光星とそれ以外への分類分けを以下の手順と基準に従い行う。

1) 振幅、周期が $\Delta K > 0.4$ 、 $P > 100$ days を満たす天体である。ミラ型変光星の選出基準には明確なものは存在しない。しかし、天の川銀河の長周期変光星の観測から、経験的にミラ型変光星と半規則型変光星を分ける上記の基準が提唱された (Feast & Whitelock 2000)。この基準を満たす天体と、満たさない天体の 2 つに分類分けする。

2) 折り返しのライトカーブから周期性を確認する。ミラ型変光星の周期解析は数学的な関数フィッティングで行われるため、パラメーターは必ず決定される。そのため、変光星でない場合でも観測回数が少ない天体や、観測日がある特定の位相に偏在した場合、変光星と誤認している可能性がある。その可能性を排除するために、人間の目による周期性の確認を行う。この周期性は数学的な基準を設けることが難しいため、以前から一般的な合意がない。この折り返しのライトカーブから著者が非常に周期性が高いと判断した天体を flag1 に分類した。図 25 に示した IRAS 18511-1041 は flag1 に分類された天体であり、きれいな周期性が確認できる。一方で周期性は持っており、1) の基準も満たすがやや周期性がおとる天体がある。このような天体は flag2 とした。ライトカーブの中には観測回数が十分ではない天体がいくつかあった。このような天体は周期が一意に決まらず、いくつかの候補がある状態である。そのため、このような天体は flag3 とした。flag 3 の天体は周期が違う可能性があることに注意する。なお、振幅が $\Delta K > 0.4$ の天体である場合、最も可能性が高かった周期で距離決定を行う。ライトカーブを描いた天体の中には $\Delta K > 0.4$ 、 $P > 100$ days の条件を満たさないものがあつた。このような天体は半規則型変光星、もしくは不規則型変光星と呼ばれるものである。これらの天体は flag4 とする。また、これらの天体は絶対等級がミラ型変光星と異なるため、距離決定は行わない。最後に、脈動型変光星ではない天体を flag5 とした。これらの天体は過去の観測などから天体が判明しているものだけである。これらの天体は Herbig Ae/Be 星、T-Tauri 星、共生星などである。Herbig Ae/Be 星、T-Tauri 星などは若い天体であるが、その星周にダストの円盤構造があり、その円盤構造が星の放射を反射している。この星の放射を反射している円盤が回転することによって、変光を起こすと言われている。IRAS 源はこれらの若い天体が混在する可能性があるため注意する必要がある。もちろんこれらの天体は距離を決定しない。以

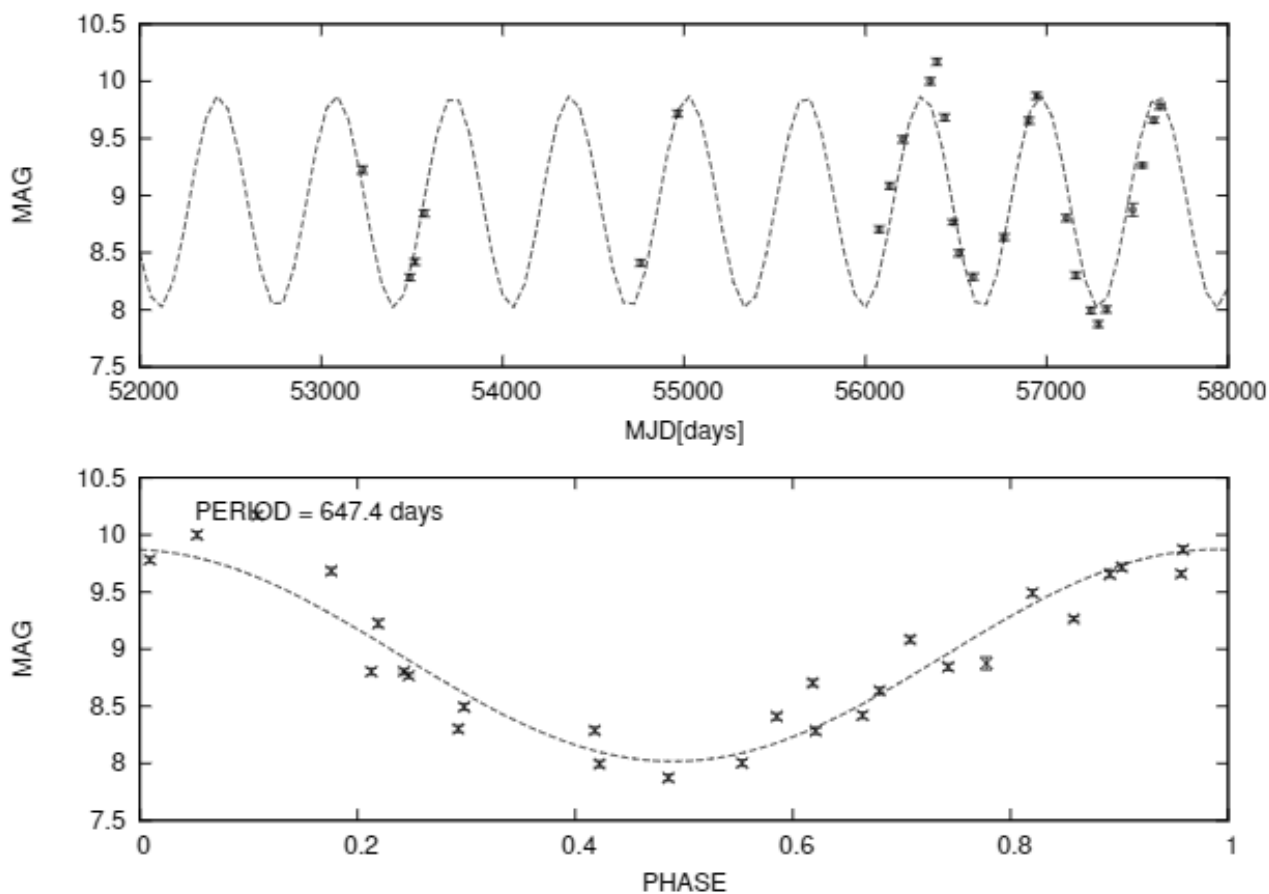


図 25 IRAS 18511-1041 のライトカーブ。下図は折り返しの光度曲線

上の結果、flag1 が 245 天体、flag2 が 86 天体、flag3 が 36 天体、flag4 が 176 天体、flag5 が 22 天体となった。

規則的な周期性を持っていても長い周期で見ると変光周期が変化したり、サイン関数ではなくより高次のフーリエ級数でフィッティングを行うとより高い周期性を示す天体もある。これらの傾向は可視光のライトカーブでよく見られる一方で赤外線ではそこまで多い天体ではない。例えば、IRAS18340-0839 は長いトレンドで見ると平均等級が暗くなっている可能性があるミラ型変光星である (図 26)。この天体は平均等級が 1000 日ごとに約 0.3 等の減光を示している。

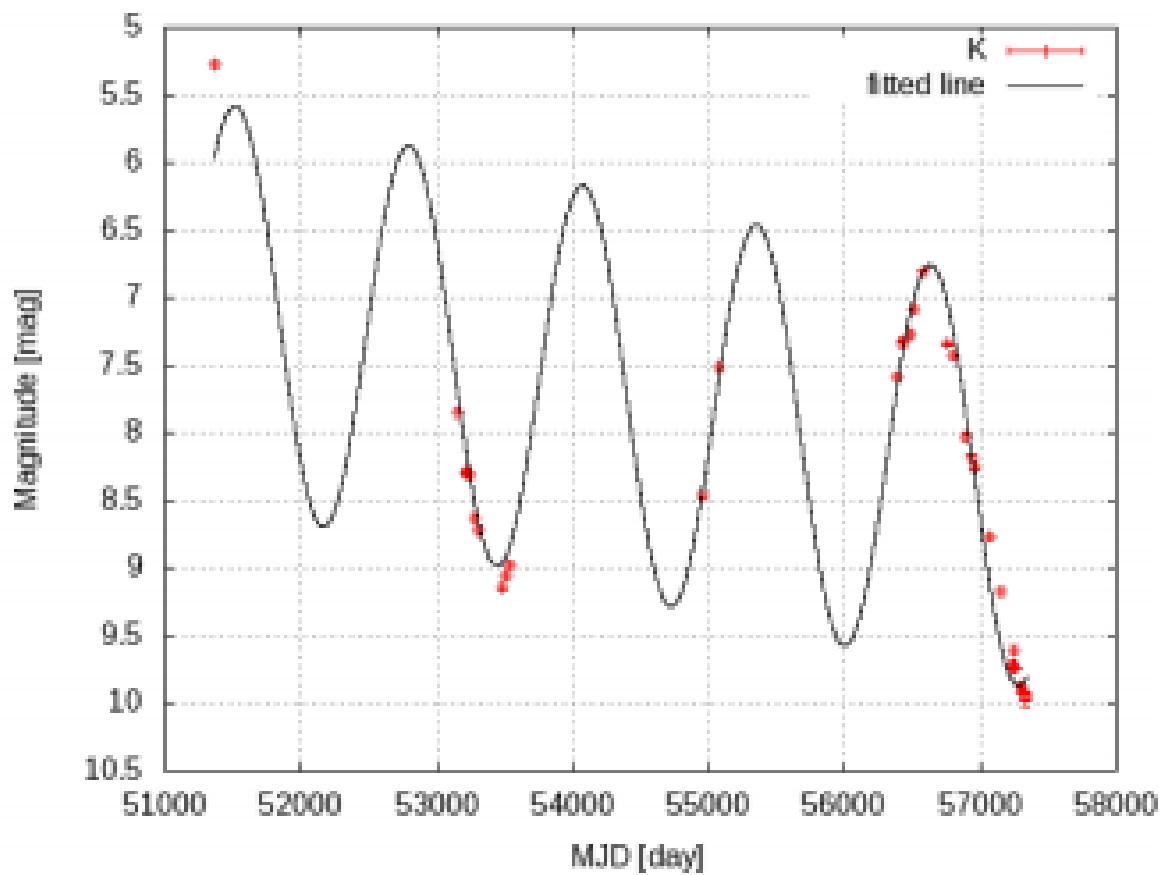


図 26 IRAS 18340-0839 のライトカーブ。

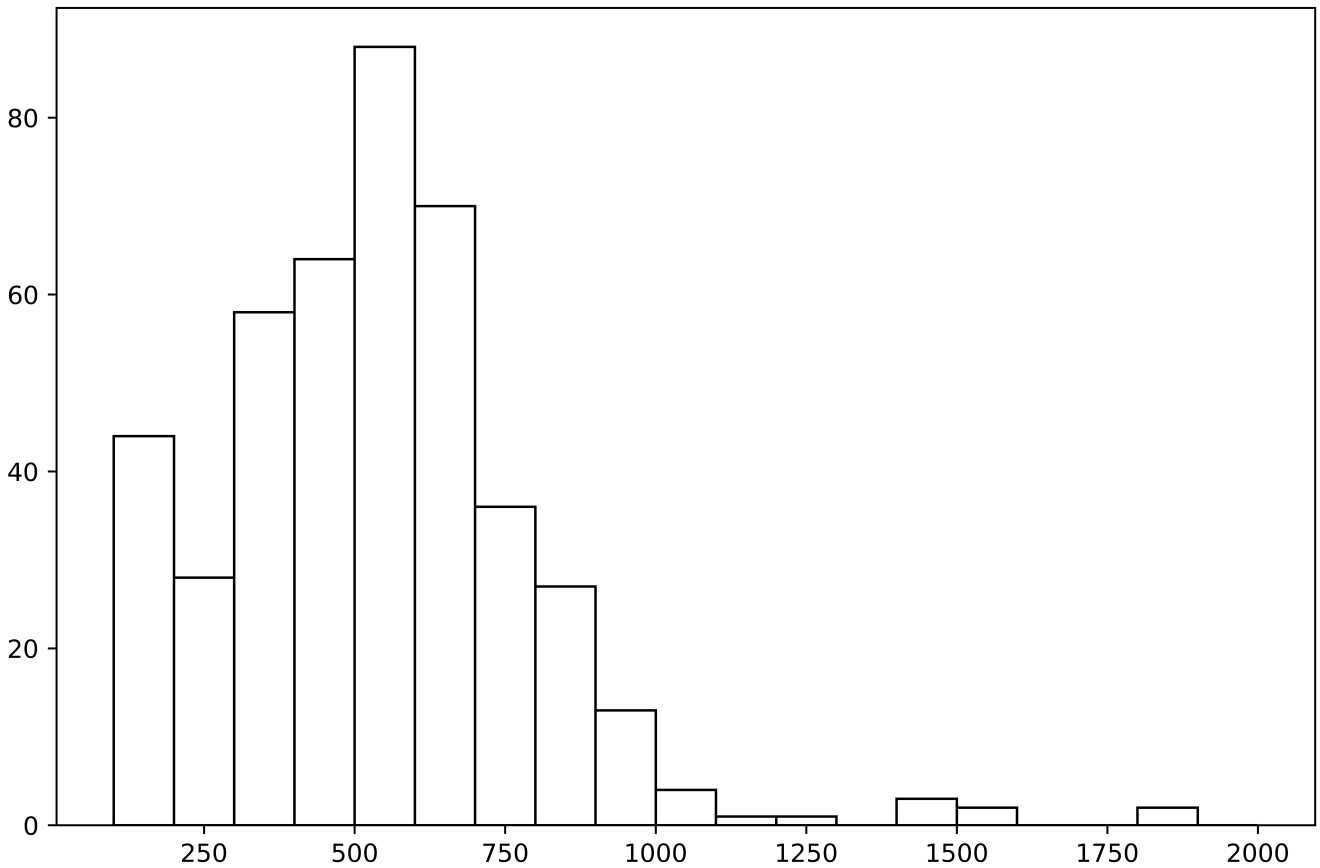


図 27 周期ヒストグラム

5.2 周期分布

前節で flag1~4 と分類された天体の周期ヒストグラムを、図 27 に示した。図 27 は、500~600 日の区間にピークを示している。一般的に、ミラ型変光星の周期ヒストグラムは約 300 日にピークを持つと言われている。また、銀河バルジのミラ型変光星の別の周期分布は Whitelock (1991) に示されている。その対象天体は IRAS PSC から選択されたが、選択基準は本研究と異なり、IRAS2 色図上の II 領域付近から選出している。それらのミラ型変光星の周期分布は、約 400 日にピークを持っている。したがって本研究の対象天体は、典型的なミラ型変光星や Whitelock(1991) の対象天体 (IRAS2 色図の II 領域) よりも長い周期を持つミラ型変光星であることがわかる。以上により、本研究の観測からこれら IIIa、IIIb のグループにある星は脈動周期が長いことを実証できた。IIIa および IIIb 領域の天体の選択は、初期質量が大きい可能性が高い、より長い周期のミラ型変光星を観測するのに適した方法であることが分かった。

6 距離決定方法

この章ではミラ型変光星の距離決定のために重要な周期光度関係と星間減光補正について記述する。ミラ型変光星の距離指数は周期光度関係を用いて得られた絶対光度、観測より得られた見かけの等級、減光補正量から次式が導かれる。

$$\mu = m_\lambda - M_\lambda - A_\lambda = \mu_0 - A_\lambda \quad (8)$$

ここで、 μ は天体の距離指数、 μ_0 は減光量が0のときの距離指数、 m_λ は波長 λ における見かけの明るさ、 M_λ は波長 λ における絶対等級、 A_λ は波長 λ における減光補正量を示している。以上の式で未知の量は M_λ と A_λ であり、 μ を決定するためにはそれぞれ天体ごとに M_λ と A_λ の量を見積もる必要がある。 M_λ は周期光度関係から導出される。本研究の近赤外線の観測より得られた周期を用いて導出する。周期光度関係は波長ごとに違う特性を示すことが知られていて、どの波長の光度関係を用いるかが重要である。この章では近赤外線から中間赤外線の周期光度関係の比較を行い、どの関係式を用いて距離を決定するか議論する。 A_λ の減光補正量は2つの方法から導出する。1つ目は従来から知られている近赤外線の色から見積もる方法である。この方法はミラ型変光星の本来の色 (intrinsic color) を知ることが重要で、アーカイブデータを用いてこの intrinsic color と周期の関係の構築を行い、減光量を見積もる。もう一つは3D減光マップによって決定する。

6.1 周期光度関係

ミラ型変光星の距離を決定するためには直線的で分散の少ない周期光度関係が必要である。周期光度関係はミラ型変光星の周期の対数と絶対光度に線形関係があるというものである。そのため、以下の式で記述することができる。

$$M_\lambda = a \log P + b \quad (9)$$

ここで、 P は天体の周期である。Ita & Matsunaga(2011)には大マゼラン雲でのJバンドから $24\mu\text{m}$ までの周期光度関係が掲載されている(図7)。これまで、ミラ型変光星の距離はKバンドの周期光度関係を用いて決定されることが多かった。しかし、JHKバンドの周期光度関係では長周期ミラ型変光星は厚いダスト殻による減光の影響を受けているため、距離の不定性が大きくなってしまふ。この減光傾向が大きいのはC-richのミラ型変光星である。一方で、O-richのミラ型変光星は逆に増光現象を起こし、周期が1000日を超えると減光を示すことが分かっている。そのため、大マゼラン雲のJHKバンドの周期光度関係を用いて距離決定を行うには、天体ごとに化学組成を調べる必要がある。

では、天の川銀河の周期光度関係はどうなっているだろうか？ Nakagawa et al.(2016)が示した、天の川銀河のミラ型変光星の周期光度関係がある。この周期光度関係はVLBI観測によって得られた近傍のミラ型変光星の年周視差をもとに構築された。天の川銀河でVLBI観測によって距離が決定されたミラ型変光星はいまだ少ない。これはミラ型変光星の個々の天体に対して距離を決定する必要があるためである。Nakagawa et al.(2016)では少ない天体でフィッティングを行うため、大マゼラン雲の周期光度関係の傾きを使用している。

このようにJHKバンドの周期光度関係は天の川銀河、大マゼラン雲のどちらでも得られたものも使用することが難しい。よりよい距離決定精度を実現するため別波長の周期光度関係を用いる。大マゼラン雲での周期光度関係は $3.6\mu\text{m}\sim 24\mu\text{m}$ の波長域で知られている。その中でも注目すべきは $3.6\mu\text{m}$ の周期光度関係である。この周期光度関係はC-richとO-richの明るさが同じ周期の天体で一致している。つまり、この周期光度関係を用いるならばC-richとO-richの分類が必要ないということであり、加えて長周期でも分散が少ない。その

ため本研究ではこの周期光度関係を用いて距離を決定する。ただし、 $3.6\mu\text{m}$ の観測は Spitzer 衛星で得られたデータである。Spitzer 衛星の観測範囲は全天をカバーしていないため、本研究の対象天体のすべては観測できていない。そのため、 $3.6\mu\text{m}$ 付近の波長帯で全天をカバーしているデータを用いる必要がある。そこで WISE 衛星で得られた $3.4\mu\text{m}$ の全天観測データを使用した。このデータを用いることで天の川銀河にもこの波長帯の周期光度関係が適用可能であるから、この $3.4\mu\text{m}$ のデータを用いて周期光度関係の構築を行う。

周期光度関係を $3.4\mu\text{m}$ で確立するために、Ita & Matsunaga(2011) と同じ OGLE-III によって周期が決定された大マゼラン雲の 1663 個のミラ型変光星のデータを使用する。これらのミラ型変光星は大マゼラン雲にあるため、等距離に存在し、大マゼラン雲の距離係数は 18.5 であると仮定し、以降の議論を行うこととする。図 28 は、OGLE-III カタログにリストされている 1663 個のミラ型変光星の周期に対する W1 バンド ($3.4\mu\text{m}$) の見かけの明るさを示している。 $3.6\mu\text{m}$ の周期光度関係から期待されたように、C-rich と O-rich のミラ型変光星の分布では大きな違いは見られなかった。これらの天体に対して、線形関数を使用して最小二乗フィッティングを実行した。その結果、以下の近似式を得た。

$$m_{W1} = (-4.48 \pm 0.05) \log P + (21.39 \pm 0.13) \quad (10)$$

$$M_{W1} = (-4.48 \pm 0.05) \log P + (2.89 \pm 0.13) \quad (11)$$

M_{W1} は大マゼラン雲の距離指数によって変換された絶対等級であり、 m_{W1} は W1 の見かけの明るさである。図 29 は、最適な周期光度関係からの残差のヒストグラムである。ガウス関数の 1σ は 0.29 等であり、距離のエラーに換算すると 15 % に相当する。残差のヒストグラムがガウス関数でよく表されることは、このミラ型変光星の周期光度関係が等級誤差などのランダムなエラーにのみ支配されていることを示している。この残差の広がりにはミラ型変光星の持つ振幅に起因すると考えられる。 $3.4\mu\text{m}$ では K バンドに比べるとミラ型変光星の振幅は小さいと期待できるが、それでも 1 回だけの観測では、観測が変光のどの位相に相当するかで、観測される等級が変わってしまう。一方で観測のタイミングと変光は完全に独立であるので、どの位相で観測が行われるかはランダムであり、観測等級の平均等級からのズレもランダムであることが期待される。残差ヒストグラムがガウス関数でよく近似できることはこのことを裏付けている。

$3.4\mu\text{m}$ の周期光度関係において C-rich と O-rich のミラ型変光星双方の明るさが一致することは決して偶然ではない。それは $3\mu\text{m}$ 帯が星表面からの放射とダストの放射のピーク波長の間中に位置するからである。図 30 には大マゼラン雲と天の川銀河 C-rich と O-rich のミラ型変光星の SED をそれぞれ示した。この図から、近赤外線周期光度関係上で減光を示していないミラ型変光星 (大マゼラン雲の O-rich) は $1\mu\text{m}$ 付近に放射のピークがあるのに対して、減光の影響が強く出るミラ型変光星は星周ダストを纏っているためにその放射が支配的になっており、 $4\mu\text{m}$ 付近でピークを持つ。そのため、 $3\mu\text{m}$ 付近は双方が同じ明るさになる谷になっている。以上が周期光度関係が波長 $3\mu\text{m}$ 付近で星表面の化学組成によらず一致する理由である。

ここで、 $3.4\mu\text{m}$ 周期光度関係と大マゼラン雲の他の $3.6\mu\text{m}$ の周期光度関係、Riebel et al.(2010) と Ita & Matsunaga (2011) を比較した (表 3)。Riebel et al.(2010) は、O-rich と C-rich のミラ型変光星それぞれと、O-rich と C-rich の両方のミラ型変光星を含むすべての天体で周期光度関係の近似式を算出した。O-rich および C-rich のミラ型変光星の周期光度関係は、 $\log P = 2.7$ で $m_{W1} = 9.683$ 等と 9.171 等を与え、それらは本研究で求めた周期光度関係が与える値と 0.123 等および 0.389 等、異なる。一方、彼らのすべての天体に対する周期光度関係は、 $\log P = 2.7$ で $m_{W1} = 9.156$ 等であり、本研究で求めた周期光度関係が与える値と 0.138 等異なる。この結果はフィッティングの残差よりも小さく、波長のわずかな差 ($3.4\mu\text{m}$ または $3.6\mu\text{m}$) とフィッティング範囲の周期の違いを考慮すると、有意な差とは言えない。Ita & Matsunaga (2011) では化学組成ではなく、短周期と長周期でフィッティングを行っている (それぞれ範囲は $2.0 < \log P < 2.65$, $\log P > 2.65$)。彼

表 3 周期光度関係のパラメーター

| | 傾き | 切片 |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|
| 3.4 μ m PLR(浦郷) | -4.48 | 21.39 |
| O-rich(Riebel) | -3.41 \pm 0.04 | 18.89 \pm 0.10 |
| C-rich(Riebel) | -3.77 \pm 0.05 | 19.35 \pm 0.12 |
| All stars(Riebel) | -4.22 \pm 0.02 | 20.55 \pm 0.06 |
| O-rich(logP > 2.7:Ita and Matsunaga) | -5.583 \pm 0.470 | 24.151 \pm 1.313 |

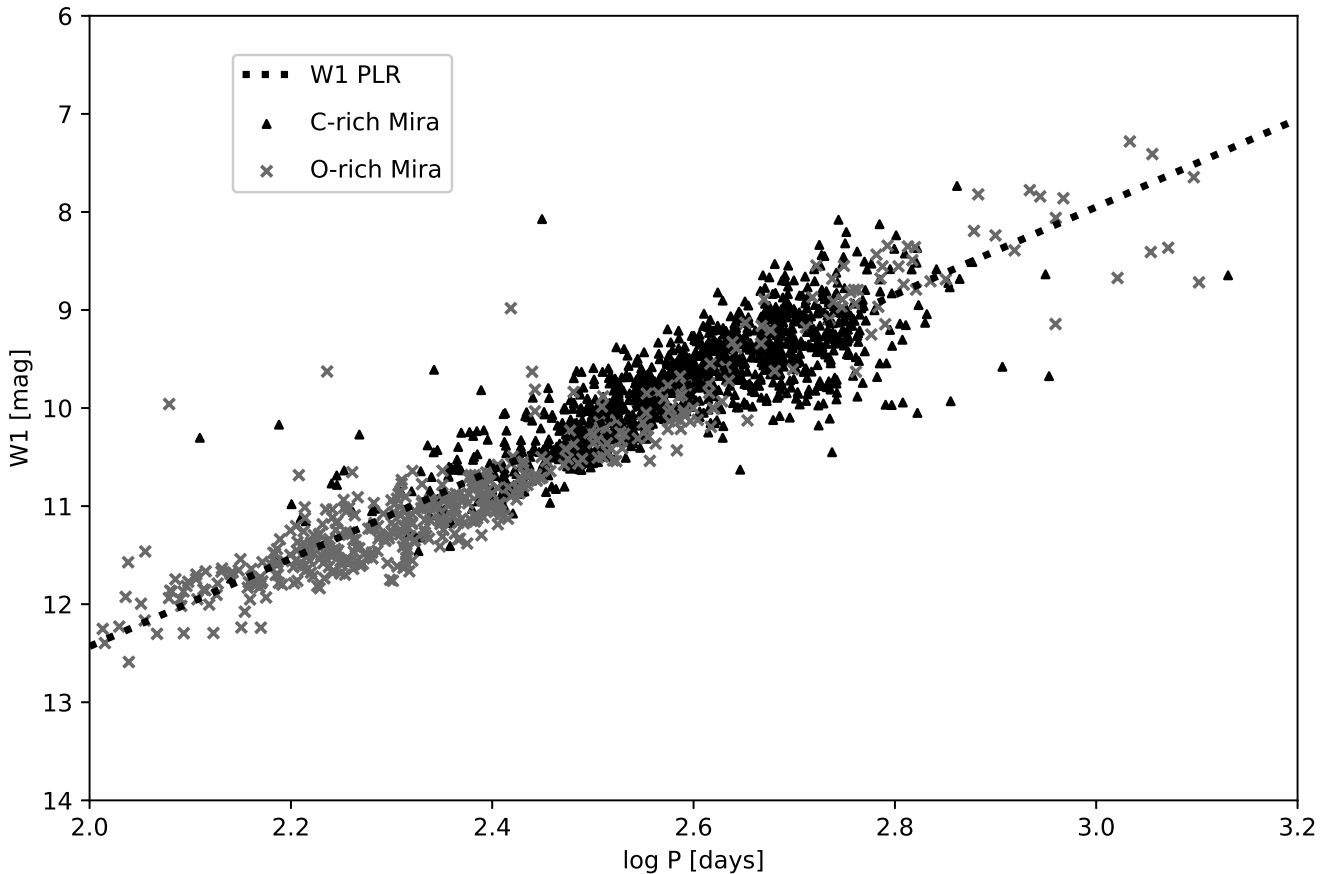


図 28 大マゼラン雲での 3.4 μ m (W1) の周期光度関係。灰色の点 (クロス) は、OGLE-III カタログの O-rich のミラ型変光星。黒い点 (三角形) は C-rich の Mira 型変光星。点線は、両方のミラ型変光星に対する最小二乗近似のベストフィットラインである。

らの周期光度関係では $\log P = 2.7$ で $m_{W1} = 9.08$ 等であり、本研究の周期光度関係との差が 0.224 等である。こちらの周期光度関係との差も、3.4 μ m 周期光度関係の持っているフィッティング残差などを考慮すれば有意な差ではない。結論としてこの差は観測波長の違い、複数回データを取っていないことによる振幅の影響が大きいと考えられる。本研究では、天の川銀河での長周期ミラ型変光星の距離を決定することを目的としているため、仮に C-rich と O-rich の周期光度関係の近似式を別々に知っていても、天の川銀河では対象天体を O-rich または C-rich として正しく分類することは難しく、それぞれに専用の周期光度関係を適用することは困難である。したがって、本研究では、C-rich と O-rich の両方から差別なく取得した本研究の周期光度関係の式を使用する。

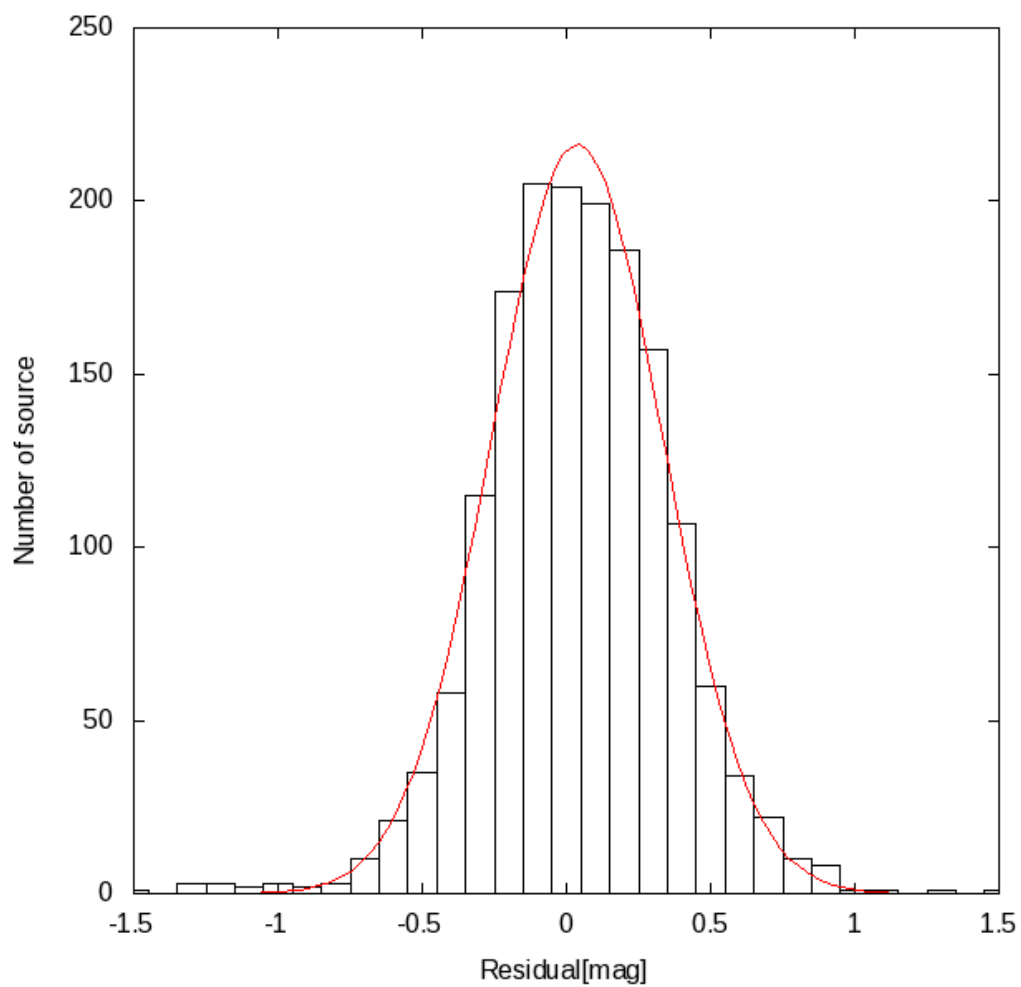
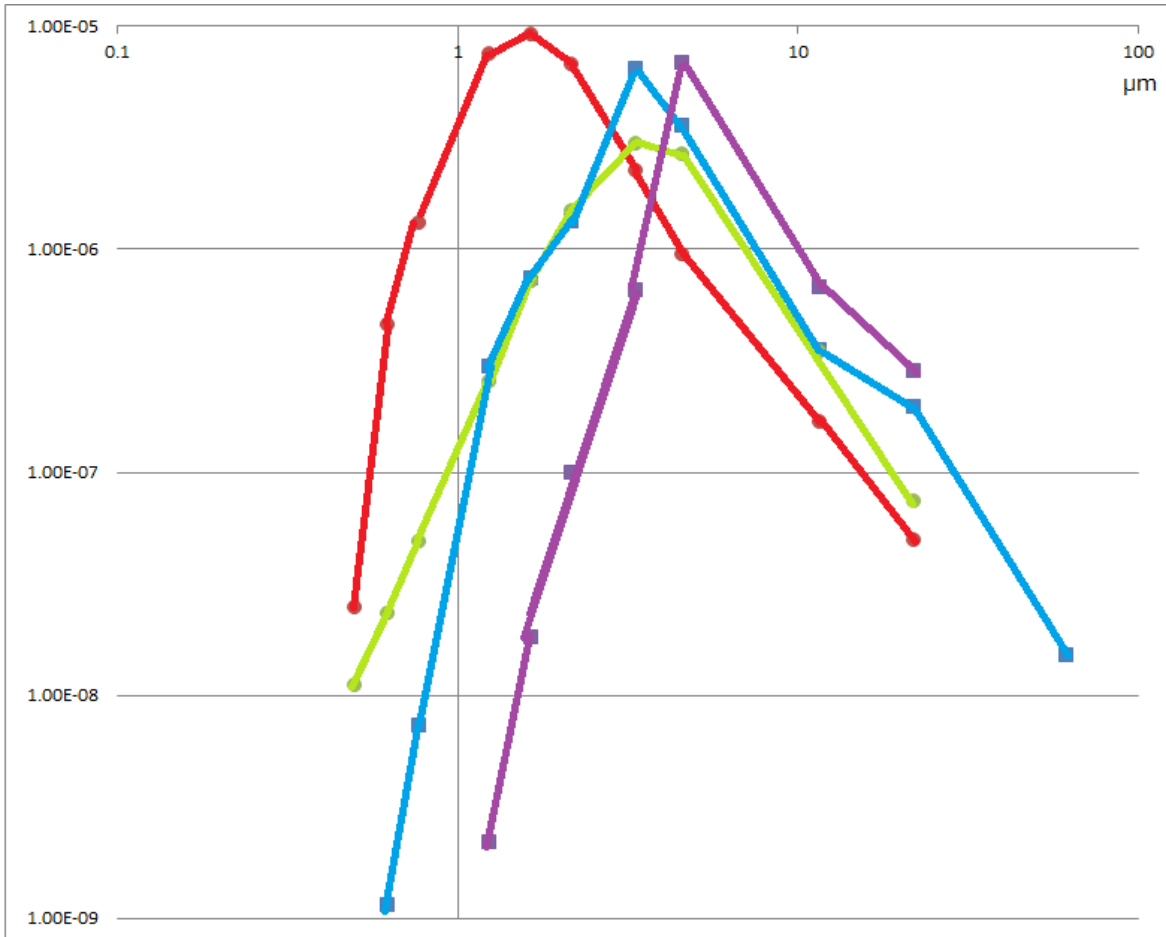


図 29 ベストフィットラインからの残差のヒストグラム。赤線は、ガウス関数による最小自乗法によって決定された曲線を示している。



規格化した vF_v

図 30 天の川銀河と大マゼラン雲に存在する周期 500 日程度のミラ型変光星の SED。赤色：マゼラン雲の O-rich のミラ型変光星、紫色；マゼラン雲の C-rich のミラ型変光星、緑色；天の川銀河の O-rich のミラ型変光星、青色；天の川銀河の C-rich のミラ型変光星。それぞれ天体までの距離で規格化している。

6.1.1 PLR vs VERA vs Gaia

本研究は天の川銀河の長周期ミラ型変光星の距離決定精度の向上のため大マゼラン雲での $3.4\mu\text{m}$ の周期光度関係を得た。この周期光度関係を用いて決定した距離の正確性を評価した。年周視差が求められている天体を用いてそれぞれの距離を比較する。使用した天体は VERA によって年周視差が決定されている天体 25 天体である (表 4)。これらの天体の周期は AAVSO や鹿児島大学 1m 望遠鏡の観測結果を利用して決定した。また、Gaia と Hipparcos による年周視差測定が報告されている天体についてはそのデータも示した。対象となる天体はすべて距離が近いので WISE の観測ではすべてサチュレーションを起こしてしまっている。そのため、WISE ではなく COBE 衛星による $3.4\mu\text{m}$ での観測結果を使用した。それらすべての情報を表 4 に示している。図 31 にそれぞれの距離を比較した散布図を示した。結果的に大マゼラン雲の $3.4\mu\text{m}$ の周期光度関係から得られた距離と VERA の年周視差から求められた距離は高い精度で一致していることが分かる。距離の違いは、ほとんどの天体で 10% に収まっていて、これはミラ型変光星の $3.4\mu\text{m}$ の周期光度関係のフィッティング残差である約 15% と比べて小さい。

一方で、Gaia の年周視差の比較は大きな差があることが分かる。この傾向は 0.5kpc 以上になるとより顕著になることが分かる。これは Gaia が AGB 星に対して正確な光度重心を測定できないことによる誤差だと思われる。Gaia は光学観測によって星の光度重心を計測し、その固有運動を計測しているが、AGB 星は星の外層が大きく膨張している。そのため、光度重心が一意に決まりにくい。

以上の結果から $3.4\mu\text{m}$ の周期光度関係は VERA の年周視差とエラーの範囲で距離が一致することが分かった。このことは、 $3.4\mu\text{m}$ の周期光度関係を用いた場合、高い精度の距離指標として長周期のミラ型変光が使用できることを意味している。また、Gaia の年周視差はやはり大きな測定誤差を持っていて、その傾向は距離が遠ければ大きくなることが分かった。

表 4 距離比較に使用したミラ型変光星

| NAME | Type | Parallax(VERA)[mas] | Period[days] | Parallax(i)[mas] | 3.4 μ m mag(ii) | D from PLR(pc) | remark |
|----------|------|---------------------|--------------|------------------|---------------------|----------------|-------------------------------|
| SY Scl | Mira | 0.75 | 411 | 0.675 | 2.19 | 1,507 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| T Lep | Mira | 3.06 | 368 | 2.95 | -0.61 | 376 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| U Lyn | Mira | 1.27 | 434 | 0.5798 | 0.79 | 829 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| OZ Gem | Mira | 0.84 | 593 | | 1.06 | 1,236 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| R Cnc | Mira | 3.84 | 357 | 4.43 | -1.03 | 302 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| R Uma | Mira | 1.97 | 302 | 2.04 | 0.54 | 537 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| T Uma | Mira | 0.96 | 267 | 0.75 | 2.35 | 1,111 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| R Hya | Mira | 8.96 | 413 | 4.47 | -2.91 | 144 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| FV Boo | Mira | 0.97 | 291 | 0.57 | 2.17 | 1,101 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| Y Lib | Mira | 0.85 | 276 | 2.06 | 2.47 | 1,210 | (i)Hipparcos,(ii)COBE |
| S CrB | Mira | 2.39 | 360 | 2.33 | -0.45 | 397 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| U Her | Mira | 3.76 | 406 | 1.75 | -0.99 | 345 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| RR Aql | Mira | 1.58 | 396 | 3.1 | -0.34 | 454 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| SY Aql | Mira | 1.1 | 359 | 3.43 | 1.28 | 880 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| UX Cyg | Mira | 0.54 | 565 | 0.176 | 1.09 | 1,202 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| R Peg | Mira | 3.98 | 334 | 2.83 | -0.25 | 408 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| R Aqr | Mira | 4.7 | 390 | 4.2 | -1.78 | 231 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| R Cas | Mira | 5.67 | 430 | 5.34 | -2.45 | 185 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| R Hya | Mira | 7.93 | 413 | 8.05 | -2.91 | 144 | (i)Hipparcos,(ii)COBE |
| S Ser | Mira | 1.36 | 371 | 3.17 | 0.88 | 754 | (i)Hipparcos,(ii)COBE |
| W Leo | Mira | 0.987 | 413 | | 1.41 | 1,055 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| BX Cam | Mira | 1.8 | 486 | 3.17 | -0.11 | 606 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| X Hya | Mira | 1.89 | 297 | 1.8911 | 0.28 | 470 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| UU Peg | Mira | 3.89 | 280 | 3.8947 | 0.13 | 417 | (i)Gaia,(ii)COBE |
| NSV17351 | Mira | 0.24 | 1200 | 0.3529 | 2.03 | 3,595 | (i)Gaia,(ii)WISE(upper limit) |

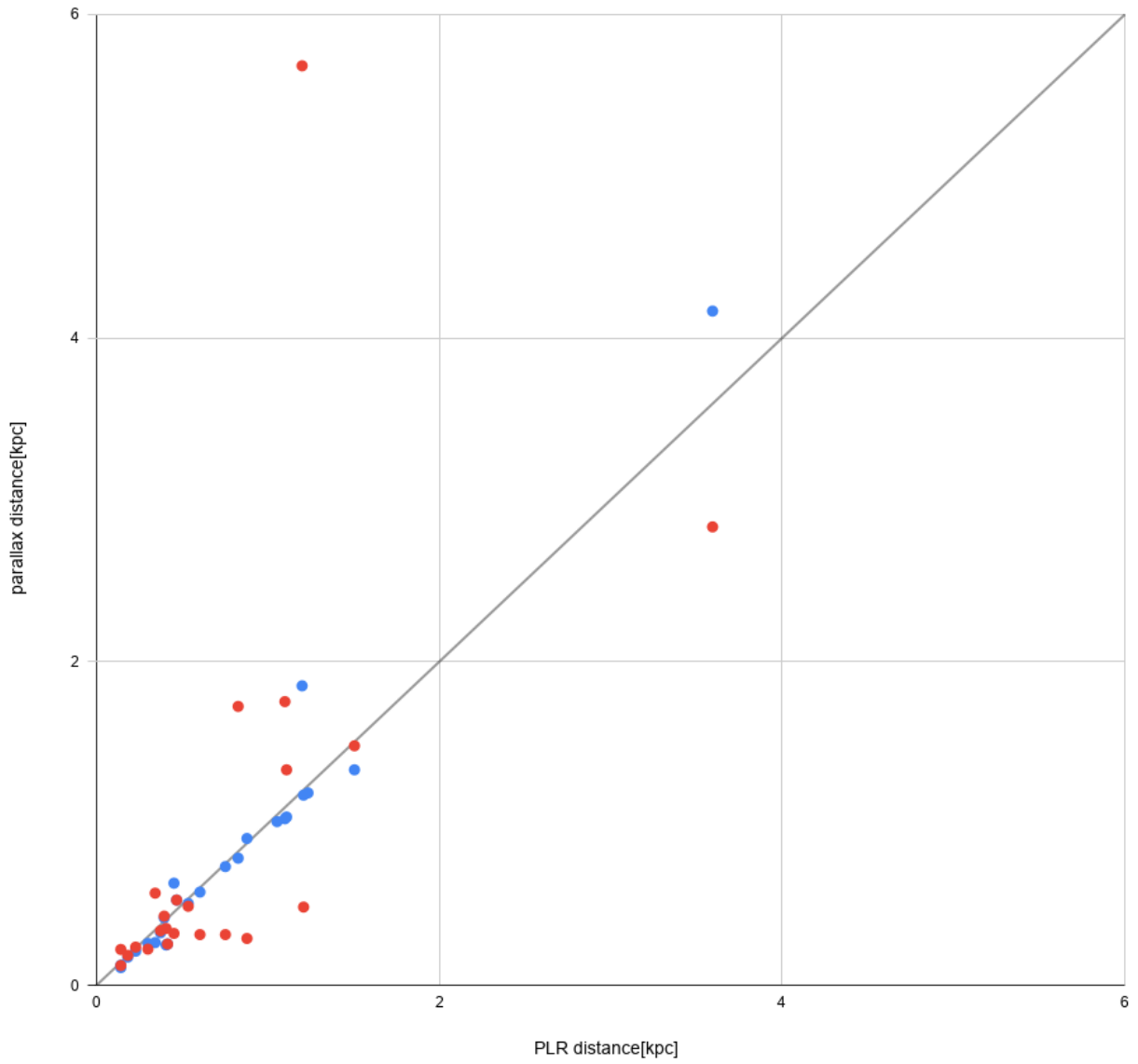


図 31 年周視差と周期光度関係によって得られた距離を比較した図。青点は VLBI によって得られた年周視差と周期光度関係の比較。赤点は Gaia によって得られた年周視差と周期光度関係の比較。

6.1.2 Kバンドの周期光度関係

ミラ型変光星のKバンドの周期光度関係は星周ダストの減光とHBBによる増光が強く反映されている。特に長周期になるとその傾向は顕著である。 $\log P > 2.4$ になるとC-richのミラ型変光星は星周ダストの影響によって低周期からの外挿線から暗くなる。一方で、O-richのミラ型変光星は外挿線よりもHBBによって明るくなる。星周ダストの影響は赤外線の色と減光量の間を用いることで補正が可能である。しかし、問題もあってこの補正方法はO-richとC-richの分類分けと天の川銀河の星間ダストの減光を先に補正する必要がある。

分類分けは色による分類分けと分光観測によって分類分けが可能である。色による分類方法はIshihara et al.(2011)によって示されているAKARIの $9\mu\text{m}$ の観測データを用いる方法である。しかし、この方法は大きな分類方法は可能であるが、O-rich星とC-rich星が多少混ざってしまう可能性が大きいことに注意しなければならない。分光観測はすべての天体に対して観測を行うことが難しい。また、OHやSiOレーザーなどのOを含んだレーザーを放射している天体をすべてO-richとすることも可能であるが、レーザーを検出できなかった天体の扱いが不明瞭になる。

加えて天の川銀河の星間減光も補正する必要がある。色による補正を行うわけだが、天の川銀河の2色図には星周のほか星間減光による赤化が含まれている。この影響は単純に距離に対して、単調増加の量であるため、切り分けが難しい。一方で星間減光の影響がほとんどない銀緯が高い天体であるならば、星間減光の補正をする必要はなく距離決定は可能ではあるが、本研究の対象天体は銀河面の天体が多いため、この例には当てはまらない。以上を理由にKバンドの周期光度関係で長周期ミラ型変光星の距離を決定することは不定性が大きくなる傾向がある。

一方で、距離決定では使用しないものの銀河ごとにミラ型変光星の様々な波長の周期光度関係を構築することは重要である。ミラ型変光星の星の進化による違いをダイレクトに反映する可能性があるからである。短周期の周期光度関係に銀河による違いは見られないが、たとえばOH/IR星のような他銀河にはほとんど存在しない天体もある。それらが周期-光度図上のどの位置にいるかで、質量放出のメカニズムの解明や星の進化過程における現象の解明の補助になる。2018年にGaiaによって銀河内の多くの星の年周視差が決定された。この年周視差を用いてミラ型変光星の2MASSのKバンドの周期光度関係を構築を試みた。星間減光の影響がほとんどない銀緯の高いミラ型変光星としてCatalina sky surveyから500天体を抽出した。それらの近赤外線2色図と銀径銀緯図を示す(図32,33)。Gaia DR2ではそのうち500天体すべてに対して観測はおこなわれていた。年周視差のエラーが30%以下の天体のみを用いて周期光度図上(図34)にプロットした。この図からは直線的な相関は見られなかった。この理由は、前節で述べたようにGaiaによるミラ型変光星の年周視差測定が不正確であるからである。

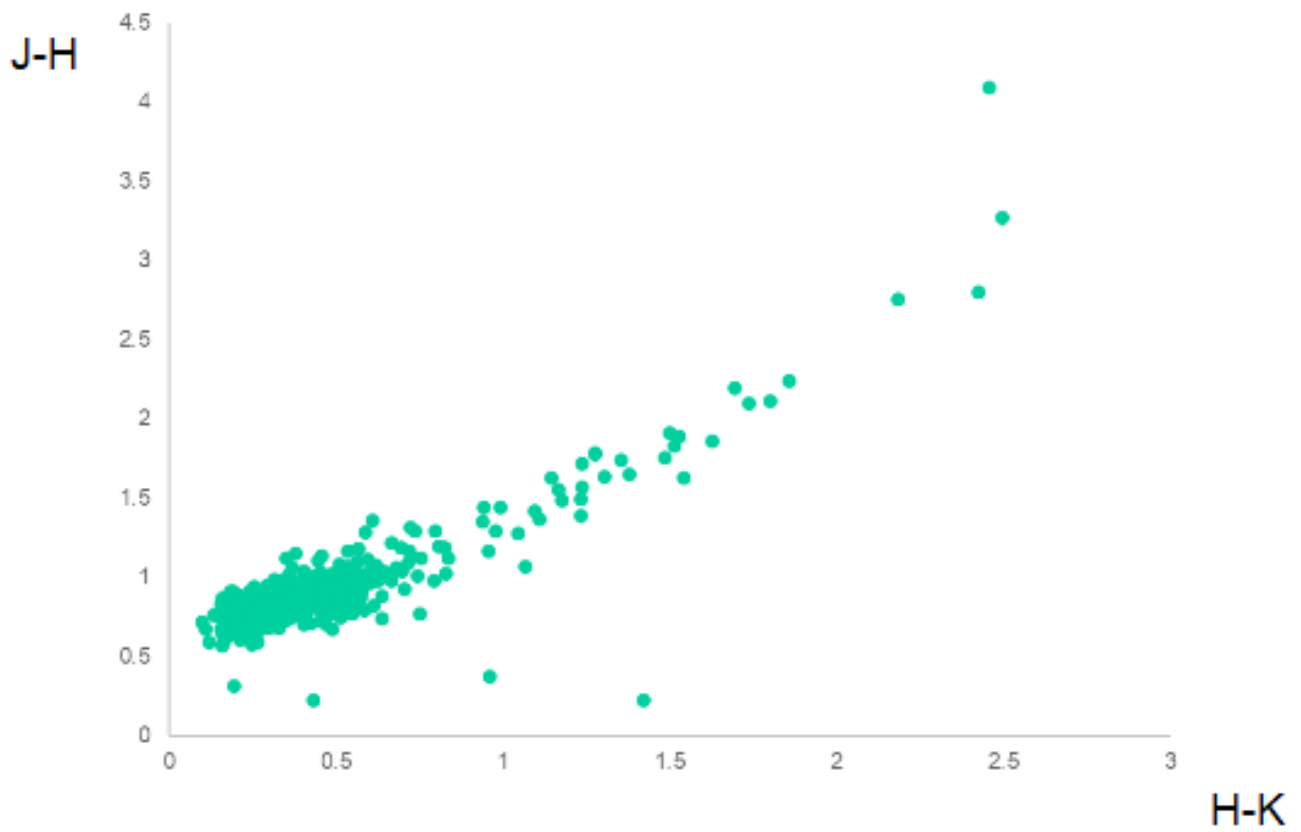


図 32 Catalina sky survey から選出した 500 個のミラ型変光星の近赤外 2 色図。JHK バンドは 2MASS PSC のデータを用いた。

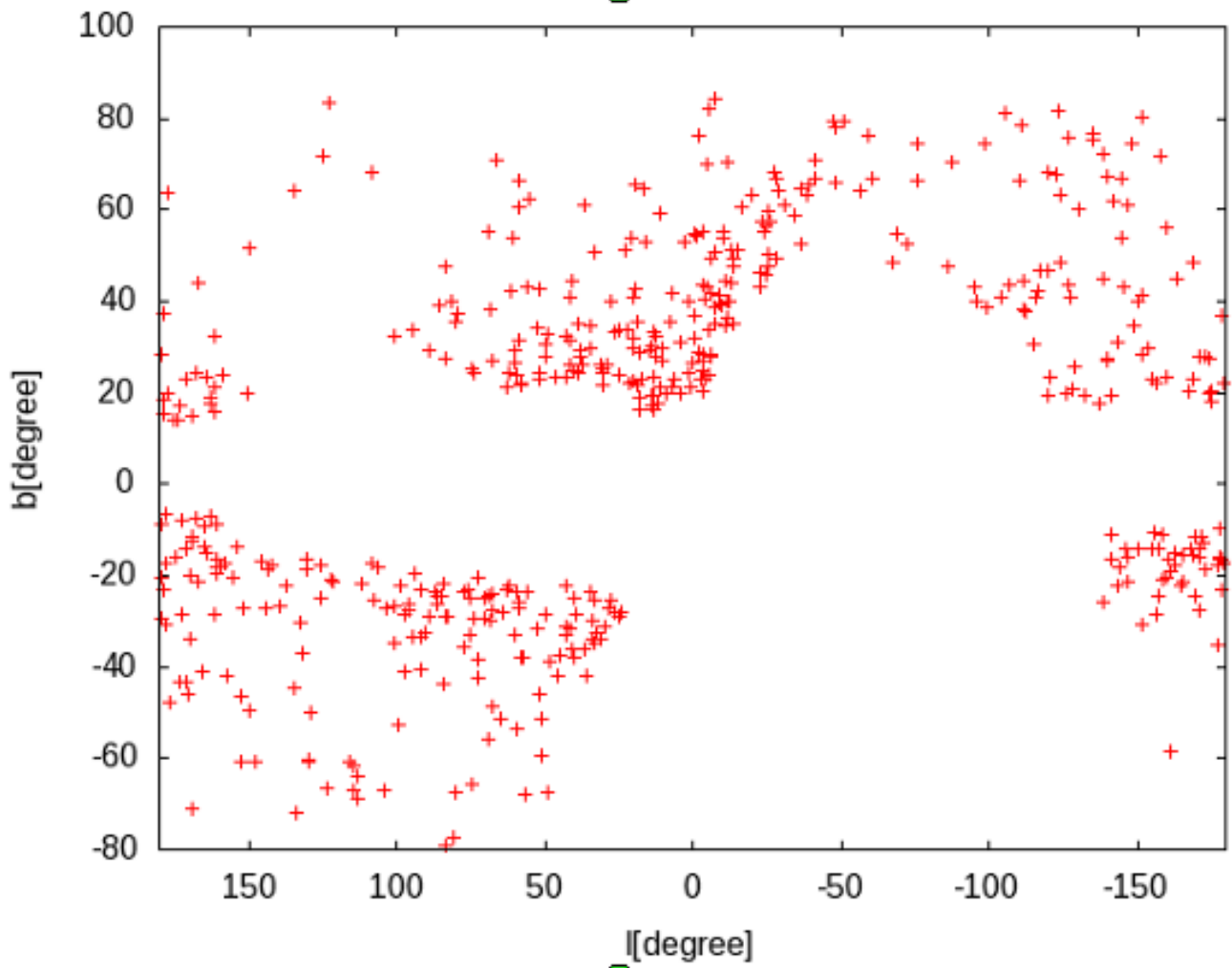


図 33 Catalina sky survey から選出した 500 個のミラ型変光星の銀経-銀緯分布。

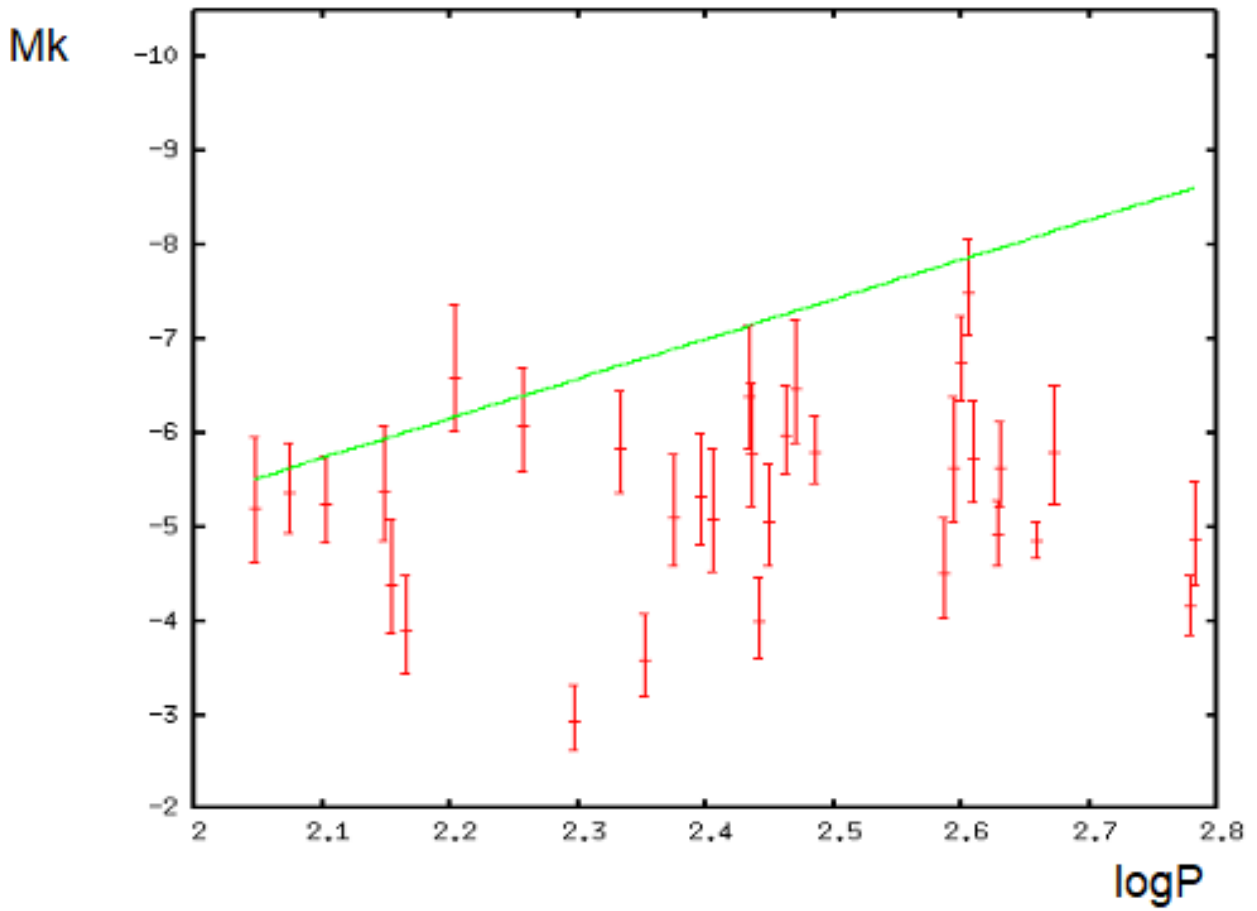


図 34 Catalina sky survey から選出した 500 個のミラ型変光星の Gaia のデータを用いた K バンドの周期-光度関係。K バンドは 2MASS PSC のデータを用いた。

6.2 星間減光補正

ミラ型変光星の距離を正確に求めるためには星間ダストによる減光の影響を補正する必要がある。宇宙空間はダストで満たされていて、通過してくる星の光は減光されて我々の地球に到達する。この効果によって、本研究が地球で観測している星の光は本来よりも暗い。そのため、周期光度関係を用いて距離を決定する場合、この効果を補正しなければ星の距離を遠く見積もることになる。特にダストが充満している天の川銀河では、銀河円盤の中に位置するため、この影響を完全に無視することは難しい。長周期ミラ型変光星は先に示した lb 図からも分かる通り、特にダストが濃い銀河面に集中的に分布していることから、減光補正を行うことは重要である。そこで私は2つの方法を用いてミラ型変光星の星間減光を補正することを考えた。

1) 3次元減光マップ (3D interstellar reddening map)

3次元減光マップとは Gaia DR2、PAN-STARRs、2MASS のデータを用いて得られた3次元の赤化マップである。このマップを用いて各天体の減光量を求める。この方法では距離と減光量が同時に求まる。まず、減光量は距離に対して単純増加の量である。これは地球からの距離が増加するごとに、必ずダストの量は増加するからである。以上のことを踏まえて A_λ を次式のように表す。

$$A_\lambda = f(\mu) \quad (12)$$

ここで、 μ は距離指数、 λ は波長、 f は単調増加する減光量を意味しており、3D 赤化マップによりその具体的な値が天体の方向ごとに提供されている。また、この関係式はある色の赤化超過量を用いて以下の式でも書ける。

$$R \cdot E(\lambda_1 - \lambda_2) = A_\lambda \quad (13)$$

絶対等級 M_λ と見かけの等級 m_λ の差を距離指数のゼロ点 μ_0 とする。天体の実際の距離指数はこの値からダストによる減光の分だけ小さくなっていくため、 μ_0 より必ず小さくなる。この式を式 (8) をもとに書きなおすことができ、

$$\mu = m_\lambda - M_\lambda - A_\lambda = \mu_0 - A_\lambda \quad (14)$$

$$A_\lambda = -\mu + \mu_0 \quad (15)$$

となり、 A_λ は μ に対して単調減少となる。単調増加と単調減少の関数であるから解は一意に決まり、 A_λ と μ が同時に求まる。図 35 にはその例として IRAS01304+6211 のグラフを示した。星間の赤化量はステップ関数のような増加を示す。ステップ関数になっているのは銀河の腕構造部分はダストの量が他の領域に比べて多くなっており、腕構造を通過する場合には赤化が大きく増加する。一方で、その腕と腕の間ではほとんど赤化は増加せず、結果としてステップ関数のようになるのである。

また、ある程度遠方になると値がサチュレーションをおこして距離が遠くても赤化量が増加しなくなる。これは最も赤化に影響を与える銀河の thin disk の高さである 300pc を超えるからである。以上の方法で、各天体に対する $E(B-V)$ と距離指数を決定することができた。次に、 $E(B-V)$ から A_{W1} への変換を行う。この A_{W1} は Schlafly Finkbeiner (2011) によって得られた $R(V) = 3.1$ での L バンドの減光と $E(B-V)$ の変換式 $A_L/E(B-V) = 0.157$ を用いて変換した。(L バンドは中心波長が $3.4\mu\text{m}$ が中心波長であり、そのバンド特性は非常に近いうえにこの波長帯はダストの影響が少ないため、変換式の値も近くなる。そのためこの値を使用する。)

2) 近赤外線 2 色図を用いた減光補正

次に、近赤外線 の 3 バンド (JHK) の観測を用いた減光補正方法を述べる。この方法は主系列星などの減光補正方法として最も典型的な手法であり、長く一般的に使用されてきた方法である。星は基本的にその表面温度での黒体輻射をしている。そのため、星の色はその表面温度を反映した色になり、2 色図上では、その星の表面温度を反映した位置に必ず存在する。これを intrinsic color と呼ぶ。注意しなければならないことは、星のスペクトルには分子の吸収線があり、観測バンド内に強い吸収があると色が変わることがある。天体の色は距離に依存しない量であるが、減光による赤化の影響を受けるため、距離が遠くなれば遠くなるほど色が赤くなる。赤化は波長が長いほど減光が小さくなることから起きる。これを赤化則、または減光則と呼ぶ。つまり、ある天体を観測することで得られたその天体の 2 色図上での位置は、ダストの量に比例し intrinsic color から赤化されていて、その移動量が減光量に相当する。この方法で最も重要なことはミラ型変光星の intrinsic color の決定である。

Whitelock(2006) では明るいミラ型変光星を用いて周期色関係を導出した。この関係によればミラ型変光星の周期が長くなると intrinsic color も赤くなる。ミラ型変光星の脈動は質量が大きくなるほど大きくなる。そのため、周期が長い天体は半径が大きくなっているため、表面の温度が下がっている。この効果によって周期が長くなると色が赤くなるのである。この intrinsic color を用いて減光補正を行うのだが、この関係式は $\log P \sim 2.6$ 程度までしか適用できない。近傍のミラ型変光星には長周期の天体が少なく、完全にダストの影響を受けていないと考えられる天体が少なかったためである。短周期の天体であればこの intrinsic color を用いて減光補正量を決定可能であるが、長周期ミラ型変光星がメインターゲットである本研究では使いにくい。もう一つ重要なことは、星周ダストによる影響である。近傍のミラ型変光星は星周ダストを纏っておらず、それによって強い赤化も受けていない。一方で長周期ミラ型変光星に多く見られる OH/IR 星などは星周ダストの影響が大きく、通常ミラ型変光星と intrinsic color が異なる。図 36 に示した大マゼラン雲の 2 色図から C-rich のミラ型変光星は星周ダストの大きな赤化をうけていることが分かる。一方で、O-rich のミラ型変光星は C-rich と比べると赤化していない。そのため星周ダストの有無によって intrinsic color が大きく違うことが分かる。地球近傍のミラ型変光星の色(色周期関係)はこの O-rich の色と一致している。このことから、天の川銀河の周期色関係は星周ダストがないミラ型変光星に対する関係式であることがわかる。一方で、天の川銀河にある星周ダストによる赤化の影響が強いと予想される OH/IR 星が、マゼラン雲の C-rich と同じ赤化傾向を示すかどうかは分からない。なぜなら一般的に O-rich のダストはシリケート、C-rich のダストはアモルファスカーボンで同じ分子でないからである。そこで天の川銀河で星間減光がほとんどないと仮定できる銀緯が高い天体を使うことによって、OH/IR 星なども含んだ天の川銀河におけるミラ型変光星の intrinsic color を調べる。そのため、Catalina sky survey (CSS) によって得られたミラ型変光星を用いて議論する。CSS は銀緯が高いミラ型変光星を多く観測している。この CSS カタログからミラ型変光星を 500 天体選出した。これらの近赤外線 JHK バンドの等級を 2MASS から抽出して 2 色図を示した(図 32)。これらの天体は近赤外 2 色図上である一部に強い集中を持っていて、赤化の少ない天体と多い天体があることが分かる。この図上での位置を天の川銀河におけるミラ型変光星の intrinsic color であるとし、対象天体の色を 2 色図上で減光則(Nishiyama 2006)にしたがって、赤化が小さくなる方向へ戻し、intrinsic color の系列との交点を求めた。2 つの系列のうち先に交点を持った系列をその天体の intrinsic color とし、 A_K をもとめた。さらに、Nishiyama(2008) の $A_K:A_{3.4\mu m} = 1:0.57$ を用いて変換した。

これら二つの方法で減光補正量が得られる。本研究では、JHK バンドの等級を 2MASS PSC から引用しているが、そのためミラ型変光星の持っている振幅の影響を取り除けていない。ミラ型変光星は色が振幅の中間値から最大値までの間で大きく色を変化させるのでそれぞれその分の不定性を持っていることになる。よって本研究では減光補正值は 1) の方法で得られたものを使用して減光補正を行う。

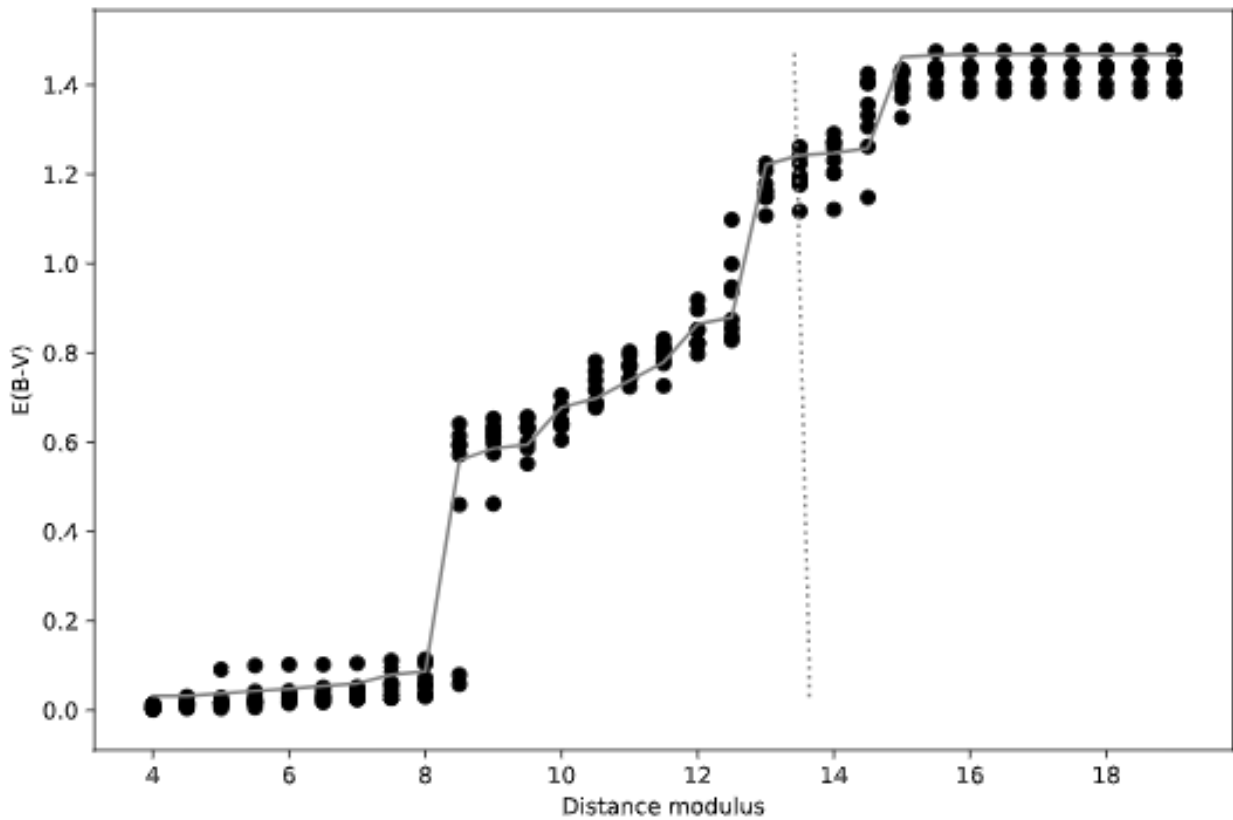


図 35 IRAS01304+6211 への視線方向の 3D 赤化マップと距離指数に対する $E(B-V)$ 。黒点; 3D 赤化マップからの $E(B-V)$ 黒線; 3D 赤化マップによって提供される黒点の最適なライン。黒い点線は IRAS01304 + 6211 の式 (8) である。

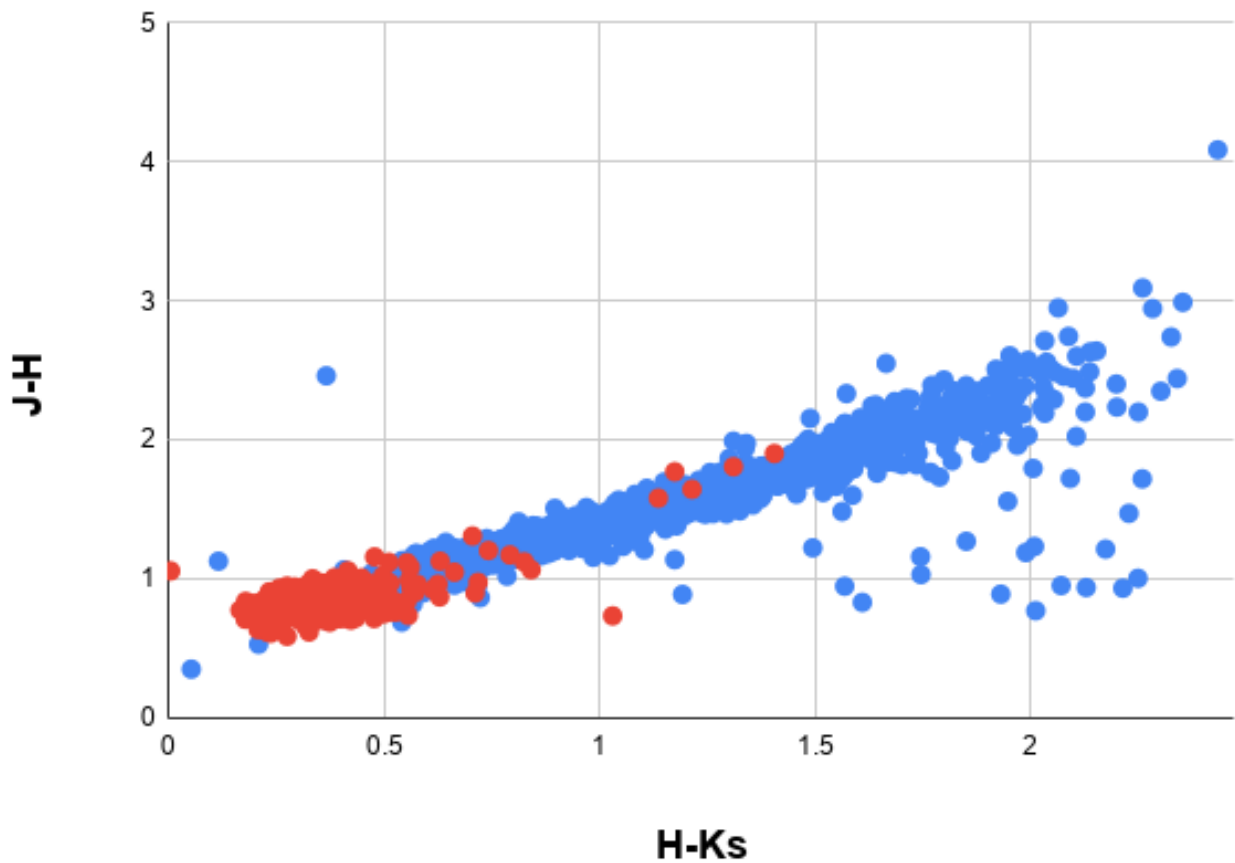


図 36 大マゼラン雲のミラ型変光星の近赤外線 2 色図。対象天体は OGLEIII より、JHK の等級は 2MASS より引用。青色 ; C-rich, 赤色;O-rich。

7 議論

7.1 腕構造と Face-on 分布

以上までの章に示した方法を用いてミラ型変光星までの距離指数が得られた。この距離指数から以下の式を用いて距離を計算する。

$$\mu = 5(\log(D) - 1) \quad (16)$$

ここで D は距離である。この距離と、天体の銀径銀緯から空間分布を描く。まず、図 37 と 38 に、すべての天体の face-on 分布と地球からの距離に対するヒストグラムを示した。距離を決定した天体は周期決定の項で示した flag1~3 の天体である。天体が最も多いのは太陽から 5kpc の範囲内である。そこから、距離が遠くなるほどに数が少なくなる。天の川銀河の一般的に知られている円盤内（ここでは直径 30 kpc、厚さ 3 kpc 程度を仮定）には約 80 % の天体が存在している結果になった。これらは銀河起源の星であり、円盤内で誕生した星であると考えられる。また、より薄い銀河円盤である thin disk を考える。この thin disk はガスとダストが豊富にあり、その銀河の星の製造をつかさどっている構成物で豊富な金属量が特徴的である。この thin disk には年齢が若い天体が多く存在している。本研究の対象天体のうち thin disk ($|z| < 300$ pc) に存在している天体は 130 天体あり、全体の 35 % の天体である。腕構造は thin disk の構造であるため、以降はこの 130 天体を用いて腕構造の議論を行う。一方で、銀河面を大きく外れた天体はおそらく円盤起源の可能性は低く、ハローにあるストリームなどが起源である可能性がある。天の川銀河の大きさを直径 20~30kpc 程度と仮定した場合、それを大きく超える天体もいくつか見つかった。

長周期ミラ型変光星が天の川銀河の腕構造と関連しているかどうかを調べるために、 z が小さい天体に注目し、腕構造と比較する。比較の対象として Reid et al.(2014) で示されている腕構造を用いた。これは、大質量星形成領域によって得られた腕の分布である。図 39 には thin disk に存在している天体の face-on 分布を示した。より若い種族に注目するために、長周期の天体 ($\log P > 2.7$) に絞って議論を行う。図 39 は、長周期ミラ型変光星がサジタリウス腕（赤線）とスキュータム腕（緑線）の近くに多く存在していることを示している。図 39 は、天体が $40^\circ < l < 60^\circ$ に集中することを示している。この方向はサジタリウス腕の接線方向に対応するため、天体は一見すると距離に関係なく腕上に分布しているように見える。腕と腕の分布は連続的なものではなく、隙間のようなものが存在しているため、腕と天体が関連しているならばこの効果が表れるはずなので腕の方向に対する距離分布を用いて議論を行う。図 40 は $40^\circ < l < 60^\circ$ にある天体の距離のヒストグラムを示している。この方向には腕構造としてサジタリウス腕が $2 < D < 8$ kpc まで延びていることが Reid et al.(2014) で示されている。またそれ以外には $10 < D < 12$ kpc にはペルセウス腕、15kpc 付近にはアウター腕が位置している。本研究の結果は、長周期ミラ型変光星の分布が腕の分布と一致していることを示している。また、長周期ミラ型変光星は腕と腕の隙間の位置では数が少なくなっていることが分かる。これは長周期ミラ型変光星の分布が腕と関連があるため、腕以外の位置では天体の数が少なくなることを反映しているためである。図 41 には $30^\circ < l < 40^\circ$ にある天体の距離のヒストグラムを示している。この方向は視線方向に複数回、腕が横切っている。この方向には腕構造としてサジタリウス腕が 2kpc 付近と $6 < D < 8$ kpc に存在している。またその中間にはケンタウルス腕が 5kpc 付近に挟まっている。さらに外縁部には $10 < D < 12$ kpc にはペルセウス腕が位置している。この方向でも長周期ミラ型変光星の分布は腕の分布と一致していることが分かる。

長周期ミラ型変光星は他のトレーサーで得られた腕構造と比較しても矛盾しないことが分かった。そのため、本研究の天体だけで腕構造に対してフィッティングを行った。本研究では最も所属する天体が多いと考え

られるサジタリウス腕を決める。本研究では腕構造が対数螺旋であると仮定し議論を行う。フィッティングに用いた式は以下である。

$$R = R_0 \exp^{(a-a_0) \tan(i)} \quad (17)$$

$$\log(R/R_0) = (a - a_0) \tan(i) \quad (18)$$

ここで R は銀河中心からの距離、 a は銀河中心を基準とした方位角（太陽方向を 0；北の極から見て、左周り）、 R_0 と a_0 はそれぞれの腕に対応した基準の角度と距離、 i は螺旋のピッチ角である。以下の方法で腕構造を求めた。

(18) 式を用いて、 $(a, \log(R/R_0))$ に対する線形フィッティングを行う。 R_0 の値を固定し、基準方位角 a_0 とピッチ角 $\tan(i)$ を変数としてフィッティングを行った。 R_0 の値は Wu et al.(2014) で示されている $R_0=6.6$ を用いる。図 42 にはサジタリウス腕に付随していると考えられるミラ型変光星の $\log(R/R_0)$ - a 図を示した。得られた結果は $\tan(i) = -0.026$ 、 $a = 0.034$ である。セファイド型変光星、大質量星形成領域によって得られた腕構造のパラメーターと比較する。Dambis et al. (2016) では $\tan(i) = -0.184$ 、 $a = -0.097$ がセファイド型変光星を用いることによって得られ、Reid et al.(2014) では大質量星形成を用いて $a=0.054$ 、 $\tan(i) = -0.12$ が得られている。本研究の結果は、いずれの結果よりもピッチ角が小さく見積もられている。ピッチ角は渦巻の巻き込みに対応する量であるが、これが小さいと銀河中心から腕構造が外側に位置していることになる。一方で基準方位角は大質量星形成領域の分布から求められた値と一致しているが、セファイドの分布から求められた値とは異なる。地球方向にあるサジタリウス腕の位置が若干異なることを意味しているが距離にすると 0.3kpc 程度である。セファイド型変光星は基準となる銀河中心距離を 8kpc としている一方で、大質量星形成領域と本研究は 8.24kpc を用いているから、この影響であると考えられる。

face-on 分布から長周期ミラ型変光星が腕構造に付随している可能性が示唆された。本研究では、サジタリウス腕に対する腕構造のパラメーターは先行研究と矛盾ない結果が得られたが、天の川銀河全体に対する腕構造の解明には至らなかった。この改善のためには天の川銀河でより多くの長周期ミラ型変光星のサーベイが必要である。

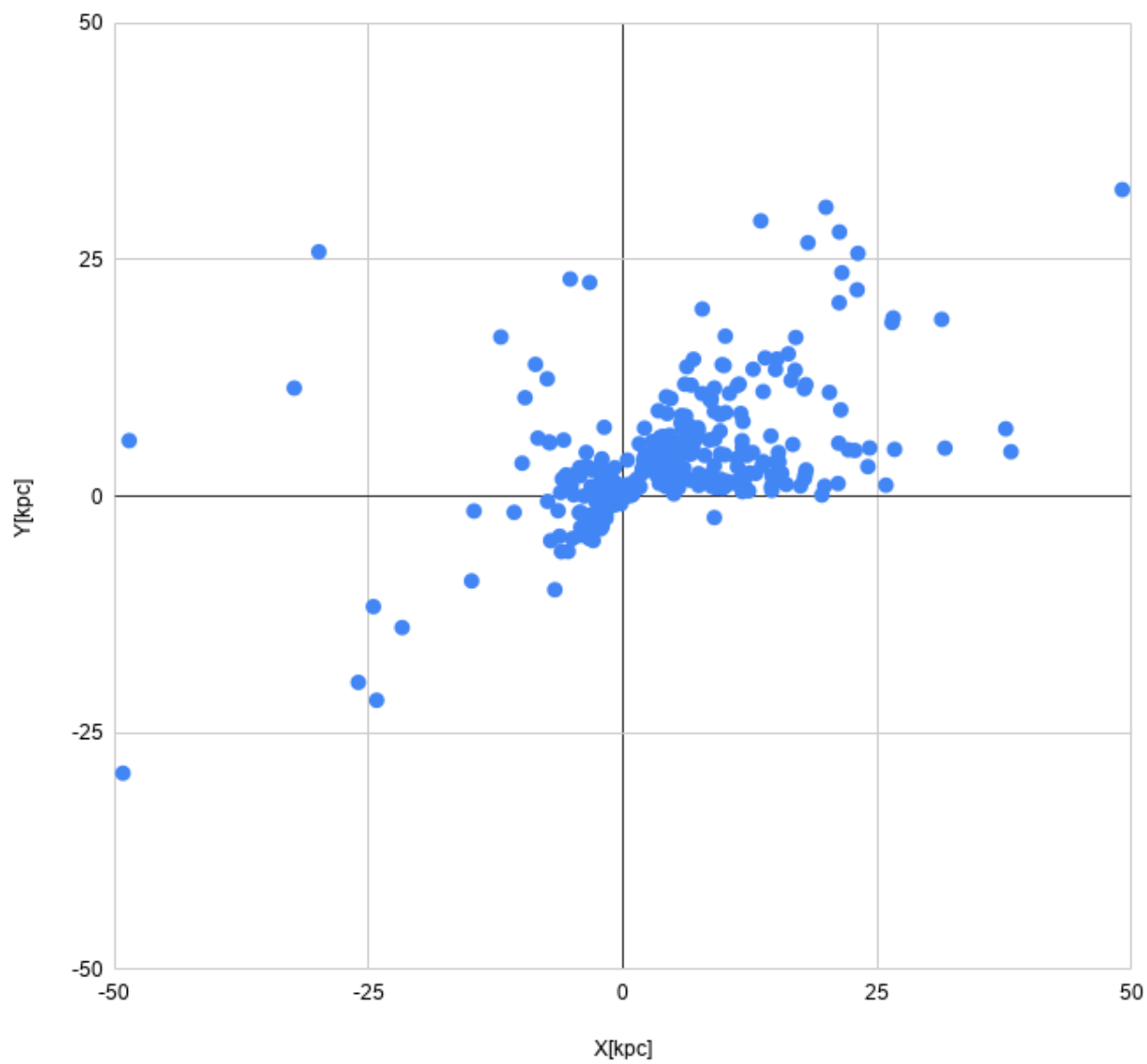


図 37 天の川銀河の face-on から見た本研究で距離が決定されたミラ型変光星の全体図。地球の座標は (0,0)、銀河中心は (8,0) である。

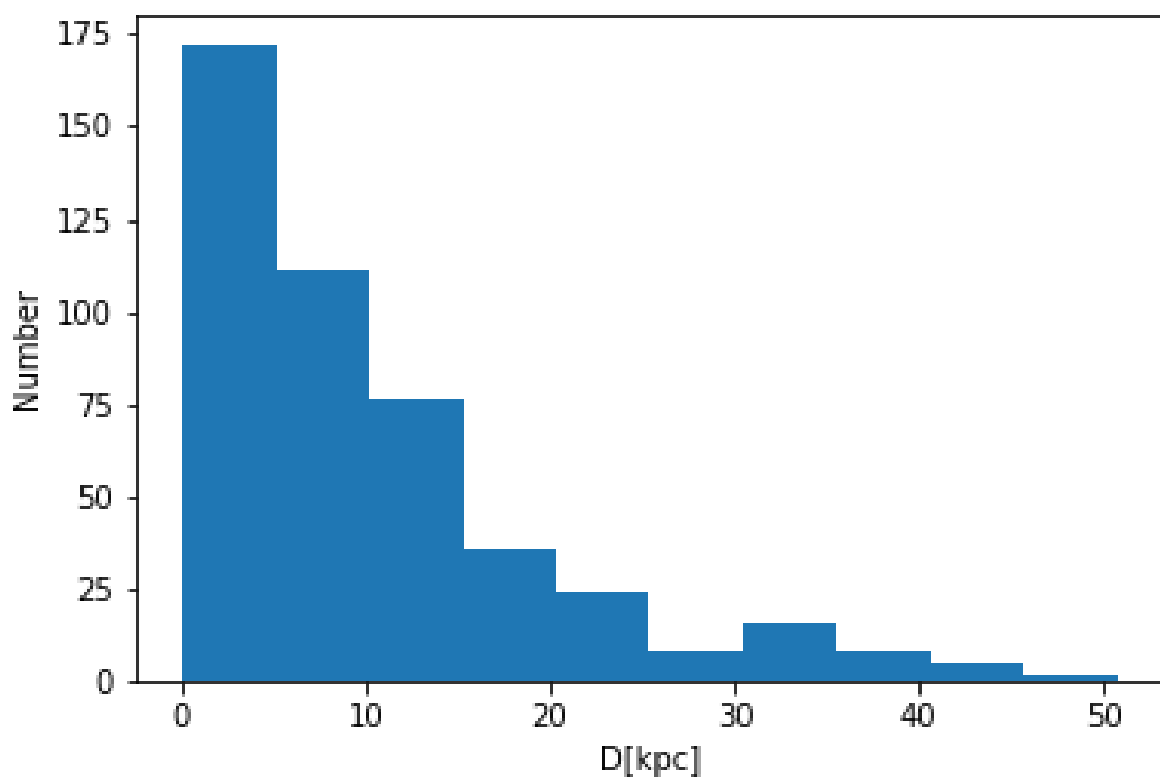


図 38 地球からの直線距離のヒストグラム。50kpc 以下の天体のみプロットしている。

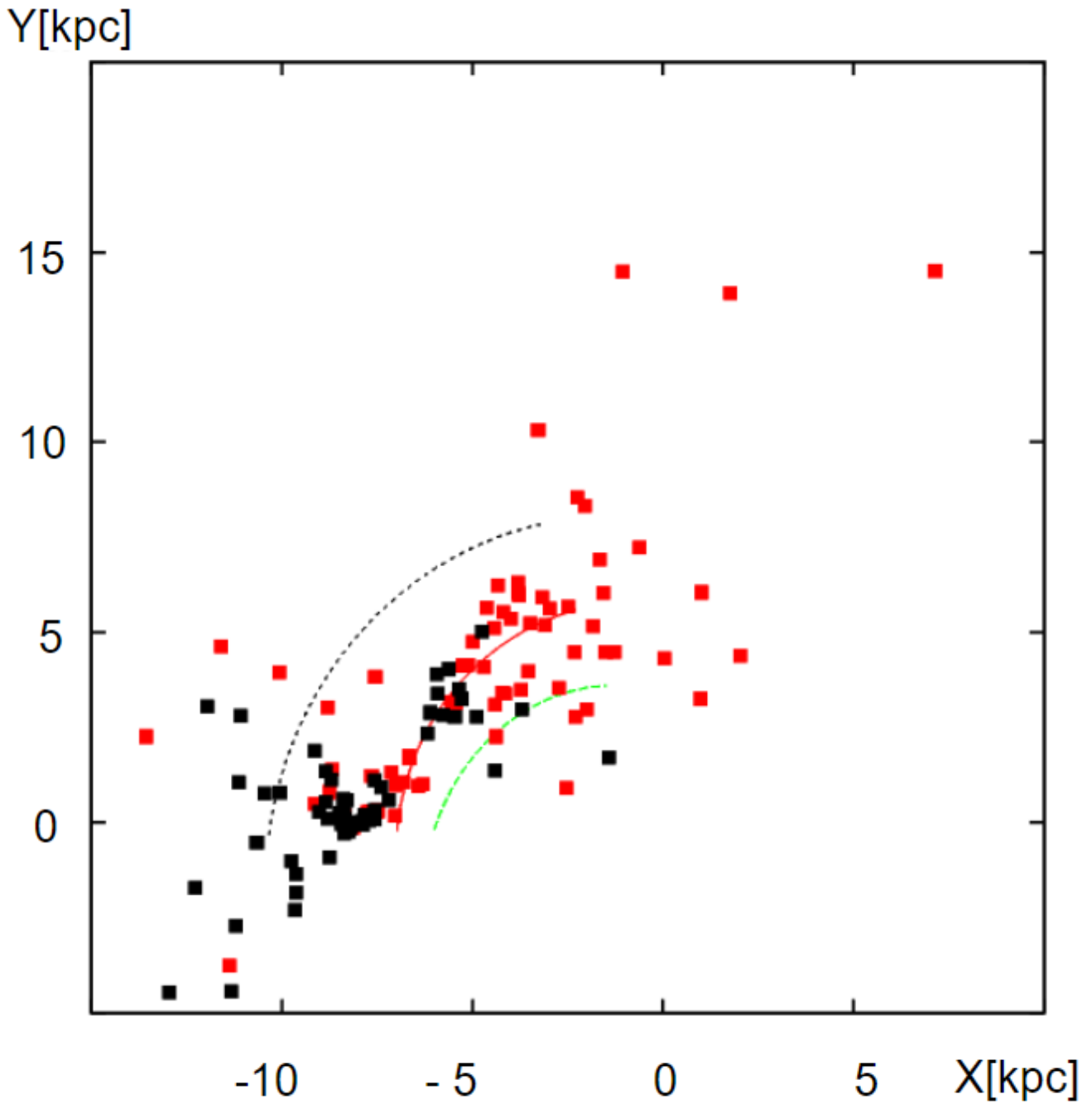


図 39 Thin disk ($|z| < 300$ pc) に位置している天体の face-on 図。赤色が長周期の天体 ($\log P > 2.7$)。青色は短周期の天体 ($\log P < 2.7$)。地球の座標は (-8,0)、銀河中心の位置は (0,0) である。黒の点線はペルセウス腕、赤色の点線はサジタリウス腕、緑色の点線はスキュータム腕を示している。銀経は地球から銀河中心を見て左周りの方向に正である。

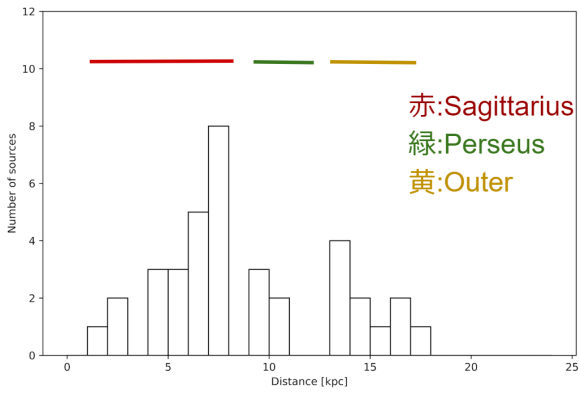


図 40 $40^\circ < l < 60^\circ$ にある天体の距離分布。
色線の範囲が腕の分布に相当している。

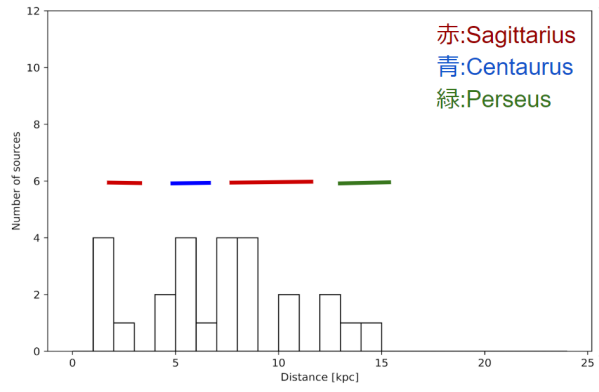


図 41 $30^\circ < l < 40^\circ$ にある天体の距離分布。
色線の範囲が腕の分布に相当している。

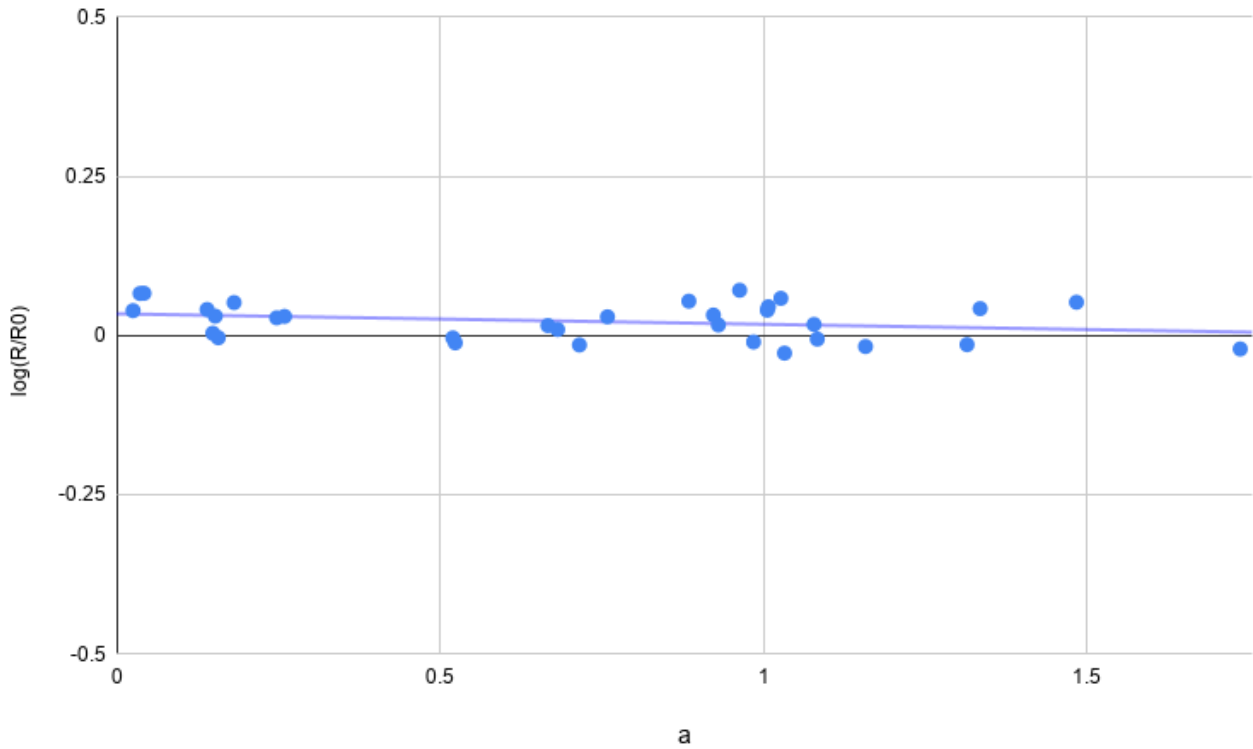


図 42 $\log(R/R_0)$ - a 図。 a は地球方向を 0 とした銀河方位角。 R_0 はサジタリウス腕を想定して、 $R_0=6.6$ を使用した。青線は best fitting 線である。

8 まとめ

天の川銀河の腕構造を明らかにする目的で、長周期傾向のあるミラ型変光星に対して鹿児島大学 1m 望遠鏡を用いて、約 13 年間のモニタリング観測を実施した。IRAS2 色図を用いた長周期ミラ型変光星の選択方法を考案し、約 550 天体の対象天体に対して K バンドの近赤外線モニタリングデータを取得した。この結果 353 天体のミラ型変光星の周期を決定することができた。これらの天体の距離を決定し、銀河内の分布を描くことで腕の分布と比較し、長周期ミラ型変光星が腕構造に付随していることを示唆している結果を得た。またこの研究を通して、以下のことを新たに確立した。

- IRAS2 色図上の IIIa、IIIb 領域の天体は長周期傾向がある。

これらの領域から選出されたミラ型変光星の変光周期分布は、約 500 日を位置にピークを持つことが分かった。一般的なミラ型変光星の周期と比較すると長周期傾向があることが分かる。長周期ミラ型変光星は、質量が重い傾向があるため、質量の重いミラ型変光星の選択的な選択方法を確立した。

- 高精度の距離決定方法の確立

長周期ミラ型変光星の距離を決定するために、ミラ型変光星の周期光度関係と減光量のより高精度な決定方法を考案し、検証を行った。周期光度関係は $3.4\mu\text{m}$ の OGLE-III と WISE のアーカイブデータを用いて、大マゼラン雲のミラ型変光星で構築した。この周期光度関係は星表面の化学組成 (O/C-rich) による明るさの差異がない。周期光度関係の持つ不確定性は 0.29 等であり、これは約 15% の距離の不定性である。この周期光度関係を用いて決定された距離と VERA 望遠鏡によって決定されたミラ型変光星の年周視差を比較し、距離の違いが 10% 未満で収まっていることを確認した。減光補正方法は 2 種類の方法を考案した。その中でも 3D 赤化マップ法はミラ型変光星に限らず、様々な天体に対して使用できる普遍的な方法である。これによって今まで減光量の見積もりができなかった天体に対しても正確な距離の見積もりが可能となった。

- 長周期ミラ型変光星の銀河系内分布

本研究で得られたミラ型変光星の距離を決定し、銀河内の 3 次元分布を得た。特に星間減光が大きい銀河面に対して遠い距離の天体の距離を決定できたことは重要である。また長周期ミラ型変光星と腕の分布を比較することで長周期ミラ型変光星が腕構造のトレーサーとなりうる可能性を示唆することができた。これから銀河全体に適用することで、天の川銀河の腕構造の全体的な解明に寄与できると考えられる。

本研究を通して得られた結果は、今後の天文学に、特に星の進化と銀河の進化の研究に大きな貢献を果たす可能性がある。星の進化の末期は、星そのものが非常に不安定な状態であり、様々な物理状態が重なっているために決定的なモデルの構築ができていない。そのため、距離を決定したことによって決定される様々なパラメーター、特に星の光度の情報は進化論において非常に重要である。そのため本研究は天の川銀河の構造解明だけでなく、星の進化末期の最終決定に対する突破口になるだろう。また、これらミラ型変光星は生まれた環境によって星内部の進化状況が変化するとされている。それはつまり、星を見ることでその環境がどうなっているかを決定できるということであるから、銀河の進化モデル構築 (特に金属の進化) に大きく貢献されることが期待できるだろう。

表 5: モニタリング観測の結果

| IRASname | flag | R.A.[deg](J2000) | Dec.[deg](J2000) | Period[days] | Amplitude[mag] | K'[mag] | W1[mag] | D[kpc] | z[kpc] |
|----------------|------|------------------|------------------|--------------|----------------|---------|---------|--------|--------|
| IRAS00007+5524 | 1 | 0.839 | 55.681 | 417 | 0.67 | 0.7 | -1.848 | 0.25 | -0.03 |
| IRAS00050-2546 | 1 | 1.901 | -25.494 | 413 | 0.92 | 2.7 | 0.068 | 0.60 | -0.59 |
| IRAS00148+7547 | 1 | 4.433 | 76.066 | 143 | 1.10 | 5.3 | 5.015 | 2.27 | 0.52 |
| IRAS00216+6448 | 4 | 6.112 | 65.082 | 469 | - | - | 11.447 | - | - |
| IRAS00244+6425 | 4 | 6.821 | 64.705 | - | - | - | 8.717 | - | - |
| IRAS00259+6510 | 4 | 7.212 | 65.447 | - | - | - | 8.757 | - | - |
| IRAS00265+6403 | 4 | 7.372 | 65.463 | - | - | - | 10.891 | - | - |
| IRAS00267+6511 | 3 | 7.402 | 65.464 | 377 | 0.39 | 6.7 | 9.787 | 48.73 | 2.29 |
| IRAS00275+5941 | 4 | 7.583 | 59.978 | 430 | - | - | 5.806 | - | - |
| IRAS00286+6142 | 5 | 7.878 | 61.981 | 440 | - | - | 7.115 | - | - |
| IRAS00294+6510 | 2 | 8.075 | 65.453 | 210 | 0.99 | 4.4 | 8.288 | 14.48 | 0.67 |
| IRAS00336+6744 | 1 | 9.152 | 68.022 | 210 | 0.90 | 4.4 | 4.201 | 2.20 | 0.20 |
| IRAS00343+6131 | 4 | 9.319 | 61.807 | 528 | - | - | 13.148 | - | - |
| IRAS00361+6515 | 1 | 9.765 | 65.535 | 650 | 1.88 | 9.7 | 6.361 | 16.39 | 0.77 |
| IRAS00403+6138 | 4 | 10.826 | 61.911 | 346 | - | - | 4.757 | - | - |
| IRAS00420+5530 | 5 | 11.239 | 55.788 | - | - | - | 8.115 | - | - |
| IRAS00420+7533 | 3 | 11.367 | 75.839 | 491 | 1.32 | 4.0 | 3.92 | 4.14 | 0.93 |
| IRAS00428+6854 | 3 | 11.501 | 69.182 | 490 | 3.03 | 1.4 | -0.283 | 0.60 | 0.07 |
| IRAS00459+6749 | 3 | 12.279 | 68.096 | 180 | 0.84 | 3.9 | 3.413 | 1.33 | 0.12 |
| IRAS00461+6137 | 5 | 12.276 | 61.894 | - | - | - | 9.433 | - | - |
| IRAS00479+4614 | 2 | 12.680 | 46.508 | 462 | 0.95 | 3.6 | 2.34 | 1.89 | -0.53 |
| IRAS00498+4708 | 3 | 13.178 | 47.416 | 191 | 2.13 | 2.2 | 0.14 | 0.31 | -0.08 |
| IRAS00509+6623 | 4 | 13.532 | 66.670 | 992 | - | - | 8.408 | - | - |
| IRAS00556+6520 | 4 | 14.696 | 65.600 | 14 | - | - | 6.925 | - | - |
| IRAS00589+5743 | 4 | 15.493 | 57.997 | - | - | - | 3.806 | - | - |
| IRAS01026+6541 | 4 | 16.471 | 65.971 | 1430 | - | - | 6.706 | - | - |
| IRAS01037+1219 | 1 | 16.608 | 12.598 | 655 | 1.46 | 2.1 | -1.548 | 0.43 | -0.33 |
| IRAS01085+3022 | 2 | 17.816 | 30.635 | 556 | 1.79 | 2.8 | 0.123 | 0.81 | -0.43 |
| IRAS01113+7800 | 3 | 18.896 | 78.273 | 570 | 3.27 | 4.6 | 2.224 | 2.17 | 0.58 |
| IRAS01134+6429 | 4 | 19.197 | 64.762 | - | - | - | 10.001 | - | - |
| IRAS01144+6658 | 3 | 19.464 | 67.231 | 484 | 2.53 | 15.8 | 7.445 | 20.73 | 1.62 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|--------|--------|------|------|------|--------|-------|-------|
| IRAS01304+6211 | 1 | 23.463 | 62.448 | 760 | 1.17 | 6.9 | 3.829 | 5.87 | 0.00 |
| IRAS02048+5957 | 4 | 32.113 | 60.197 | 2048 | - | - | 10.147 | - | - |
| IRAS02117+5559 | 1 | 33.808 | 56.217 | 532 | 1.79 | 6.9 | 5.286 | 8.35 | -0.69 |
| IRAS02143+4404 | 1 | 34.387 | 44.305 | 410 | 0.98 | 0.2 | -1.831 | 0.25 | -0.07 |
| IRAS02152+2822 | 1 | 34.525 | 28.613 | 620 | 1.63 | 6.4 | 2.164 | 2.27 | -1.15 |
| IRAS02168-0312 | 3 | 34.837 | -2.978 | 209 | 2.33 | -3.1 | -4.754 | 0.04 | -0.03 |
| IRAS02173+6322 | 2 | 35.300 | 63.605 | 698 | 1.66 | 8.2 | 5.91 | 14.19 | 0.61 |
| IRAS02225+6125 | 5 | 36.572 | 61.643 | - | - | - | - | - | - |
| IRAS02229+6121 | 5 | 36.683 | 61.589 | - | - | - | - | - | - |
| IRAS02234-0024 | 1 | 36.510 | -0.178 | 167 | 0.77 | 2.6 | 0.031 | 0.26 | -0.22 |
| IRAS02236+7224 | 4 | 37.069 | 72.626 | - | - | - | 7.559 | - | - |
| IRAS02239+6105 | 3 | 36.941 | 61.332 | - | - | - | - | - | - |
| IRAS02244+6117 | 4 | 37.031 | 61.510 | - | - | - | 6.865 | - | - |
| IRAS02259+7246 | 4 | 37.635 | 72.988 | - | - | - | 9.106 | - | - |
| IRAS02260+6118 | 4 | 37.463 | 61.541 | - | - | - | 8.587 | - | - |
| IRAS02260+6131 | 4 | 37.457 | 61.751 | 158 | - | - | - | - | - |
| IRAS02265+6621 | 3 | 37.677 | 66.583 | 302 | 1.13 | 5.5 | 4.755 | 3.94 | 0.38 |
| IRAS02281+6150 | 5 | 37.989 | 62.060 | - | - | - | 14.4 | - | - |
| IRAS02309+6108 | 5 | 38.702 | 61.365 | - | - | - | 13.108 | - | - |
| IRAS02316+6455 | 2 | 38.936 | 65.150 | 529 | 2.33 | 1.7 | -1.597 | 0.35 | 0.03 |
| IRAS02318+6106 | 5 | 38.906 | 61.327 | - | - | - | 14.016 | - | - |
| IRAS02319+6017 | 4 | 38.922 | 60.520 | - | - | - | 13.567 | - | - |
| IRAS02368+7453 | 4 | 40.510 | 75.097 | - | - | - | 8.57 | - | - |
| IRAS02408+5458 | 1 | 41.103 | 55.195 | 380 | 1.00 | 13.3 | 11.331 | 99.93 | -7.32 |
| IRAS02420+1206 | 2 | 41.190 | 12.317 | 314 | 1.55 | 3.5 | 1.584 | 0.95 | -0.63 |
| IRAS02437+5754 | 2 | 41.871 | 58.126 | 430 | 0.70 | 5.0 | 4.19 | 4.16 | -0.10 |
| IRAS02536+5939 | 5 | 44.385 | 59.861 | - | - | - | 15.792 | - | - |
| IRAS03022+5409 | 1 | 46.470 | 54.348 | 620 | 1.09 | 6.0 | 5.189 | 9.15 | -0.56 |
| IRAS03078+6046 | 1 | 47.977 | 60.956 | 1089 | 1.59 | 11.4 | 7.27 | 39.55 | 1.79 |
| IRAS03131+5541 | 1 | 49.234 | 55.876 | 377 | 1.24 | 5.5 | 4.846 | 5.00 | -0.12 |
| IRAS03204+3019 | 4 | 50.888 | 30.497 | 991 | - | - | 10.428 | - | - |
| IRAS03206+6521 | 1 | 51.285 | 65.535 | 290 | 0.99 | 8.2 | 4.186 | 2.92 | 0.37 |
| IRAS03220+3035 | 4 | 51.289 | 30.773 | - | - | - | 8.425 | - | - |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|--------|---------|------|------|--------|--------|-------|-------|
| IRAS03234+5843 | 4 | 51.868 | 58.903 | - | - | 11.87 | - | - | - |
| IRAS03262+3108 | 4 | 52.335 | 31.310 | - | - | 9.284 | - | - | - |
| IRAS03267+7102 | 4 | 52.963 | 71.216 | - | - | - | - | - | - |
| IRAS03293+6010 | 1 | 53.378 | 60.336 | 1.07 | 7.2 | 4.602 | 9.27 | 0.57 | 0.57 |
| IRAS03301+5658 | 1 | 53.532 | 57.146 | 1.93 | 7.4 | 5.466 | 10.37 | 0.17 | 0.17 |
| IRAS03313+6058 | 1 | 53.881 | 61.147 | 2.32 | 14.5 | 13.997 | 292.42 | 22.04 | 22.04 |
| IRAS03385+5927 | 1 | 55.667 | 59.617 | 1.93 | 7.4 | 3.786 | 4.79 | 0.30 | 0.30 |
| IRAS03390+6731 | 1 | 55.969 | 67.676 | 1.33 | 5.8 | 5.082 | 4.83 | 0.85 | 0.85 |
| IRAS03406+4842 | 4 | 56.062 | 48.863 | - | - | 4.105 | - | - | - |
| IRAS03421+2935 | 4 | 56.311 | 29.751 | - | - | 5.949 | - | - | - |
| IRAS03426+3214 | 3 | 56.451 | 32.403 | 0.49 | 7.0 | 6.087 | 11.01 | -3.30 | -3.30 |
| IRAS03430+0325 | 4 | 56.429 | 3.588 | - | - | 2.431 | - | - | - |
| IRAS03434+5818 | 4 | 56.880 | 58.470 | - | - | 6.131 | - | - | - |
| IRAS03439+5925 | 4 | 57.023 | 59.582 | - | - | 0.324 | - | - | - |
| IRAS03448+4432 | 1 | 57.080 | 44.702 | 1.73 | 7.6 | 3.499 | 4.78 | -0.63 | -0.63 |
| IRAS03453+3207 | 1 | 57.135 | 32.279 | 2.02 | 4.4 | 3.537 | 2.96 | -0.87 | -0.87 |
| IRAS03469+5833 | 3 | 57.767 | 58.707 | 0.70 | 5.4 | 4.806 | 5.23 | 0.33 | 0.33 |
| IRAS03507+1115 | 1 | 58.370 | 11.406 | 1.06 | -0.8 | 3.45 | 3.16 | -1.65 | -1.65 |
| IRAS03507+3623 | 3 | 58.509 | 36.538 | 4.37 | 4.2 | 0.64 | 0.81 | -0.19 | -0.19 |
| IRAS03549+5602 | 4 | 59.748 | 56.187 | - | - | 5.427 | - | - | - |
| IRAS03557+4404 | 1 | 59.799 | 44.220 | 1.68 | 6.4 | 4.115 | 5.35 | -0.63 | -0.63 |
| IRAS04034+5010 | 4 | 61.792 | 50.307 | - | - | 6.942 | - | - | - |
| IRAS04073+3800 | 2 | 62.671 | 38.132 | 0.94 | 11.6 | 7.024 | 34.78 | -5.92 | -5.92 |
| IRAS04081+5832 | 4 | 63.075 | 58.668 | - | - | 3.947 | - | - | - |
| IRAS04094-2515 | 4 | 62.879 | -25.134 | - | - | -1.511 | - | - | - |
| IRAS04095+3906 | 4 | 63.240 | 39.238 | - | - | 4.619 | - | - | - |
| IRAS04117+6402 | 4 | 64.098 | 64.168 | - | - | 10.721 | - | - | - |
| IRAS04157-1837 | 4 | 64.481 | -18.507 | - | - | -1.52 | - | - | - |
| IRAS04188+2819 | 3 | 65.489 | 28.443 | 0.45 | 5.4 | 4.237 | 3.86 | -1.00 | -1.00 |
| IRAS04190+1924 | 1 | 65.498 | 19.535 | 0.94 | 4.9 | 3.892 | 6.57 | -2.34 | -2.34 |
| IRAS04191+0346 | 4 | 65.441 | 3.897 | - | - | 3.514 | - | - | - |
| IRAS04207+0627 | 2 | 65.850 | 6.576 | 0.74 | 3.5 | 3.136 | 1.16 | -0.56 | -0.56 |
| IRAS04215+6000 | 4 | 66.462 | 60.120 | - | - | 9.327 | - | - | - |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|--------|---------|------|------|--------|-------|-------|-------|
| IRAS04254+5255 | 4 | 67.335 | 53.039 | 303 | - | 9.214 | - | - | - |
| IRAS04255+1003 | 2 | 67.075 | 10.162 | 323 | 1.10 | -1.555 | 0.23 | -0.10 | -0.10 |
| IRAS04259+0116 | 2 | 67.134 | 1.381 | 356 | 0.56 | 5.866 | 7.61 | -3.87 | -3.87 |
| IRAS04264+3853 | 1 | 67.464 | 38.993 | 306 | 0.82 | 3.82 | 2.59 | -0.29 | -0.29 |
| IRAS04273+3545 | 4 | 67.662 | 35.867 | - | - | 9.654 | - | - | - |
| IRAS04287+1807 | 4 | 67.912 | 18.233 | - | - | 5.242 | - | - | - |
| IRAS04308+2244 | 4 | 68.467 | 22.842 | - | - | 6.756 | - | - | - |
| IRAS04312+1007 | 1 | 68.493 | 10.231 | 425 | 3.16 | 3.438 | 2.91 | -1.21 | -1.21 |
| IRAS04340+4623 | 1 | 69.425 | 46.492 | 725 | 1.99 | 3.975 | 6.02 | -0.04 | -0.04 |
| IRAS04355+0814 | 3 | 69.561 | 8.336 | - | - | -1.422 | - | - | - |
| IRAS04385+2550 | 4 | 70.412 | 25.941 | - | - | 8.177 | - | - | - |
| IRAS04386+5722 | 4 | 70.710 | 57.464 | 365 | - | - | - | - | - |
| IRAS04396+0647 | 1 | 70.589 | 6.878 | 567 | 1.01 | -0.67 | 0.57 | -0.24 | -0.24 |
| IRAS04440+2605 | 4 | 71.778 | 26.179 | - | - | 4.201 | - | - | - |
| IRAS04455+5119 | 4 | 72.357 | 51.406 | 251 | - | 5.47 | - | - | - |
| IRAS04470+3002 | 1 | 72.556 | 30.129 | 419 | 1.20 | 4.963 | 5.81 | -0.93 | -0.93 |
| IRAS04505-1006 | 2 | 73.239 | -10.033 | 438 | 1.07 | 4.494 | 4.87 | -2.50 | -2.50 |
| IRAS04560-0608 | 1 | 74.633 | -6.069 | 436 | 1.03 | 3.084 | 2.53 | -1.18 | -1.18 |
| IRAS04566+5606 | 1 | 75.213 | 56.182 | 583 | 1.21 | 0.652 | 1.07 | 0.16 | 0.16 |
| IRAS04575+1251 | 4 | 75.103 | 12.935 | 236 | - | 0.845 | - | - | - |
| IRAS04588+4832 | 3 | 75.670 | 48.606 | 161 | 0.78 | 4.728 | 2.21 | 0.16 | 0.16 |
| IRAS05027-2158 | 2 | 76.212 | -21.905 | 369 | 0.78 | -1.647 | 0.25 | -0.13 | -0.13 |
| IRAS05046+3020 | 4 | 76.956 | 30.401 | 134 | - | 6.246 | - | - | - |
| IRAS05073+5248 | 1 | 77.831 | 52.876 | 620 | 1.78 | -1.18 | 0.49 | 0.07 | 0.07 |
| IRAS05091+4639 | 2 | 78.218 | 46.717 | 453 | 0.91 | 3.591 | 3.31 | 0.26 | 0.26 |
| IRAS05111+3244 | 1 | 78.612 | 32.801 | 997 | 0.81 | 7.906 | 48.98 | -2.95 | -2.95 |
| IRAS05126+2641 | 2 | 78.948 | 26.754 | 343 | 0.52 | 4.968 | 4.87 | -0.57 | -0.57 |
| IRAS05131+4530 | 1 | 79.198 | 45.568 | 1073 | 2.50 | 3.291 | 6.25 | 0.47 | 0.47 |
| IRAS05136-0951 | 3 | 79.002 | -9.810 | 624 | 0.85 | 6.79 | 19.25 | -8.32 | -8.32 |
| IRAS05146+2521 | 1 | 79.431 | 25.417 | 514 | 0.91 | 3.662 | 3.83 | -0.47 | -0.47 |
| IRAS05151+6312 | 1 | 79.967 | 63.265 | 498 | 1.07 | -1.747 | 0.31 | 0.08 | 0.08 |
| IRAS05184+4208 | 4 | 80.503 | 42.197 | 192 | - | 2.088 | - | - | - |
| IRAS05188+4254 | 2 | 80.611 | 42.962 | 244 | 0.92 | 2.333 | 1.07 | 0.07 | 0.07 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|--------|---------|------|------|------|--------|-------|--------|
| IRAS05195-1558 | 2 | 80.436 | -15.926 | 342 | 0.89 | 4.2 | 3.642 | 2.64 | -1.19 |
| IRAS05220-0611 | 4 | 81.120 | -6.147 | 211 | - | - | -1.52 | - | - |
| IRAS05223+1908 | 4 | 81.319 | 19.179 | 382 | - | - | 8.269 | - | - |
| IRAS05256+3049 | 4 | 82.208 | 30.858 | - | - | - | 8.761 | - | - |
| IRAS05266+0425 | 4 | 82.315 | 4.458 | - | - | - | 5.568 | - | - |
| IRAS05268+3820 | 4 | 82.569 | 38.386 | 654 | - | - | 10.226 | - | - |
| IRAS05273+2517 | 4 | 82.615 | 25.333 | - | - | - | 4.684 | - | - |
| IRAS05284+1945 | 1 | 82.854 | 19.789 | 529 | 1.80 | 11.7 | 6.548 | 14.85 | -1.96 |
| IRAS05295-0458 | 4 | 83.001 | -4.932 | 373 | - | - | 7.861 | - | - |
| IRAS05302-0537 | 4 | 83.181 | -5.599 | - | - | - | 9.688 | - | - |
| IRAS05314-0546 | 4 | 83.483 | -5.740 | 383 | - | - | - | - | - |
| IRAS05327-0529 | 4 | 83.791 | -5.465 | - | - | - | 6.647 | - | - |
| IRAS05341+0852 | 4 | 84.229 | 8.902 | - | - | - | 8.409 | - | - |
| IRAS05350-0700 | 2 | 84.352 | -6.976 | 852 | 0.50 | 10.0 | 8.679 | 60.73 | -20.39 |
| IRAS05365-1404 | 1 | 84.720 | -14.041 | 301 | 0.45 | 0.8 | -2.089 | 0.17 | -0.06 |
| IRAS05367+3736 | 1 | 85.033 | 37.636 | 466 | 0.75 | 1.6 | -1.905 | 0.27 | 0.02 |
| IRAS05382-0805 | 4 | 85.156 | -8.068 | - | - | - | 6.922 | - | - |
| IRAS05385-0907 | 4 | 85.225 | -9.101 | 392 | - | - | 7.644 | - | - |
| IRAS05388+3200 | 4 | 85.538 | 32.040 | 246 | - | - | -1.794 | - | - |
| IRAS05401-1002 | 4 | 85.645 | -10.030 | 155 | - | - | 7.829 | - | - |
| IRAS05407-0501 | 4 | 85.800 | -4.997 | 639 | - | - | 6.539 | - | - |
| IRAS05436-0007 | 1 | 86.555 | -0.101 | 1239 | 2.01 | 8.5 | 6.273 | 28.05 | -7.03 |
| IRAS05437+0002 | 4 | 86.579 | 0.058 | - | - | - | 6.631 | - | - |
| IRAS05445+0031 | 4 | 86.775 | 0.536 | - | - | - | 7.99 | - | - |
| IRAS05528+2010 | 4 | 88.955 | 20.175 | 196 | - | - | 2.053 | - | - |
| IRAS05598-1000 | 4 | 90.562 | -10.017 | 246 | - | - | 6.572 | - | - |
| IRAS06068-0641 | 3 | 92.330 | -6.699 | 385 | 4.52 | 7.3 | 5.738 | 7.69 | -1.65 |
| IRAS06068-0643 | 4 | 92.307 | -6.732 | 342 | - | - | 7.918 | - | - |
| IRAS06069+2142 | 1 | 92.480 | 21.705 | 427 | 0.64 | 8.2 | 6.278 | 10.83 | 0.21 |
| IRAS06108+2743 | 1 | 93.500 | 27.703 | 704 | 1.59 | 6.3 | 4.492 | 7.44 | 0.62 |
| IRAS06114-0919 | 1 | 93.446 | -9.341 | 314 | 1.72 | 12.1 | 9.323 | 33.41 | -7.27 |
| IRAS06159+1514 | 4 | 94.693 | 15.227 | 319 | - | - | 9.919 | - | - |
| IRAS06161+2040 | 2 | 94.789 | 20.659 | 269 | 0.96 | 6.3 | 4.182 | 2.73 | 0.12 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|---------|------|------|------|--------|-------|--------|
| IRAS06162+0813 | 1 | 94.738 | 8.201 | 442 | 1.05 | 5.2 | 4.369 | 4.64 | -0.28 |
| IRAS06182-0432 | 5 | 95.183 | -4.558 | - | - | - | 13.663 | - | - |
| IRAS06192+4657 | 1 | 95.748 | 46.927 | 541 | 1.72 | 7.6 | 4.299 | 5.38 | 1.39 |
| IRAS06216-2049 | 4 | 95.951 | -20.858 | 143 | - | - | 7.792 | - | - |
| IRAS06228-0244 | 1 | 96.340 | -2.777 | 413 | 0.90 | 4.6 | 3.975 | 3.64 | -0.45 |
| IRAS06297+4045 | 1 | 98.316 | 40.714 | 518 | 0.29 | 8.4 | -0.64 | 0.53 | 0.13 |
| IRAS06300+6058 | 1 | 98.639 | 60.941 | 427 | 0.92 | 0.3 | -2.043 | 0.23 | 0.09 |
| IRAS06344-0124 | 1 | 99.257 | -1.451 | 832 | 2.01 | 10.0 | 6.867 | 25.81 | -1.74 |
| IRAS06349-0121 | 1 | 99.381 | -1.395 | 416 | 1.25 | 0.9 | -1.908 | 0.24 | -0.02 |
| IRAS06369+0722 | 4 | 99.909 | 7.331 | 327 | - | - | 4.985 | - | - |
| IRAS06398-0709 | 4 | 100.560 | -7.209 | 117 | - | - | 3.36 | - | - |
| IRAS06403-0138 | 2 | 100.712 | -1.685 | 549 | 1.46 | 8.0 | 5.269 | 8.52 | -0.40 |
| IRAS06418-1317 | 1 | 101.034 | -13.336 | 347 | 1.72 | 6.0 | 6.152 | 8.48 | -1.13 |
| IRAS06464-1644 | 1 | 102.174 | -16.802 | 818 | 0.69 | 10.0 | 9.166 | 73.29 | -10.41 |
| IRAS06473-0932 | 4 | 102.435 | -9.595 | 349 | - | - | 3.852 | - | - |
| IRAS06518+1238 | 2 | 103.663 | 12.578 | 526 | 0.61 | 4.5 | 3.974 | 4.52 | 0.50 |
| IRAS06523-2458 | 4 | 103.616 | -25.038 | 405 | - | - | 8.362 | - | - |
| IRAS06527-1211 | 1 | 103.766 | -12.253 | 382 | 0.90 | 5.8 | 5.196 | 5.95 | -0.49 |
| IRAS06530-1643 | 2 | 103.823 | -16.798 | 316 | 1.47 | 8.0 | 3.669 | 2.49 | -0.29 |
| IRAS06531+0410 | 2 | 103.943 | 4.116 | 116 | 1.17 | 5.3 | 5.179 | 2.03 | 0.10 |
| IRAS06582+1507 | 4 | 105.286 | 15.061 | 409 | - | - | - | - | - |
| IRAS06582-0834 | 1 | 105.169 | -8.647 | 558 | 1.61 | 14.9 | 8.14 | 32.43 | -1.07 |
| IRAS06583-0655 | 1 | 105.185 | -6.995 | 431 | 1.90 | 4.6 | 4.208 | 4.21 | -0.08 |
| IRAS07109-0713 | 1 | 108.347 | -7.309 | 316 | 1.29 | 6.6 | 5.816 | 6.68 | 0.18 |
| IRAS07140-2321 | 4 | 109.034 | -23.450 | - | - | - | 6.853 | - | - |
| IRAS07153-2411 | 1 | 109.366 | -24.287 | 495 | 2.06 | 5.4 | 3.886 | 4.11 | -0.39 |
| IRAS07165+2947 | 3 | 109.920 | 29.703 | 365 | 0.87 | 3.6 | 2.27 | 1.49 | 0.48 |
| IRAS07180-1314 | 1 | 110.081 | -13.337 | 1117 | 0.85 | 4.3 | 1.224 | 2.50 | 0.01 |
| IRAS07197-1451 | 2 | 110.508 | -14.949 | 318 | 0.73 | 3.0 | 1.41 | 0.88 | 0.00 |
| IRAS07200-1846 | 1 | 110.568 | -18.871 | 468 | 1.73 | 5.8 | 4.654 | 5.56 | -0.19 |
| IRAS07209-2540 | 4 | 110.743 | -25.768 | 349 | - | - | 1.739 | - | - |
| IRAS07220-2324 | 1 | 111.030 | -23.513 | 123 | 1.30 | 6.9 | 1.673 | 0.43 | -0.03 |
| IRAS07221-0431 | 4 | 111.163 | -4.632 | 183 | - | - | 5.032 | - | - |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|---------|-----|------|--------|-------|------|------|
| IRAS07227-1320 | 4 | 111.263 | -13.439 | 270 | - | 7.317 | - | - | - |
| IRAS07231-0300 | 2 | 111.428 | -3.106 | 332 | 1.08 | 3.244 | 2.14 | 0.23 | 0.23 |
| IRAS07236-1138 | 2 | 111.492 | -11.739 | 659 | 0.84 | 4.761 | 7.94 | 0.30 | 0.30 |
| IRAS07253-2001 | 4 | 111.887 | -20.122 | 134 | - | 6.824 | - | - | - |
| IRAS07347-2430 | 4 | 114.223 | -24.616 | 347 | - | 8.426 | - | - | - |
| IRAS07372-1036 | 1 | 114.915 | -10.718 | 440 | 1.36 | 3.761 | 3.49 | 0.34 | 0.34 |
| IRAS07399-1435 | 4 | 115.571 | -14.714 | 144 | - | 4.391 | - | - | - |
| IRAS07432+0103 | 1 | 116.464 | 0.928 | 414 | 0.61 | 4.828 | 5.40 | 1.17 | 1.17 |
| IRAS07434-1847 | 1 | 116.421 | -18.908 | 678 | 3.20 | 5.592 | 11.94 | 0.59 | 0.59 |
| IRAS07459-1644 | 2 | 117.061 | -16.872 | 169 | 0.63 | 5.184 | 2.85 | 0.22 | 0.22 |
| IRAS07506-0345 | 4 | 118.279 | -3.891 | 244 | - | 10.325 | - | - | - |
| IRAS07529-2000 | 2 | 118.782 | -20.134 | 446 | 1.05 | 4.733 | 5.53 | 0.40 | 0.40 |
| IRAS08016+4107 | 1 | 121.265 | 40.985 | 432 | 0.86 | 3.538 | 3.10 | 1.58 | 1.58 |
| IRAS08020+6637 | 4 | 121.694 | 66.489 | 203 | - | 1.377 | - | - | - |
| IRAS08066-1719 | 1 | 122.235 | -17.477 | 500 | 1.95 | 3.725 | 3.85 | 0.56 | 0.56 |
| IRAS08084-1510 | 4 | 122.680 | -15.330 | 115 | - | 1.035 | - | - | - |
| IRAS08116+0843 | 1 | 123.578 | 8.574 | 263 | 0.95 | 4.651 | 3.31 | 1.26 | 1.26 |
| IRAS09235-2347 | 1 | 141.463 | -24.011 | 481 | 1.04 | -0.779 | 0.47 | 0.15 | 0.15 |
| IRAS09276+4454 | 4 | 142.736 | 44.684 | 300 | - | -0.677 | - | - | - |
| IRAS09296+1159 | 4 | 143.098 | 11.768 | 800 | - | 7.895 | - | - | - |
| IRAS09429-2148 | 1 | 146.313 | -22.029 | 480 | 1.03 | -0.943 | 0.43 | 0.17 | 0.17 |
| IRAS09448+1139 | 3 | 146.890 | 11.429 | 860 | 4.81 | 3.15 | 4.80 | 3.34 | 3.34 |
| IRAS11179+6537 | 2 | 170.223 | 65.349 | 479 | 0.76 | 1.831 | 1.55 | 1.17 | 1.17 |
| IRAS11252+1525 | 4 | 171.971 | 15.147 | 444 | - | -0.985 | - | - | - |
| IRAS11472-0800 | 4 | 177.450 | -8.289 | 384 | - | 8.553 | - | - | - |
| IRAS12449+3838 | 5 | 191.832 | 38.375 | 174 | - | -0.054 | - | - | - |
| IRAS12562+2324 | 3 | 194.662 | 23.139 | 356 | 0.76 | 1.786 | 1.16 | 1.16 | 1.16 |
| IRAS13269-2301 | 5 | 202.428 | -23.281 | - | - | 4.436 | - | - | - |
| IRAS15106-1532 | 1 | 228.357 | -15.733 | 273 | 1.36 | 7.245 | 11.32 | 6.49 | 6.49 |
| IRAS15193+1429 | 2 | 230.415 | 14.315 | 122 | 1.24 | -0.533 | 0.15 | 0.12 | 0.12 |
| IRAS15193+3132 | 1 | 230.350 | 31.367 | 366 | 0.73 | -1.292 | 0.29 | 0.24 | 0.24 |
| IRAS15214-2244 | 5 | 231.082 | -22.911 | - | - | -1.439 | - | - | - |
| IRAS15255+1944 | 5 | 231.946 | 19.564 | 422 | - | -0.87 | - | - | - |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|---------|-----|------|------|--------|-------|------|
| IRAS15410-0133 | 3 | 235.903 | -1.710 | 717 | 0.49 | 0.5 | -2.165 | 0.35 | 0.22 |
| IRAS16081+2511 | 4 | 242.560 | 25.071 | 128 | - | - | -1.15 | - | - |
| IRAS16430+4249 | 4 | 251.152 | 42.728 | 342 | - | - | 8.343 | - | - |
| IRAS16534-3030 | 3 | 254.158 | -30.580 | - | - | - | - | - | - |
| IRAS16560+2252 | 3 | 254.550 | 22.797 | - | - | - | 3.422 | - | - |
| IRAS17006-2328 | 4 | 255.925 | -23.546 | - | - | - | 5.649 | - | - |
| IRAS17034-1024 | 3 | 256.545 | -10.483 | 109 | 1.00 | 3.3 | -0.182 | 0.16 | 0.05 |
| IRAS17080-3215 | 5 | 257.821 | -32.325 | - | - | - | -2.018 | - | - |
| IRAS17119+0859 | 1 | 258.581 | 8.934 | 540 | 1.28 | 1.6 | -1.515 | 0.37 | 0.16 |
| IRAS17173-2334 | 4 | 260.105 | -23.628 | 174 | - | - | 7.914 | - | - |
| IRAS17179-2452 | 1 | 260.256 | -24.931 | 597 | 3.58 | 10.6 | 6.926 | 19.70 | 2.32 |
| IRAS17215-2228 | 3 | 261.145 | -22.514 | 387 | 0.97 | 6.6 | 4.82 | 5.07 | 0.66 |
| IRAS17220-2448 | 4 | 261.280 | -24.851 | 351 | - | - | 9.69 | - | - |
| IRAS17229-0301 | 3 | 261.399 | -3.067 | - | - | - | 0.827 | - | - |
| IRAS17244-2131 | 2 | 261.859 | -21.560 | 528 | 1.05 | 6.7 | 6.118 | 12.16 | 1.57 |
| IRAS17256+0504 | 3 | 262.035 | 5.038 | - | - | - | 2.288 | - | - |
| IRAS17258-1953 | 2 | 262.207 | -19.923 | 452 | 0.98 | 7.8 | 5.83 | 9.27 | 1.30 |
| IRAS17259-2326 | 1 | 262.249 | -23.478 | 648 | 1.89 | 8.1 | 5.771 | 12.46 | 1.32 |
| IRAS17260-2206 | 1 | 262.259 | -22.151 | 569 | 2.02 | 8.2 | 5.979 | 12.20 | 1.44 |
| IRAS17267-2122 | 2 | 262.443 | -21.419 | 566 | 1.81 | 10.0 | 6.609 | 16.23 | 1.99 |
| IRAS17287-1955 | 1 | 262.921 | -19.969 | 562 | 3.96 | 10.3 | 6.858 | 18.09 | 2.34 |
| IRAS17292-2408 | 1 | 263.069 | -24.182 | 682 | 2.00 | 7.9 | 5.552 | 11.79 | 1.04 |
| IRAS17304-1933 | 1 | 263.342 | -19.598 | 540 | 1.28 | 7.6 | 5.717 | 10.32 | 1.31 |
| IRAS17314-2429 | 2 | 263.640 | -24.519 | 532 | 1.82 | 8.6 | 6.515 | 14.70 | 1.14 |
| IRAS17324-1918 | 2 | 263.849 | -19.346 | 606 | 2.76 | 8.2 | 5.158 | 8.84 | 1.08 |
| IRAS17328-2315 | 1 | 263.979 | -23.290 | 664 | 1.92 | 9.4 | 6.886 | 21.27 | 1.79 |
| IRAS17338-2140 | 1 | 264.218 | -21.712 | 666 | 2.11 | 8.8 | 5.227 | 9.94 | 0.95 |
| IRAS17347-2319 | 1 | 264.443 | -23.348 | 345 | 1.02 | 11.6 | 7.352 | 14.67 | 1.14 |
| IRAS17350-2413 | 1 | 264.537 | -24.247 | 542 | 2.44 | 10.6 | 7.137 | 19.91 | 1.35 |
| IRAS17361-2358 | 4 | 264.813 | -23.999 | 166 | - | - | 7.507 | - | - |
| IRAS17385-2211 | 4 | 265.403 | -22.218 | 290 | - | - | 8.291 | - | - |
| IRAS17385-2413 | 1 | 265.410 | -24.248 | 663 | 1.90 | 9.4 | 7.596 | 29.46 | 1.65 |
| IRAS17407-1958 | 1 | 265.923 | -20.001 | 567 | 2.10 | 11.3 | 7.49 | 24.39 | 2.14 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|---------|-----|------|------|--------|-------|-------|
| IRAS17417-1630 | 1 | 266.166 | -16.528 | 595 | 2.04 | 12.0 | 7.645 | 27.35 | 3.16 |
| IRAS17429-2059 | 2 | 266.487 | -21.016 | 689 | 1.58 | 8.5 | 5.429 | 11.24 | 0.79 |
| IRAS17431-2446 | 1 | 266.548 | -24.800 | 647 | 2.16 | 11.3 | 6.513 | 17.51 | 0.62 |
| IRAS17441-2000 | 4 | 266.783 | -20.022 | - | - | - | 8.169 | - | - |
| IRAS17448-2304 | 1 | 266.983 | -23.098 | 649 | 1.62 | 9.0 | 5.225 | 9.70 | 0.44 |
| IRAS17454-1858 | 2 | 267.088 | -18.997 | 663 | 1.66 | 9.0 | 5.333 | 10.39 | 0.83 |
| IRAS17454-2258 | 1 | 267.110 | -22.990 | 684 | 1.94 | 8.7 | 6.049 | 14.86 | 0.66 |
| IRAS17470-2300 | 4 | 267.532 | -23.014 | 380 | - | - | - | - | - |
| IRAS17476-2036 | 1 | 267.648 | -20.629 | 448 | 2.88 | 8.4 | 6.238 | 11.10 | 0.64 |
| IRAS17484-1511 | 4 | 267.835 | -15.207 | 398 | - | - | 8.035 | 22.83 | 2.35 |
| IRAS17487-1652 | 2 | 267.908 | -16.884 | 542 | 1.71 | 6.7 | 5.389 | 8.90 | 0.78 |
| IRAS17499-1840 | 1 | 268.223 | -18.683 | 831 | 2.25 | 9.9 | 6.644 | 23.27 | 1.56 |
| IRAS17501-2656 | 3 | 268.328 | -26.943 | - | - | - | -1.469 | - | - |
| IRAS17518-2054 | 2 | 268.694 | -20.909 | 722 | 1.81 | 9.5 | 5.485 | 12.03 | 0.49 |
| IRAS17521-2201 | 1 | 268.781 | -22.025 | 851 | 3.15 | 12.4 | 7.689 | 38.46 | 1.14 |
| IRAS17531-0940 | 2 | 268.971 | -9.689 | 682 | 1.55 | 7.1 | 4.682 | 7.90 | 1.06 |
| IRAS17532-1311 | 1 | 269.015 | -13.195 | 695 | 1.78 | 9.8 | 6.877 | 22.07 | 2.28 |
| IRAS17541+1110 | 1 | 269.133 | 11.169 | 500 | 0.75 | 1.5 | -0.973 | 0.44 | 0.13 |
| IRAS17556-1742 | 1 | 269.648 | -17.708 | 625 | 2.52 | 9.7 | 5.888 | 12.73 | 0.70 |
| IRAS17565-2035 | 2 | 269.894 | -20.601 | 910 | 1.65 | 10.6 | 5.937 | 18.23 | 0.48 |
| IRAS17577-1519 | 1 | 270.150 | -15.329 | 490 | 1.85 | 11.3 | 6.782 | 15.45 | 1.05 |
| IRAS17583-2201 | 4 | 270.346 | -22.018 | - | - | - | 8.867 | - | - |
| IRAS18006-1734 | 1 | 270.904 | -17.567 | 492 | 0.61 | 10.7 | 7.803 | 24.81 | 0.95 |
| IRAS18015-1608 | 1 | 271.118 | -16.131 | 616 | 1.69 | 10.3 | 6.135 | 14.08 | 0.67 |
| IRAS18025-1612 | 1 | 271.356 | -16.205 | 624 | 1.81 | 9.5 | 6.36 | 15.79 | 0.68 |
| IRAS18033-1551 | 2 | 271.554 | -15.852 | 475 | 3.12 | 8.5 | 6.382 | 12.49 | 0.54 |
| IRAS18034-2441 | 1 | 271.623 | -24.680 | 755 | 2.18 | 7.2 | 4.861 | 9.39 | -0.31 |
| IRAS18044-1947 | 1 | 271.863 | -19.778 | 861 | 2.29 | 6.8 | 2.304 | 3.26 | 0.02 |
| IRAS18049-2118 | 1 | 271.980 | -21.302 | 905 | 2.11 | 12.2 | 7.175 | 32.07 | -0.29 |
| IRAS18050-2213 | 5 | 272.017 | -22.224 | - | - | - | -0.023 | - | - |
| IRAS18080-2238 | 1 | 272.767 | -22.625 | 819 | 3.05 | 9.9 | 5.694 | 14.83 | -0.47 |
| IRAS18081-0338 | 2 | 272.706 | -3.637 | 397 | 1.49 | 8.7 | 6.387 | 10.66 | 1.36 |
| IRAS18091-2437 | 4 | 273.069 | -24.613 | 113 | - | - | 8.388 | - | - |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|---------|-----|------|------|--------|-------|-------|
| IRAS18093-2142 | 2 | 273.100 | -21.699 | 777 | 2.59 | 6.7 | 3.659 | 5.54 | -0.16 |
| IRAS18096-1003 | 1 | 273.095 | -10.047 | 680 | 2.71 | 11.8 | 5.766 | 12.98 | 0.90 |
| IRAS18107-0710 | 4 | 273.374 | -7.164 | 699 | - | - | 4.722 | - | - |
| IRAS18117-2022 | 1 | 273.677 | -20.353 | 633 | 2.18 | 8.5 | 4.85 | 7.98 | -0.20 |
| IRAS18118-2420 | 1 | 273.741 | -24.325 | 696 | 1.82 | 11.8 | 6.444 | 18.10 | -1.07 |
| IRAS18123-2044 | 4 | 273.839 | -20.725 | 504 | - | - | 6.401 | 13.29 | -0.41 |
| IRAS18130-0018 | 4 | 273.910 | -0.298 | 111 | - | - | 6.651 | - | - |
| IRAS18143-2128 | 1 | 274.334 | -21.456 | 531 | 1.56 | 8.0 | 5.085 | 7.60 | -0.33 |
| IRAS18152-0919 | 1 | 274.494 | -9.309 | 144 | 2.83 | 12.8 | 6.142 | 3.84 | 0.21 |
| IRAS18154-2257 | 1 | 274.626 | -22.934 | 707 | 4.10 | 8.4 | 6.122 | 15.83 | -0.95 |
| IRAS18176-1848 | 2 | 275.154 | -18.786 | 213 | 1.59 | 4.3 | -0.218 | 0.29 | -0.01 |
| IRAS18208-2123 | 1 | 275.957 | -21.365 | 624 | 2.16 | 10.0 | 5.834 | 12.40 | -0.82 |
| IRAS18211-1712 | 2 | 276.022 | -17.187 | 456 | 3.70 | 8.3 | 5.138 | 6.79 | -0.23 |
| IRAS18212-0335 | 1 | 275.971 | -3.570 | 479 | 1.57 | 10.1 | 6.477 | 13.15 | 1.03 |
| IRAS18213-2344 | 4 | 276.099 | -23.715 | 181 | - | - | 5.53 | - | - |
| IRAS18216+0634 | 1 | 276.016 | 6.607 | 830 | 4.06 | 8.7 | 5.194 | 11.92 | 1.88 |
| IRAS18216-1617 | 2 | 276.133 | -16.267 | 896 | 2.33 | 9.0 | 5.003 | 11.69 | -0.32 |
| IRAS18219-2140 | 1 | 276.240 | -21.648 | 703 | 4.00 | 5.2 | 5.091 | 9.80 | -0.71 |
| IRAS18237-2408 | 2 | 276.707 | -24.107 | 645 | 2.28 | 7.7 | 4.701 | 7.58 | -0.75 |
| IRAS18241-1010 | 1 | 276.712 | -10.139 | 970 | 1.05 | 7.5 | 6.616 | 26.38 | 0.36 |
| IRAS18242-0823 | 1 | 276.741 | -8.360 | 801 | 1.16 | 12.2 | 8.598 | 55.37 | 1.53 |
| IRAS18262-0735 | 1 | 277.249 | -7.556 | 691 | 1.77 | 9.3 | 6.175 | 15.89 | 0.42 |
| IRAS18264-1700 | 1 | 277.344 | -16.969 | 604 | 2.03 | 8.1 | 5.204 | 9.01 | -0.46 |
| IRAS18268-1117 | 4 | 277.398 | -11.265 | 294 | - | - | 6.789 | - | - |
| IRAS18279-2314 | 4 | 277.760 | -23.206 | 194 | - | - | 7.715 | - | - |
| IRAS18281+2149 | 4 | 277.568 | 21.867 | 113 | - | - | 4.58 | - | - |
| IRAS18281-1533 | 1 | 277.751 | -15.524 | 610 | 2.31 | 9.5 | 6.431 | 15.99 | -0.73 |
| IRAS18282-2458 | 1 | 277.830 | -24.936 | 394 | 0.97 | 9.4 | 6.601 | 11.69 | -1.42 |
| IRAS18295-1216 | 1 | 278.084 | -12.236 | 658 | 2.15 | 7.7 | 5.168 | 9.57 | -0.23 |
| IRAS18298-2111 | 1 | 278.202 | -21.160 | 938 | 1.90 | 11.6 | 6.424 | 23.44 | -2.28 |
| IRAS18299-1705 | 4 | 278.209 | -17.046 | 860 | - | - | - | - | - |
| IRAS18301-1759 | 1 | 278.259 | -17.948 | 773 | 2.08 | 8.4 | 5.729 | 14.31 | -1.04 |
| IRAS18309-1318 | 1 | 278.461 | -13.271 | 881 | 2.67 | 11.1 | 5.346 | 13.49 | -0.51 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|---------|------|------|------|--------|-------|-------|
| IRAS18312-1209 | 1 | 278.509 | -12.114 | 807 | 2.98 | 11.1 | 5.433 | 12.98 | -0.39 |
| IRAS18340-0839 | 1 | 279.198 | -8.613 | 1822 | 1.36 | 8.6 | 3.478 | 10.94 | -0.13 |
| IRAS18351-1947 | 1 | 279.537 | -19.741 | 495 | 1.38 | 4.8 | 4.019 | 4.37 | -0.46 |
| IRAS18373-0021 | 1 | 279.981 | -0.312 | 530 | 1.58 | 3.7 | 1.586 | 1.51 | 0.06 |
| IRAS18378-1045 | 1 | 280.161 | -10.709 | 549 | 2.43 | 10.2 | 6.562 | 15.45 | -0.67 |
| IRAS18381+0020 | 2 | 280.184 | 0.395 | 532 | 1.28 | 5.5 | 3.824 | 4.26 | 0.19 |
| IRAS18382-1338 | 1 | 280.270 | -13.598 | 675 | 1.71 | 8.3 | 5.599 | 11.94 | -0.81 |
| IRAS18387-0423 | 1 | 280.356 | -4.342 | 645 | 1.83 | 7.7 | -1.457 | 0.44 | 0.00 |
| IRAS18387-0951 | 1 | 280.379 | -9.804 | 610 | 1.61 | 10.7 | 7.249 | 23.31 | -0.92 |
| IRAS18394-1600 | 1 | 280.593 | -15.952 | 489 | 1.30 | 7.1 | 4.831 | 6.28 | -0.57 |
| IRAS18395+0130 | 2 | 280.513 | 1.554 | 697 | 3.29 | 12.6 | 6.818 | 21.53 | 1.05 |
| IRAS18396-0807 | 2 | 280.592 | -8.083 | 697 | 1.74 | 12.4 | 8.227 | 41.20 | -1.21 |
| IRAS18404-0645 | 1 | 280.780 | -6.711 | 760 | 2.15 | 7.1 | 4 | 6.36 | -0.13 |
| IRAS18406-1537 | 1 | 280.885 | -15.576 | 571 | 1.67 | 10.0 | 6.775 | 17.66 | -1.64 |
| IRAS18418-0305 | 4 | 281.114 | -3.711 | 368 | - | - | 9.105 | - | - |
| IRAS18418-0415 | 1 | 281.113 | -4.203 | 901 | 3.40 | 8.3 | 6.469 | 23.09 | -0.15 |
| IRAS18423-0135 | 1 | 281.235 | -1.546 | 1863 | 3.32 | 8.9 | 6.051 | 36.50 | 0.47 |
| IRAS18436+4334 | 3 | 281.292 | 43.635 | - | - | - | -0.589 | - | - |
| IRAS18437-0643 | 1 | 281.612 | -6.676 | 548 | 1.69 | 8.7 | 4.752 | 6.70 | -0.23 |
| IRAS18441+0311 | 4 | 281.657 | 3.249 | 123 | - | - | 4.547 | - | - |
| IRAS18443-0446 | 1 | 281.756 | -4.713 | 838 | 2.62 | 7.2 | 4.597 | 9.13 | -0.19 |
| IRAS18444-1035 | 4 | 281.813 | -10.538 | - | - | - | 5.864 | - | - |
| IRAS18455+0448 | 4 | 282.010 | 4.858 | 327 | - | - | 7.799 | - | - |
| IRAS18475-1428 | 2 | 282.595 | -14.409 | 591 | 4.40 | 7.9 | 6.15 | 13.66 | -1.50 |
| IRAS18478-0058 | 2 | 282.594 | -0.919 | 746 | 2.30 | 7.9 | 4.402 | 7.52 | -0.02 |
| IRAS18481+0405 | 1 | 282.657 | 4.152 | 719 | 2.70 | 11.3 | 6.662 | 20.61 | 0.75 |
| IRAS18487+0152 | 1 | 282.817 | 1.939 | 679 | 2.04 | 7.2 | 4.691 | 7.90 | 0.13 |
| IRAS18500+0646 | 2 | 283.127 | 6.836 | 462 | 1.09 | 6.7 | 5.306 | 7.43 | 0.37 |
| IRAS18502-0253 | 2 | 283.230 | -2.823 | 598 | 0.98 | 3.8 | 1.913 | 1.96 | -0.06 |
| IRAS18505-1416 | 4 | 283.358 | -14.207 | 450 | - | - | - | - | - |
| IRAS18511-1044 | 1 | 283.484 | -10.678 | 646 | 3.68 | 9.0 | 5.85 | 12.88 | -1.21 |
| IRAS18512-0051 | 3 | 283.469 | -0.797 | 272 | 0.91 | 10.6 | 8.61 | 21.15 | -0.33 |
| IRAS18522+0021 | 1 | 283.698 | 0.424 | 1041 | 0.46 | 3.0 | 2.378 | 3.99 | -0.04 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|--------|-----|------|------|--------|-------|-------|
| IRAS18522+0032 | 1 | 283.690 | 0.601 | 700 | 2.07 | 8.6 | 5.324 | 10.86 | -0.09 |
| IRAS18525+0210 | 2 | 283.771 | 2.245 | 640 | 0.98 | 12.5 | 7.883 | 32.58 | 0.12 |
| IRAS18530+0817 | 1 | 283.855 | 8.354 | 744 | 2.92 | 5.0 | 3.408 | 4.75 | 0.24 |
| IRAS18535+0726 | 2 | 283.987 | 7.508 | 769 | 2.22 | 8.1 | 4.814 | 9.35 | 0.39 |
| IRAS18537+0030 | 5 | 284.086 | -0.438 | 634 | - | - | 6.144 | - | - |
| IRAS18549+0905 | 1 | 284.337 | 9.161 | 471 | 1.88 | 4.7 | 4.016 | 4.17 | 0.21 |
| IRAS18549+0001 | 1 | 284.388 | 0.047 | 578 | 1.50 | 7.6 | 5.052 | 8.07 | -0.19 |
| IRAS18556+0003 | 2 | 284.562 | 0.125 | 643 | 3.74 | 8.5 | 6.073 | 14.22 | -0.36 |
| IRAS18559+0103 | 1 | 284.632 | 1.130 | 771 | 4.40 | 12.7 | 7.496 | 32.21 | -0.60 |
| IRAS18563+0816 | 1 | 284.683 | 8.336 | 711 | 1.87 | 9.1 | 5.756 | 13.44 | 0.51 |
| IRAS18567+0003 | 1 | 284.838 | 0.124 | 667 | 2.74 | 5.6 | 4.25 | 6.34 | -0.19 |
| IRAS18568+0550 | 4 | 284.836 | 5.911 | 201 | - | - | 6.876 | - | - |
| IRAS18578+0831 | 2 | 285.072 | 8.592 | 572 | 2.03 | 7.5 | 4.423 | 5.99 | 0.20 |
| IRAS18578+0951 | 2 | 285.060 | 9.933 | 527 | 1.75 | 9.5 | 7.426 | 22.18 | 1.00 |
| IRAS18585+0900 | 1 | 285.224 | 9.084 | 866 | 3.18 | 5.8 | 3.27 | 5.11 | 0.18 |
| IRAS18595+0053 | 2 | 285.521 | -0.874 | 797 | 1.75 | 6.9 | 5.639 | 14.11 | -0.68 |
| IRAS19005+0843 | 1 | 285.741 | 8.791 | 460 | 0.89 | 13.0 | 7.649 | 21.76 | 0.56 |
| IRAS19009+0701 | 4 | 285.900 | -6.945 | 100 | - | - | 9.484 | - | - |
| IRAS19010+1307 | 1 | 285.840 | 13.200 | 843 | 4.92 | 8.2 | 5.869 | 16.49 | 0.97 |
| IRAS19011+0852 | 4 | 285.881 | 8.956 | - | - | - | 6.855 | - | - |
| IRAS19017+0412 | 1 | 286.060 | 4.283 | 712 | 1.96 | 7.4 | 4.407 | 7.23 | -0.11 |
| IRAS19017+0608 | 1 | 286.041 | 6.221 | 680 | 2.21 | 10.5 | 4.73 | 8.05 | 0.00 |
| IRAS19023+0745 | 2 | 286.180 | 7.839 | 561 | 1.95 | 8.9 | 4.126 | 5.13 | 0.06 |
| IRAS19025+0702 | 4 | 286.249 | 7.111 | 193 | - | - | - | - | - |
| IRAS19026+0007 | 1 | 286.317 | 0.205 | 482 | 2.48 | 5.4 | 4.459 | 5.22 | -0.27 |
| IRAS19026+1300 | 1 | 286.233 | 13.085 | 482 | 1.24 | 5.4 | 6.927 | 16.27 | 0.85 |
| IRAS19029+0808 | 1 | 286.344 | 8.218 | 694 | 1.81 | 5.6 | 1.14 | 1.57 | 0.02 |
| IRAS19031+0035 | 2 | 286.419 | -0.513 | 321 | 2.36 | 9.5 | 6.841 | 10.86 | -0.64 |
| IRAS19037+0204 | 2 | 286.577 | 2.151 | 580 | 1.70 | 6.0 | 5.176 | 8.57 | -0.35 |
| IRAS19039+0809 | 1 | 286.593 | 8.230 | 670 | 1.69 | 5.3 | -1.602 | 0.43 | 0.00 |
| IRAS19046+1121 | 1 | 286.757 | 11.436 | 525 | 2.09 | 10.3 | 6.223 | 12.70 | 0.40 |
| IRAS19052+0922 | 1 | 286.913 | 9.454 | 653 | 2.23 | 7.1 | 5.005 | 8.81 | 0.11 |
| IRAS19054+0419 | 1 | 286.983 | 4.398 | 568 | 1.35 | 7.9 | 6.789 | 17.69 | -0.51 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|--------|------|------|------|--------|-------|-------|
| IRAS19055+0225 | 1 | 287.013 | 2.508 | 629 | 1.94 | 9.6 | 6.164 | 14.53 | -0.65 |
| IRAS19057+0141 | 1 | 287.077 | 1.774 | 448 | 1.23 | 6.7 | 5.623 | 8.36 | -0.43 |
| IRAS19061+1041 | 2 | 287.130 | 10.780 | 695 | 1.72 | 8.0 | 5.23 | 10.34 | 0.21 |
| IRAS19065+0832 | 4 | 287.245 | 8.629 | 554 | - | - | 6.383 | - | - |
| IRAS19069+1335 | 4 | 287.319 | 13.674 | 115 | - | - | 9.015 | - | - |
| IRAS19071+0946 | 1 | 287.383 | 9.863 | 1474 | 1.46 | 9.9 | 5.304 | 20.98 | 0.19 |
| IRAS19071+1413 | 3 | 287.355 | 14.309 | 253 | 1.22 | 9.9 | 5.003 | 3.77 | 0.17 |
| IRAS19074+0336 | 1 | 287.479 | 3.691 | 612 | 2.70 | 7.4 | 4.701 | 7.23 | -0.30 |
| IRAS19075+0921 | 1 | 287.487 | 9.448 | 1083 | 2.40 | 11.5 | 6.802 | 31.73 | 0.13 |
| IRAS19081+0322 | 1 | 287.653 | 3.451 | 783 | 2.62 | 10.6 | 6.595 | 21.57 | -1.01 |
| IRAS19083-0017 | 2 | 287.739 | -0.209 | 504 | 1.29 | 7.7 | 5.87 | 10.41 | -0.81 |
| IRAS19087+0323 | 1 | 287.821 | 3.473 | 629 | 3.84 | 7.4 | 4.974 | 8.40 | -0.41 |
| IRAS19089+1542 | 4 | 287.797 | 15.788 | 180 | - | - | 4.841 | - | - |
| IRAS19090+1527 | 3 | 287.828 | 15.542 | 329 | 0.31 | 7.9 | 6.596 | 9.92 | 0.48 |
| IRAS19097+0411 | 1 | 288.055 | 4.282 | 517 | 2.40 | 5.8 | 4.442 | 5.52 | -0.26 |
| IRAS19102+0506 | 1 | 288.168 | 5.186 | 504 | 1.37 | 7.4 | 5.369 | 8.26 | -0.34 |
| IRAS19103+0913 | 1 | 288.196 | 9.307 | 470 | 1.03 | 5.7 | 4.004 | 4.14 | -0.03 |
| IRAS19107+1144 | 4 | 288.262 | 11.832 | 313 | - | - | 3.761 | - | - |
| IRAS19111+1404 | 2 | 288.356 | 14.162 | 573 | 1.03 | 3.5 | 2.153 | 2.11 | 0.06 |
| IRAS19112+1220 | 4 | 288.401 | 12.425 | 109 | - | - | 12.287 | - | - |
| IRAS19112+1439 | 2 | 288.375 | 14.750 | 774 | 0.72 | 8.9 | 6.01 | 16.30 | 0.54 |
| IRAS19114+0920 | 4 | 288.457 | 9.430 | 324 | - | - | 8.542 | - | - |
| IRAS19122-0230 | 2 | 288.729 | -2.425 | 188 | 3.43 | 9.8 | 5.727 | 4.03 | -0.44 |
| IRAS19126+0648 | 1 | 288.775 | 6.891 | 630 | 4.00 | 11.0 | 6.868 | 20.13 | -0.73 |
| IRAS19128+0910 | 1 | 288.818 | 9.263 | 758 | 2.24 | 12.7 | 7.339 | 29.51 | -0.52 |
| IRAS19128+1310 | 1 | 288.783 | 13.267 | 783 | 4.38 | 8.6 | 4.787 | 9.38 | 0.14 |
| IRAS19131+1551 | 1 | 288.853 | 15.941 | 851 | 5.58 | 11.4 | 5.409 | 13.46 | 0.48 |
| IRAS19136+2055 | 1 | 288.947 | 21.009 | 586 | 3.56 | 9.1 | 6.125 | 13.40 | 1.01 |
| IRAS19140+0652 | 1 | 289.123 | 6.958 | 518 | 1.75 | 8.9 | 6.279 | 12.88 | -0.53 |
| IRAS19143+1817 | 1 | 289.141 | 18.381 | 416 | 1.90 | 4.0 | 3.521 | 2.97 | 0.15 |
| IRAS19144+0948 | 1 | 289.212 | 9.904 | 821 | 1.70 | 13.4 | 6.725 | 23.89 | -0.44 |
| IRAS19147+1349 | 1 | 289.252 | 13.922 | 617 | 2.14 | 6.6 | 4.776 | 7.54 | 0.10 |
| IRAS19148+1702 | 1 | 289.274 | 17.128 | 517 | 0.88 | 5.3 | 4.337 | 5.26 | 0.21 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|---------|-----|------|------|-------|-------|-------|
| IRAS19149+1638 | 1 | 289.298 | 16.732 | 583 | 2.98 | 5.2 | 3.54 | 4.06 | 0.14 |
| IRAS19151+1456 | 1 | 289.359 | 15.033 | 534 | 2.48 | 5.9 | 4.873 | 6.93 | 0.15 |
| IRAS19160+0755 | 2 | 289.612 | 8.011 | 560 | 2.10 | 8.7 | 5.608 | 10.14 | -0.41 |
| IRAS19161+2343 | 5 | 289.561 | 23.824 | - | - | - | 3.898 | - | - |
| IRAS19171+1119 | 1 | 289.885 | 11.414 | 860 | 3.33 | 10.4 | 6.274 | 20.24 | -0.33 |
| IRAS19172+1956 | 1 | 289.870 | 20.028 | 512 | 1.46 | 10.1 | 5.859 | 10.50 | 0.57 |
| IRAS19175+1042 | 1 | 289.989 | 10.803 | 544 | 3.26 | 7.9 | 5.127 | 7.92 | -0.18 |
| IRAS19176+1939 | 1 | 289.950 | 19.759 | 560 | 2.60 | 6.4 | 5.501 | 9.65 | 0.49 |
| IRAS19178+0747 | 4 | 290.071 | 7.888 | 200 | - | - | 3.335 | - | - |
| IRAS19178+1206 | 4 | 290.058 | 12.207 | - | - | - | 9.783 | - | - |
| IRAS19186+0315 | 1 | 290.299 | 3.349 | 497 | 3.64 | 6.2 | 4.65 | 5.86 | -0.52 |
| IRAS19186+1657 | 1 | 290.216 | 17.058 | 520 | 1.01 | 4.1 | 2.385 | 2.15 | 0.05 |
| IRAS19190+1128 | 1 | 290.361 | 11.566 | 856 | 4.80 | 7.6 | 4.022 | 7.14 | -0.16 |
| IRAS19190+3035 | 2 | 290.247 | 30.691 | 581 | 3.16 | 8.2 | 5.474 | 9.85 | 1.32 |
| IRAS19192+0922 | 1 | 290.403 | 9.466 | 539 | 1.32 | 5.3 | 1.379 | 1.40 | -0.06 |
| IRAS19195+1650 | 5 | 290.459 | 16.938 | - | - | - | - | - | - |
| IRAS19195+1747 | 1 | 290.434 | 17.886 | 519 | 2.12 | 5.0 | 3.744 | 4.01 | 0.11 |
| IRAS19195-1423 | 3 | 290.593 | -14.302 | 425 | 2.74 | 6.4 | 4.746 | 5.32 | -1.22 |
| IRAS19199+2100 | 4 | 290.544 | 21.116 | 127 | - | - | - | - | - |
| IRAS19200+1536 | 5 | 290.574 | 15.697 | - | - | - | 7.494 | - | - |
| IRAS19201+0631 | 4 | 290.662 | 6.627 | 179 | - | - | 8.666 | - | - |
| IRAS19201+1040 | 1 | 290.622 | 10.772 | 608 | 1.98 | 8.9 | 6.315 | 15.11 | -0.50 |
| IRAS19202+2009 | 1 | 290.606 | 20.260 | 782 | 3.06 | 5.9 | 4.428 | 7.94 | 0.36 |
| IRAS19204+0124 | 4 | 290.737 | 1.513 | - | - | - | 7.814 | - | - |
| IRAS19211+1606 | 4 | 290.855 | 16.211 | 236 | - | - | 3.448 | - | - |
| IRAS19225+3013 | 4 | 291.115 | 30.325 | 230 | - | - | - | - | - |
| IRAS19227+1700 | 4 | 291.248 | 17.115 | 275 | - | - | 2.074 | - | - |
| IRAS19235+1034 | 1 | 291.486 | 10.673 | 540 | 3.06 | 8.1 | 6.993 | 18.57 | -0.87 |
| IRAS19236+1359 | 1 | 291.493 | 14.087 | 665 | 1.73 | 6.2 | 4.104 | 5.92 | -0.11 |
| IRAS19236+2003 | 1 | 291.455 | 20.153 | 665 | 2.56 | 6.2 | 4.564 | 7.31 | 0.24 |
| IRAS19238+1159 | 1 | 291.563 | 12.086 | 772 | 0.94 | 11.7 | 7.478 | 31.98 | -1.16 |
| IRAS19244+1809 | 1 | 291.658 | 18.267 | 506 | 1.00 | 4.0 | 2.5 | 2.21 | 0.03 |
| IRAS19244+2015 | 4 | 291.651 | 20.357 | 137 | - | - | 6.051 | - | - |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|--------|------|------|------|--------|-------|-------|
| IRAS19246+1736 | 1 | 291.720 | 17.715 | 899 | 1.82 | 12.3 | 7.385 | 35.12 | 0.29 |
| IRAS19252+2201 | 1 | 291.846 | 22.132 | 564 | 1.00 | 3.9 | 1.541 | 1.57 | 0.07 |
| IRAS19253+1918 | 1 | 291.892 | 19.414 | 788 | 2.38 | 10.0 | 6.069 | 17.03 | 0.34 |
| IRAS19261+1435 | 1 | 292.119 | 14.698 | 633 | 3.62 | 8.0 | 5.971 | 13.37 | -0.31 |
| IRAS19269+0813 | 2 | 292.340 | 8.323 | 527 | 1.80 | 10.4 | 7.774 | 26.03 | -2.06 |
| IRAS19270+2209 | 1 | 292.300 | 22.270 | 446 | 0.97 | 4.1 | 3.711 | 3.45 | 0.13 |
| IRAS19270+2239 | 2 | 292.292 | 22.762 | 720 | 1.14 | 4.1 | 4.424 | 7.36 | 0.31 |
| IRAS19276+1500 | 2 | 292.474 | 15.113 | 551 | 2.50 | 6.2 | 5.024 | 7.64 | -0.19 |
| IRAS19276+2158 | 1 | 292.457 | 22.079 | 900 | 2.68 | 12.6 | 7.467 | 36.51 | 1.24 |
| IRAS19281+2308 | 4 | 292.560 | 23.250 | 432 | - | - | - | - | - |
| IRAS19282+2253 | 1 | 292.583 | 23.000 | 638 | 2.46 | 5.2 | 4.072 | 5.62 | 0.22 |
| IRAS19283+1421 | 1 | 292.658 | 14.466 | 468 | 2.76 | 5.8 | 4.06 | 4.23 | -0.14 |
| IRAS19283+1944 | 1 | 292.623 | 19.845 | 672 | 2.00 | 12.9 | 6.375 | 17.00 | 0.22 |
| IRAS19288+2923 | 2 | 292.710 | 29.499 | 680 | 1.22 | 5.1 | 3.648 | 4.89 | 0.45 |
| IRAS19296+2227 | 2 | 292.940 | 22.562 | 127 | 0.44 | 4.6 | 3.689 | 1.11 | 0.03 |
| IRAS19303+1553 | 1 | 293.149 | 15.995 | 637 | 3.86 | 7.3 | 6.143 | 14.56 | -0.40 |
| IRAS19304+2529 | 5 | 293.132 | 25.604 | - | - | - | 10.016 | - | - |
| IRAS19305+2410 | 1 | 293.166 | 24.282 | 677 | 2.46 | 6.0 | 4.302 | 6.59 | 0.28 |
| IRAS19307+1441 | 1 | 293.269 | 14.808 | 573 | 1.88 | 6.1 | 5.366 | 9.26 | -0.36 |
| IRAS19325+1725 | 4 | 293.685 | 17.538 | 760 | - | - | 5.403 | - | - |
| IRAS19326+1529 | 4 | 293.742 | 15.610 | 280 | - | - | - | - | - |
| IRAS19333+1918 | 1 | 293.878 | 19.418 | 630 | 2.74 | 4.9 | 3.868 | 5.06 | -0.04 |
| IRAS19338+1522 | 1 | 294.043 | 15.480 | 303 | 0.99 | 5.1 | 4.562 | 3.61 | -0.16 |
| IRAS19344+2114 | 1 | 294.156 | 21.353 | 474 | 1.98 | 6.7 | 4.785 | 5.98 | 0.02 |
| IRAS19344+2457 | 1 | 294.133 | 25.070 | 770 | 1.57 | 8.8 | 5.617 | 13.54 | 0.48 |
| IRAS19347+2755 | 1 | 294.186 | 28.033 | 639 | 3.24 | 7.2 | 5.947 | 13.34 | 0.80 |
| IRAS19349+1657 | 1 | 294.303 | 17.063 | 542 | 2.50 | 6.5 | 4.772 | 6.70 | -0.23 |
| IRAS19351+1922 | 1 | 294.337 | 19.482 | 1003 | 2.41 | 4.8 | 3.581 | 6.72 | -0.10 |
| IRAS19352+1914 | 1 | 294.359 | 19.348 | 862 | 2.84 | 6.2 | 4.072 | 7.36 | -0.12 |
| IRAS19352+2000 | 1 | 294.365 | 20.115 | 522 | 1.16 | 8.9 | 5.779 | 10.30 | -0.10 |
| IRAS19352+2030 | 1 | 294.350 | 20.616 | 518 | 0.78 | 8.0 | 5.126 | 7.57 | -0.04 |
| IRAS19356+1136 | 1 | 294.507 | 11.722 | 581 | 1.21 | 8.9 | -1.746 | 0.35 | -0.03 |
| IRAS19360+1629 | 2 | 294.570 | 16.604 | 492 | 2.42 | 5.1 | 4.042 | 4.39 | -0.19 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|--------|------|-------|------|--------|-------|-------|
| IRAS19360+3442 | 2 | 294.491 | 34.827 | 573 | 1.34 | 6.8 | 5.478 | 9.75 | 1.10 |
| IRAS19361+1805 | 1 | 294.584 | 18.211 | 591 | 2.64 | 6.4 | 5.525 | 10.24 | -0.30 |
| IRAS19365+1621 | 4 | 294.705 | 16.471 | 352 | - | - | 2.143 | - | - |
| IRAS19368+1935 | 1 | 294.768 | 19.718 | 827 | 1.89 | 10.8 | 7.372 | 32.40 | -0.62 |
| IRAS19374+1626 | 4 | 294.918 | 16.562 | - | - | - | - | - | - |
| IRAS19386+0155 | 4 | 295.285 | 2.042 | 858 | - | - | 4.472 | 8.81 | -1.54 |
| IRAS19395+1827 | 1 | 295.436 | 18.574 | 502 | 2.96 | 6.0 | 4.77 | 6.25 | -0.24 |
| IRAS19395+1949 | 1 | 295.431 | 19.942 | 560 | 2.48 | 5.4 | 4.058 | 4.97 | -0.13 |
| IRAS19412+2619 | 4 | 295.833 | 26.447 | 292 | - | - | 5.063 | 4.40 | 0.11 |
| IRAS19440+2251 | 4 | 296.538 | 22.990 | - | - | - | 10.135 | - | - |
| IRAS19462+2232 | 1 | 297.109 | 22.666 | 495 | 2.68 | 5.7 | 4.172 | 4.69 | -0.12 |
| IRAS19467+2213 | 1 | 297.219 | 22.355 | 540 | 2.06 | 10.4 | 7.121 | 19.70 | -0.60 |
| IRAS19479+2111 | 1 | 297.530 | 21.318 | 477 | 0.94 | 4.4 | 3.892 | 3.98 | -0.18 |
| IRAS19486+2215 | 1 | 297.702 | 22.387 | 515 | 2.28 | 5.5 | 5.039 | 7.24 | -0.27 |
| IRAS19490+1049 | 1 | 297.854 | 10.956 | 563 | 4.70 | 9.7 | 6.211 | 13.45 | -1.87 |
| IRAS19493+2905 | 1 | 297.838 | 29.217 | 1500 | 2.03 | 6.1 | 3.938 | 11.36 | 0.25 |
| IRAS19494+2939 | 4 | 297.873 | 29.792 | 441 | - | - | - | - | - |
| IRAS19508+2014 | 1 | 298.262 | 20.371 | 393 | 1.10 | 6.8 | 5.637 | 7.48 | -0.47 |
| IRAS19520+2729 | 1 | 298.536 | 27.617 | 781 | 2.24 | 10.0 | 5.96 | 16.06 | -0.03 |
| IRAS19534+1757 | 2 | 298.919 | 18.093 | 412 | 1.39 | 6.7 | 4.757 | 5.20 | -0.48 |
| IRAS19534+2802 | 1 | 298.875 | 28.180 | 678 | 1.46 | 11.2 | 7.739 | 32.11 | -0.04 |
| IRAS19536+3237 | 3 | 298.909 | 32.759 | 488 | 0.62 | 2.2 | -1.494 | 0.34 | 0.01 |
| IRAS19548+3035 | 4 | 299.202 | 30.734 | - | - | - | 6.125 | - | - |
| IRAS19565+3140 | 1 | 299.626 | 31.804 | 643 | 20.01 | 9.5 | 6.949 | 21.28 | 0.47 |
| IRAS19566+3423 | 4 | 299.635 | 34.526 | 101 | - | - | 7.539 | - | - |
| IRAS19567+5132 | 4 | 299.510 | 51.676 | - | - | - | 8.133 | - | - |
| IRAS19576+2814 | 4 | 299.913 | 28.385 | 195 | - | - | 6.683 | - | - |
| IRAS20043+2653 | 1 | 301.595 | 27.036 | 624 | 2.59 | 11.3 | 6.259 | 15.08 | -0.71 |
| IRAS20077-0625 | 2 | 302.616 | -6.270 | 405 | 1.43 | 2.6 | 3.186 | 2.49 | -0.87 |
| IRAS20094+3721 | 4 | 302.820 | 37.514 | 308 | - | - | 6.189 | - | - |
| IRAS20136+1309 | 4 | 304.002 | 13.316 | 113 | - | - | 7.41 | - | - |
| IRAS20137+2838 | 1 | 303.949 | 28.799 | 531 | 2.32 | 7.1 | 5.961 | 11.37 | -0.69 |
| IRAS20181+2234 | 1 | 305.091 | 22.730 | 553 | 1.92 | 8.2 | 4.675 | 6.52 | -0.88 |

Continued on next page

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|---------|---------|------|------|------|--------|-------|--------|
| IRAS20403+3143 | 2 | 310.585 | 31.908 | 535 | 1.84 | 6.8 | 4.488 | 5.81 | -0.64 |
| IRAS20440+0412 | 4 | 311.638 | 4.393 | - | - | - | 3.661 | - | - |
| IRAS20491+4236 | 1 | 312.744 | 42.803 | 1424 | 1.42 | 5.3 | 1.691 | 3.85 | -0.06 |
| IRAS20508+2011 | 4 | 313.286 | 20.377 | 755 | - | - | 8.161 | - | - |
| IRAS20516+2648 | 4 | 313.453 | 26.992 | 398 | - | - | 7.549 | - | - |
| IRAS20529+3013 | 1 | 313.773 | 30.414 | 569 | 1.00 | 2.1 | -1.443 | 0.40 | -0.07 |
| IRAS20531+2909 | 2 | 6.108 | 65.082 | 348 | 1.90 | 7.8 | 11.447 | 97.42 | -17.11 |
| IRAS20593+4902 | 4 | 315.241 | 49.237 | 125 | - | - | 7.038 | - | - |
| IRAS21091+4907 | 4 | 317.699 | 49.339 | - | - | - | 6.557 | - | - |
| IRAS21219+4516 | 4 | 320.952 | 45.490 | - | - | - | 7.368 | - | - |
| IRAS21282+5050 | 4 | 322.494 | 51.067 | - | - | - | 6.681 | - | - |
| IRAS21318+5631 | 2 | 323.345 | 56.743 | 985 | 2.02 | 14.0 | 6.276 | 22.87 | 1.47 |
| IRAS21456+6422 | 5 | 326.719 | 64.602 | - | - | - | -1.358 | - | - |
| IRAS21516+5245 | 4 | 328.365 | 52.999 | 632 | - | - | 4.723 | - | - |
| IRAS21554+6204 | 1 | 329.242 | 62.313 | 531 | 2.01 | 12.0 | 5.074 | 7.56 | 0.79 |
| IRAS21593+6813 | 4 | 330.128 | 68.473 | 389 | - | - | 7.393 | - | - |
| IRAS22130+5634 | 1 | 333.702 | 56.822 | 583 | 2.12 | 12.0 | 7.358 | 23.53 | 0.09 |
| IRAS22177+5936 | 1 | 334.865 | 59.856 | 1543 | 2.41 | 5.8 | 2.695 | 6.57 | 0.28 |
| IRAS22251+5406 | 4 | 336.771 | 54.358 | - | - | - | 6.73 | - | - |
| IRAS23412-1533 | 5 | 355.956 | -15.285 | - | - | - | 1.724 | - | - |
| IRAS23425+4338 | 2 | 356.260 | 43.924 | 417 | 0.92 | 2.0 | -0.731 | 0.42 | -0.13 |
| IRAS23496+6131 | 2 | 358.021 | 61.803 | 993 | 1.43 | 1.5 | -1.898 | 0.53 | 0.00 |
| IRAS23580+5633 | 4 | 0.144 | 56.838 | - | - | - | 9.211 | - | - |
| IRAS23592+6359 | 3 | 0.446 | 64.277 | 584 | 0.28 | 3.8 | 3.745 | 4.46 | 0.15 |

参考文献

- [Alcock et al.(1999)] Alcock, C., Allsman, R. A., Alves, D., et al. 1999, *Astrophysical Journal Supplement*, 124, 171
- [Baade(1944)] Baade, W. 1944, *Astrophysical Journal*, 100, 137
- [Battinelli, & Demers(2004)] Battinelli, P., & Demers, S. 2004, *Astronomy and Astrophysics*, 417, 479
- [Benjamin et al.(2005)] Benjamin, R. A., Churchwell, E., Babler, B. L., et al. 2005, *Astrophysical Journal Letters*, 630, L149
- [Becklin & Neugebauer(1968)] Becklin, E. E., & Neugebauer, G. 1968, *Astrophysical Journal*, 151, 145
- [Blommaert et al.(1998)] Blommaert, J. A. D. L., van der Veen, W. E. C. J., van Langevelde, H. J., et al. 1998, *Astronomy and Astrophysics*, 329, 991
- [Blitz & Spergel(1991)] Blitz, L., & Spergel, D. N. 1991, , 379, 631
- [Catchpole et al.(1979)] Catchpole, R. M., Robertson, B. S. C., Lloyd Evan, T. H. H., et al. 1979, *South African Astronomical Observatory Circular* 1, 61
- [Cox(1981)] Cox, J. P. 1981, *Science*, 211, 850
- [Camargo et al.(2015)] Camargo, D., Bonatto, C., & Bica, E. 2015, *Monthly Notices of the RAS*, 450, 4150
- [Carignan & Freeman(1985)] Carignan, C., & Freeman, K. C. 1985, *Astrophysical Journal*, 294, 494
- [Carollo et al.(1998)] Carollo, C. M., Stiavelli, M., & Mack, J. 1998, *Astronomical Journal*, 116, 68
- [Caswell & Haynes(1987)] Caswell, J. L., & Haynes, R. F. 1987, *Astronomy and Astrophysics*, 171, 261
- [Catchpole et al.(2016)] Catchpole, R. M., Whitelock, P. A., Feast, M. W., et al. 2016, *Monthly Notices of the RAS*, 455, 2216
- [Cohen et al.(1986)] Cohen, R. S., Dame, T. M., & Thaddeus, P. 1986, *Astrophysical Journal Supplement*, 60, 695
- [Cole & Weinberg(2002)] Cole, A. A., & Weinberg, M. D. 2002, *Astrophysical Journal Letters*, 574, L43
- [Collinge et al.(2006)] Collinge, M. J., Sumi, T., & Fabrycky, D. 2006, *Astrophysical Journal*, 651, 197
- [Dambis et al.(2015)] Dambis, A. K., Berdnikov, L. N., Efremov, Y. N., et al. 2015, *Astronomy Letters*, 41, 489
- [Dame et al.(1987)] Dame, T. M., Ungerechts, H., Cohen, R. S., et al. 1987, *Astrophysical Journal*, 322, 706
- [Dame et al.(2001)] Dame, T. M., Hartmann, D., & Thaddeus, P. 2001, *Astrophysical Journal*, 547, 792
- [Dwek et al.(1995)] Dwek, E., Arendt, R. G., Hauser, M. G., et al. 1995, *Astrophysical Journal*, 445, 716
- [Disney(1976)] Disney, M. J. 1976, *Nature*, 263, 573
- [Disney & Phillipps(1983)] Disney, M., & Phillipps, S. 1983, *Monthly Notices of the RAS*, 205, 1253
- [de Vaucouleurs(1958)] de Vaucouleurs, G. 1958, *Astrophysical Journal*, 128, 465
- [de Vaucouleurs(1959)] de Vaucouleurs, G. 1959, *Astrophysical Journal*, 130, 728
- [Downes et al.(1980)] Downes, D., Wilson, T. L., Bieging, J., et al. 1980, *AAPs*, 40, 379
- [Eggen et al.(1962)] Eggen, O. J., Lynden-Bell, D., & Sandage, A. R. 1962, *Astrophysical Journal*, 136, 748

- [Elias et al.(1982)] Elias, J. H., Frogel, J. A., Matthews, K., et al. 1982, *Astronomical Journal*, 87, 1029
- [Engels et al.(1987)] Engels, D., Schmid-Burgk, J., & Walmsley, C. M. 1987, *Late Stages of Stellar Evolution*, 87
- [Englmaier & Gerhard(1999)] Englmaier, P., & Gerhard, O. 1999, *Monthly Notices of the RAS*, 304, 512
- [Freeman(1970)] Freeman, K. C. 1970, *Astrophysical Journal*, 160, 811
- [Feast et al.(1989)] Feast, M. W., Glass, I. S., Whitelock, P. A., et al. 1989, *Monthly Notices of the RAS*, 241, 375
- [Feast & Whitelock(2000)] Feast, M. W., & Whitelock, P. A. 2000, *Monthly Notices of the RAS*, 317, 460
- [Feast(2009)] Feast, M. W. 2009, *AGB Stars and Related Phenomena*, 48
- [Freeman & Bland-Hawthorn(2002)] Freeman, K., & Bland-Hawthorn, J. 2002, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40, 487
- [Fox, & Wood(1982)] Fox, M. W., & Wood, P. R. 1982, *Astrophysical Journal*, 259, 198
- [Fritz et al.(2016)] Fritz, T. K., Chatzopoulos, S., Gerhard, O., et al. 2016, *Astrophysical Journal*, 821, 44
- [Georgelin & Georgelin(1976)] Georgelin, Y. M., & Georgelin, Y. P. 1976, *Astronomy and Astrophysics*, 49, 57
- [Gerasimovic(1928)] Gerasimovic, B. P. 1928, *Proceedings of the National Academy of Science*, 14, 963
- [Gerhard(2006)] Gerhard, O. 2006, *EAS Publications Series*, 89
- [Gillessen et al.(2009)] Gillessen, S., Eisenhauer, F., Fritz, T. K., et al. 2009, *Astrophysical Journal Letters*, 707, L114
- [Grabelsky et al.(1988)] Grabelsky, D. A., Cohen, R. S., Bronfman, L., et al. 1988, *Astrophysical Journal*, 331, 181
- [Hamadache et al.(2006)] Hamadache, C., Le Guillou, L., Tisserand, P., et al. 2006, *Astronomy and Astrophysics*, 454, 185
- [Herwig(2005)] Herwig, F. 2005, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 43, 435
- [Honma et al.(2012)] Honma, M., Nagayama, T., Ando, K., et al. 2012, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, 136
- [Yao et al.(2017)] Yao, Y., Liu, C., Deng, L., et al. 2017, *Astrophysical Journal Supplement*, 232, 16
- [Ishihara et al.(2011)] Ishihara, D., Kaneda, H., Onaka, T., et al. 2011, *Astronomy and Astrophysics*, 534, A79
- [Ita et al.(2004)] Ita, Y., Tanabé, T., Matsunaga, N., et al. 2004, *Monthly Notices of the RAS*, 353, 705
- [Ita, & Matsunaga(2011)] Ita, Y., & Matsunaga, N. 2011, *Monthly Notices of the RAS*, 412, 2345
- [Jimenez-Esteban et al.(2006)] Jimenez-Esteban, F. M., Garcia-Lario, P., Engels, D., et al. 2006, *VizieR Online Data Catalog*, J/A+A/458/533
- [Kapteyn & van Rhijn(1920)] Kapteyn, J. C., & van Rhijn, P. J. 1920, *Astrophysical Journal*, 52, 23
- [Kapteyn(1922)] Kapteyn, J. C. 1922, *Bulletin Astronomical Institute of the Netherlands*, 1, 69
- [Kapteyn(1909)] Kapteyn, J. C. 1909, *Astrophysical Journal*, 30, 284
- [Karakas(2010)] Karakas, A. I. 2010, *Monthly Notices of the RAS*, 403, 1413
- [Kerr(1962)] Kerr, F. J. 1962, *Monthly Notices of the RAS*, 123, 327

- [Kolena & Pataki(1977)] Kolena, J., & Pataki, L. 1977, *Astronomical Journal*, 82, 150
- [Kodric et al.(2013)] Kodric, M., Riffeser, A., Hopp, U., et al. 2013, *Astronomical Journal*, 145, 106
- [Kwon & Suh(2014)] Kwon, Y.-J., & Suh, K.-W. 2014, *Journal of Korean Astronomical Society*, 47, 123
- [Launhardt et al.(2002)] Launhardt, R., Zylka, R., & Mezger, P. G. 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 384, 112
- [Larson & Tinsley(1978)] Larson, R. B., & Tinsley, B. M. 1978, *Astrophysical Journal*, 219, 46
- [López-Corroira et al.(2007)] López-Corroira, M., Cabrera-Lavers, A., Mahoney, T. J., et al. 2007, *Astronomical Journal*, 133, 154
- [Lattanzio(1989)] Lattanzio, J. C. 1989, , 344, L25
- [Mackey & van den Bergh(2005)] Mackey, A. D., & van den Bergh, S. 2005, *Monthly Notices of the RAS*, 360, 631
- [Marigo et al.(2013)] Marigo, P., Bressan, A., Nanni, A., et al. 2013, *Monthly Notices of the RAS*, 434, 488
- [Marigo et al.(2017)] Marigo, P., Girardi, L., Bressan, A., et al. 2017, *Astrophysical Journal*, 835, 77
- [Matsunaga et al.(2005)] Matsunaga, N., Fukushi, H., & Nakada, Y. 2005, *Monthly Notices of the RAS*, 364, 117
- [Matsunaga et al.(2009)] Matsunaga, N., Kawadu, T., Nishiyama, S., et al. 2009, *Monthly Notices of the RAS*, 399, 1709
- [Menzies et al.(2010)] Menzies, J. W., Whitelock, P. A., Feast, M. W., et al. 2010, *Monthly Notices of the RAS*, 406, 86
- [Menzies et al.(2019)] Menzies, J. W., Whitelock, P. A., Feast, M. W., et al. 2019, *Monthly Notices of the RAS*, 483, 5150
- [Nakada et al.(1991)] Nakada, Y., Onaka, T., Yamamura, I., et al. 1991, *Nature*, 353, 140
- [Nakashima et al.(2000)] Nakashima, J.-. ichi ., Jiang, B. W., Deguchi, S., et al. 2000, *Publications of the ASJ*, 52, 275
- [Nishiyama et al.(2006)] Nishiyama, S., Nagata, T., Sato, S., et al. 2006, *Astrophysical Journal*, 647, 1093
- [Nishiyama et al.(2013)] Nishiyama, S., Yasui, K., Nagata, T., et al. 2013, *Astrophysical Journal Letters*, 769, L28
- [Oort & Rougoor(1960)] Oort, J. H., & Rougoor, G. W. 1960, *Monthly Notices of the RAS*, 121, 171
- [Popowski et al.(2005)] Popowski, P., Griest, K., Thomas, C. L., et al. 2005, *Astrophysical Journal*, 631, 879
- [Quinn et al.(1993)] Quinn, P. J., Hernquist, L., & Fullagar, D. P. 1993, *Astrophysical Journal*, 403, 74
- [Rattenbury et al.(2007)] Rattenbury, N. J., Mao, S., Sumi, T., et al. 2007, *Monthly Notices of the RAS*, 378, 1064
- [Reid et al.(2014)] Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., et al. 2014, *Astrophysical Journal*, 783, 130
- [Reid et al.(2019)] Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., et al. 2019, *Astrophysical Journal*, 885, 131
- [Roberts & Haynes(1994)] Roberts, M. S., & Haynes, M. P. 1994, *Annual Review of Astron and Astro*

- phys, 32, 115
- [Salpeter(1959)] Salpeter, E. E. 1959, *Astrophysical Journal*, 129, 608
- [Sawada et al.(2004)] Sawada, T., Hasegawa, T., Handa, T., et al. 2004, *Monthly Notices of the RAS*, 349, 1167
- [Schmidt(1959)] Schmidt, M. 1959, *Astrophysical Journal*, 129, 243
- [Schneider et al.(2010)] Schneider, D. P., Richards, G. T., Hall, P. B., et al. 2010, *Astronomical Journal*, 139, 2360
- [Searle et al.(1973)] Searle, L., Sargent, W. L. W., & Bagnuolo, W. G. 1973, *Astrophysical Journal*, 179, 427
- [Searle & Sargent(1972)] Searle, L., & Sargent, W. L. W. 1972, *Astrophysical Journal*, 173, 25
- [Searle & Zinn(1978)] Searle, L., & Zinn, R. 1978, *Astrophysical Journal*, 225, 357
- [Smith(2014)] Smith, N. 2014, *Annual Review of Astron and Astrophys*, 52, 487
- [Sofue & Rubin(2001)] Sofue, Y., & Rubin, V. 2001, *Annual Review of Astron and Astrophys*, 39, 137
- [Solomon et al.(1987)] Solomon, P. M., Rivolo, A. R., Barrett, J., et al. 1987, *Astrophysical Journal*, 319, 730
- [Soszyński et al.(2009)] Soszyński, I., Udalski, A., Szymański, M. K., et al. 2009, *Acta Astronomica*, 59, 239
- [Stanek et al.(1994)] Stanek, K. Z., Mateo, M., Udalski, A., et al. 1994, *Astrophysical Journal Letters*, 429, L73
- [Sumi et al.(2006)] Sumi, T., Woźniak, P. R., Udalski, A., et al. 2006, *Astrophysical Journal*, 636, 240
- [Trabucchi et al.(2019)] Trabucchi, M., Wood, P. R., Montalbán, J., et al. 2019, *Monthly Notices of the RAS*, 482, 929
- [Tully & Fisher(1977)] Tully, R. B., & Fisher, J. R. 1977, *Astronomy and Astrophysics*, 500, 105
- [Umurhan et al.(1998)] Umurhan, O. M., Tao, L., & Spiegel, E. A. 1998, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 867, 298
- [Vallée(2008)] Vallée, J. P. 2008, *Astronomical Journal*, 135, 1301
- [van Albada et al.(1985)] van Albada, T. S., Bahcall, J. N., Begeman, K., et al. 1985, *Astrophysical Journal*, 295, 305
- [van der Kruit(1990)] van der Kruit, P. C. 1990, *The Galactic and Extragalactic Background Radiation*, 85
- [van der Kruit & Searle(1982)] van der Kruit, P. C., & Searle, L. 1982, *Astronomy and Astrophysics*, 110, 61
- [van der Kruit & Allen(1978)] van der Kruit, P. C., & Allen, R. J. 1978, *Annual Review of Astron and Astrophys*, 16, 103
- [van der Veen, & Habing(1988)] van der Veen, W. E. C. J., & Habing, H. J. 1988, *Astronomy and Astrophysics*, 194, 125
- [Walker & Terndrup(1991)] Walker, A. R., & Terndrup, D. M. 1991, *Astrophysical Journal*, 378, 119
- [Weiland et al.(1994)] Weiland, J. L., Arendt, R. G., Berriman, G. B., et al. 1994, *Astrophysical Journal Letters*, 425, L81
- [White & Rees(1978)] White, S. D. M., & Rees, M. J. 1978, *Monthly Notices of the RAS*, 183, 341

- [Whitelock & Catchpole(1992)] Whitelock, P., & Catchpole, R. 1992, The Center, Bulge, and Disk of the Milky Way, 103
- [Whitelock et al.(2000)] Whitelock, P., Marang, F., & Feast, M. 2000, Monthly Notices of the RAS, 319, 728
- [Whitelock et al.(2006)] Whitelock, P. A., Feast, M. W., Marang, F., et al. 2006, Monthly Notices of the RAS, 369, 751
- [Wood et al.(1983)] Wood, P. R., Bessell, M. S., & Fox, M. W. 1983, Astrophysical Journal, 272, 99
- [Wood et al.(1998)] Wood, P. R., Habing, H. J., & McGregor, P. J. 1998, Astronomy and Astrophysics, 336, 925
- [Wood et al.(1999)] Wood, P. R., Alcock, C., Allsman, R. A., et al. 1999, Asymptotic Giant Branch Stars, 151
- [Wood(2000)] Wood, P. R. 2000,PASA, 17, 18
- [Wood & Cahn(1977)] Wood, P. R., & Cahn, J. H. 1977, Astrophysical Journal, 211, 499
- [Wood & Sebo(1996)] Wood, P. R., & Sebo, K. M. 1996, Monthly Notices of the RAS, 282, 958
- [井上 (2015)] 井上幹一郎, 鹿児島大学 2014 年度修士論文,2015
- [山下 (2015)] 山下智志, 鹿児島大学 2014 年度修士論文,2015