

星が担う物質の集積と離散

中川亜紀治 (鹿児島大学), 廣田朋也 (NAOJ)

今井裕 (鹿児島大学)、須藤広志 (岐阜大学)、杉山孝一郎 (NARIT, NAOJ)、米倉覚則 (茨城大学)、元木業人 (山口大学)

【1】構成メンバー

- ・ **AGB班** 中川亜紀治、今井裕 (鹿児島大学)、須藤広志 (岐阜大学)、
- ・ **SFR班** 杉山孝一郎 (NARIT, NAOJ)、廣田朋也 (NAOJ)、米倉覚則 (茨城大学)、元木業人 (山口大学)

【2】活動履歴

親WGにあたる「VLBI将来計画WG」に合わせて「星WG」を実施（次項参照）。

【3】議論の方針

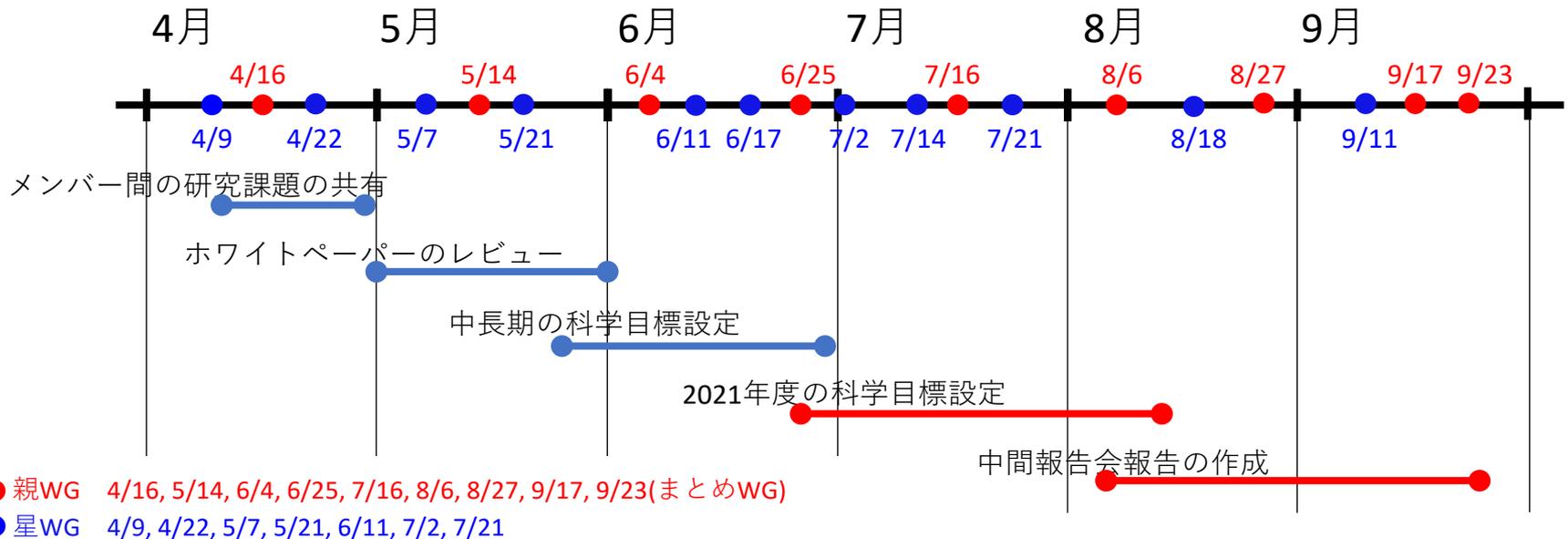
構成メンバーの関心が高い科学的テーマを、既存の観測装置などから来る制限に縛られることなく取り上げて議論する。また2021年度までの直近の時間と2022年度以降の2つの時間スケール議論を進めた。

【4】これまでの検討内容の報告

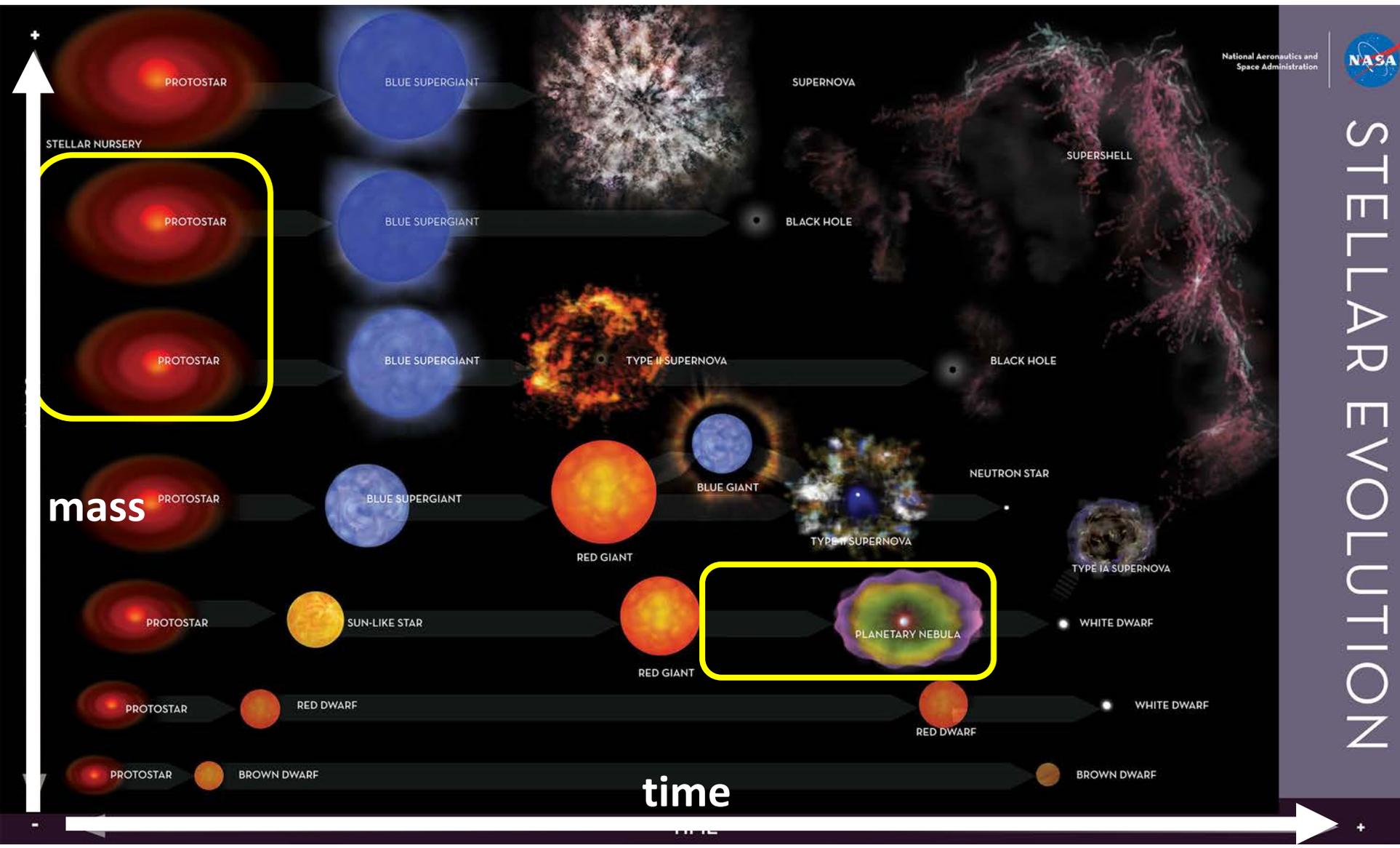
星WGをさらに二班（AGB班とSFR班）に分けて、これまでの検討内容を報告する。

星WGの活動履歴

第1回	4月 9日(木)		キックオフ、進め方の決定など
第2回	4月22日(水)	18:00	各自の研究や課題を紹介し、共有を図る
第2.5回	5月 7日(水)	18:00	各自の研究や課題を紹介し、共有を図る、つづき
第3回	5月21日(木)	10:30	個人的視点を入れつつ各種ホワイトペーパーをレビューする
第4回	6月11日(木)	13:00	星にちなんだ科学目標のアイデア紹介
第4.5回	6月17日(木)	18:00	星にちなんだ科学目標のアイデア紹介 (つづき)
第5回	7月 2日(木)	10:30	各自の計画の具体案を提示 杉山、元木、中川
第5.5回	7月14日(木)	18:00	各自の計画の具体案を提示 (つづき) 須藤、今井、米倉、廣田
第6回	7月21日(火)	18:00	「SFR班」と「AGB班」に分かれ、提案の大方針を提示して議論 杉山、中川
第7回	8月18日(火)	15:00	班ごとに提案書たたき台を提示
第8回	9月11日(金)	13:00	中間報告会での発表内容を整理



星WGがカバーする領域



AGB班 研究の意義

2つの柱

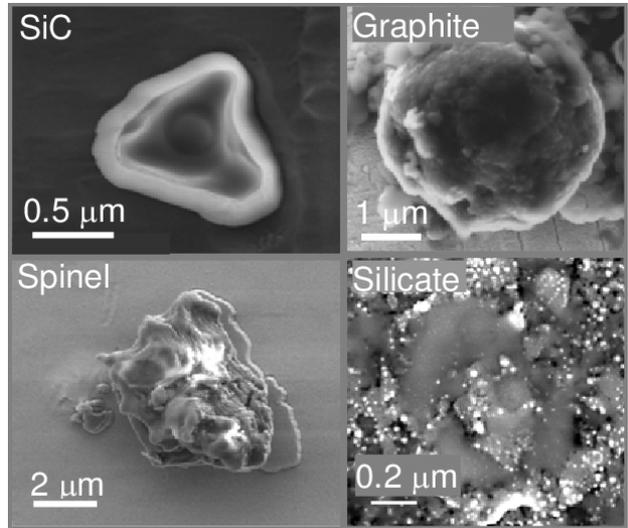
1. 星間物質、特にダスト供給源としてのAGB星とその進化
 - ・ 星間物質(ガス・ダスト) 拡散のメカニズムの理解
 - ・ AGBからPost-AGB, PPNへ至る進化の理解
2. AGB星を用いた天の川銀河の研究
 - ・ 様々な質量のAGB星と、天の川銀河構成要素(渦状腕など)との相関
 - ・ 天の川銀河中心部の構造形成史と星形成史
(中心核バルジと中心核ディスク)

AGB班 研究の意義

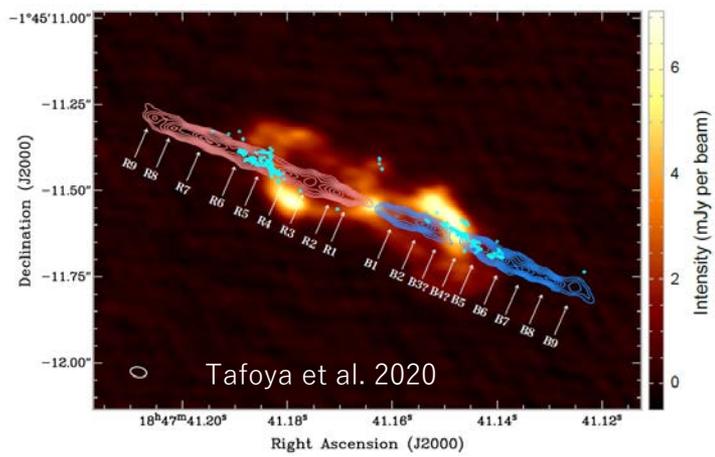
ダストや物質の供給源としてのAGB星とその進化

- 脈動するAGB星は宇宙に存在するダスト(個体微粒子)の大部分の供給源である。脈動や変光、及びダストやガスを含む物質の放出は互いに密接に関係しており、その関係性(時時間的/量的関係)は解明すべき対象である。しかし、最も物質の放出量が多い(=質量放出率が高い) 時期の可視光観測はそのダストの厚みの為に困難であり、電波及び赤外線観測が重要となる。またVLBIによる星周物質の運動の検出は直接的な放出の様子を捉える貴重な手段でもある。
- ダスト供給メカニズムの理解
 - 星の脈動と質量放出量の相関
 - 物質放出時の加速機構の解明
 - 星近傍から外層、星間空間までの分布や運動(加速など)の描像
 - 化学組成(C/O比)による主要な物質放出過程の違い
- AGBからPost-AGBへ至る進化の理解
 - Mira → OH/IR → 非変光OH/IR → PPN → PN
 - 空間的な物質放出異方性の起源(連星系や磁場の影響など)
 - 長周期側の新たな変光周期と光度の関係

様々なダスト
(左上)SN起源、(ほか) AGB星起源



Hoppe. 2010

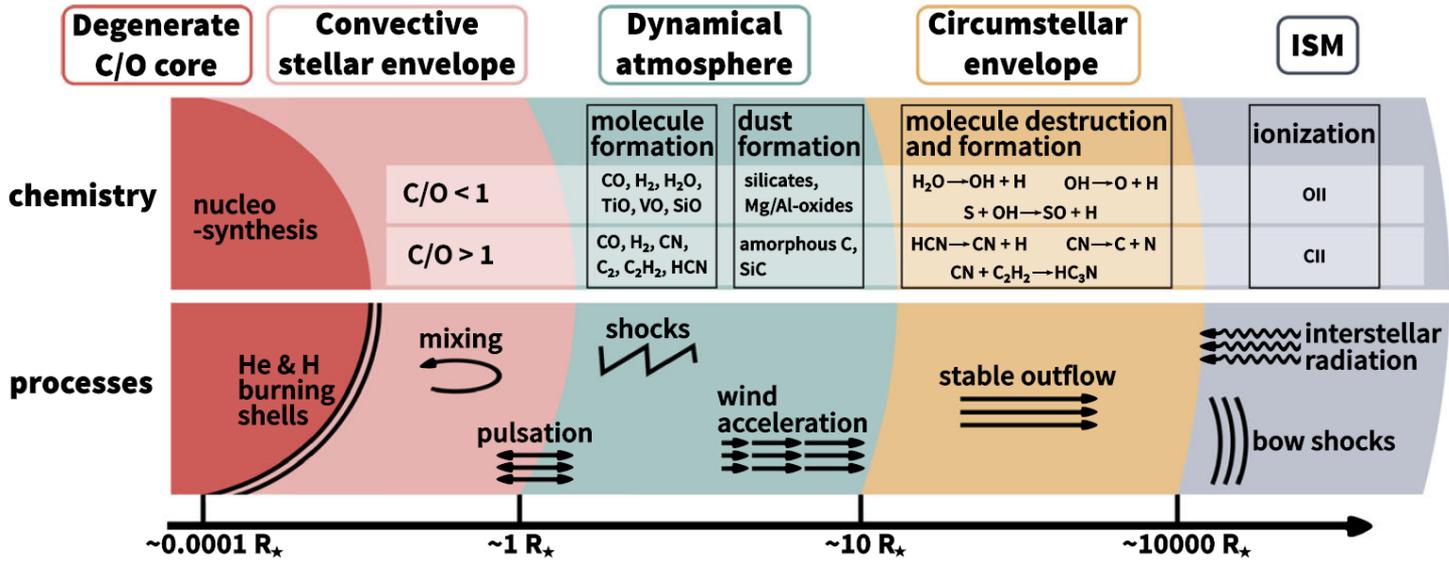
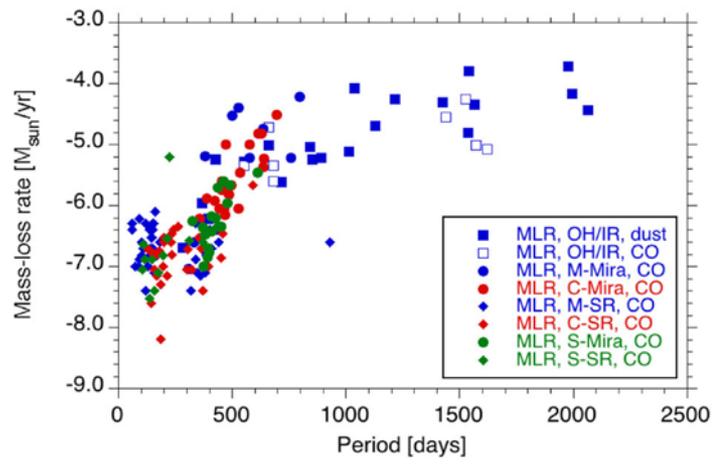


AGB班 研究の意義

ダスト供給源としてのAGB星とその進化

- 様々な質量放出率のAGB星の観測には広い周期範囲が必要
- 進化段階や化学組成に応じて変わる主要なメーザー
 - 進化段階；ダスト量の夥多でメーザー励起環境がどう変化するか
 - 化学組成；炭素星に特徴的なHCNで酸素星との違いを調べる
- メーザーの励起機構の理解；星表面のSiOメーザーを活用
 - 衝突励起と放射励起、脈動変光に伴い切り替わるのか
- 空間的異方性の確認手段としてのメーザー位置天文

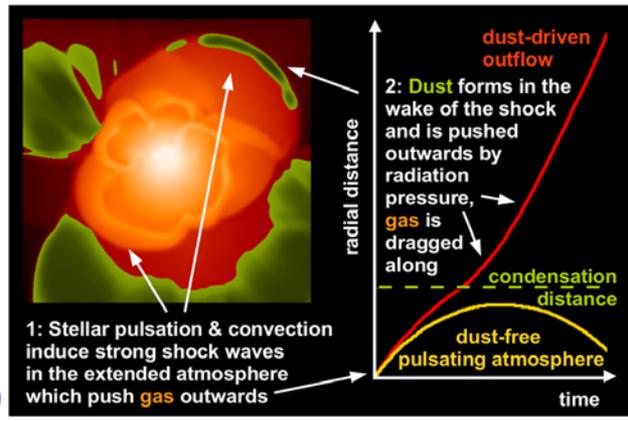
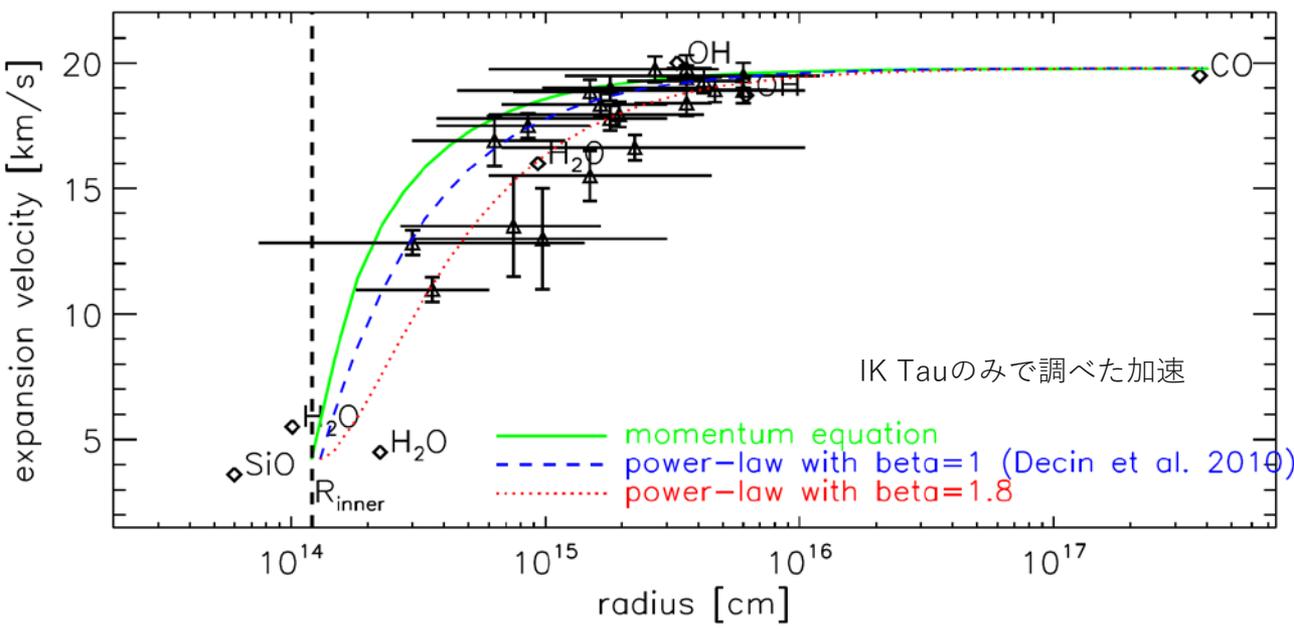
S. Höfner, H. Olofsson (2018)



AGB班 研究の意義

ダスト供給源としてのAGB星とその進化

- 星周の速度場の変化
 - 表面近くの膨張・落下運動；SiOメーザー
 - 星表面から最外層までの速度場の空間/時間的变化； SiO → H₂O → OH
 - 加速と磁場の関係
 - 放射圧 and/or 磁気駆動 → 物質放出の空間的/運動的異方性を捉える
- 表面運動 加速領域 終端速度

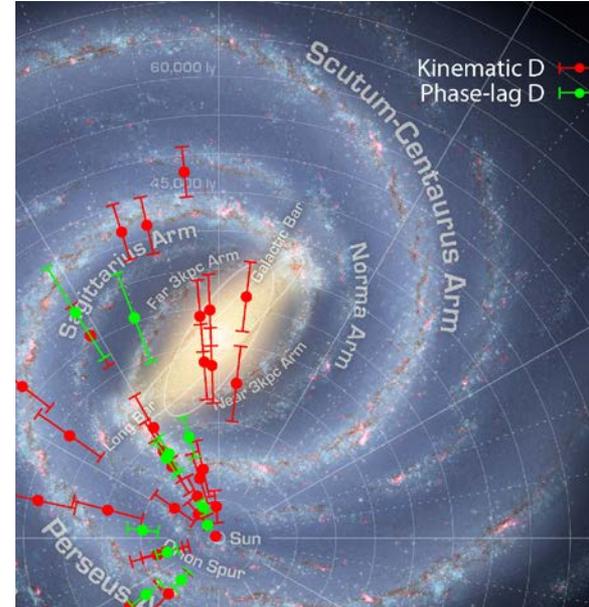
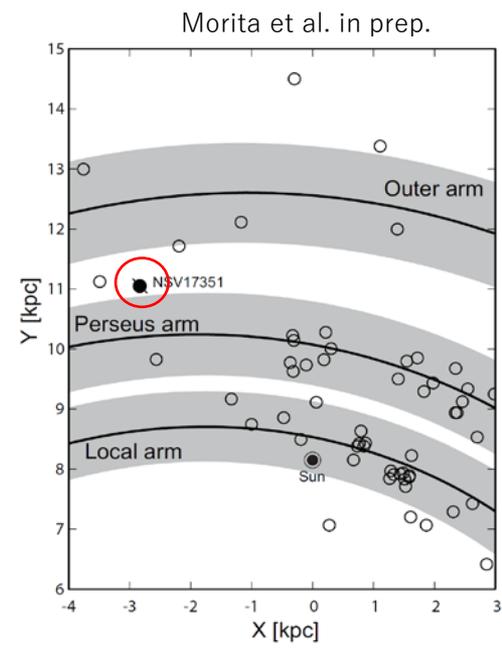


S. Höfner, H. Olofsson (2018)

AGB班 研究の意義

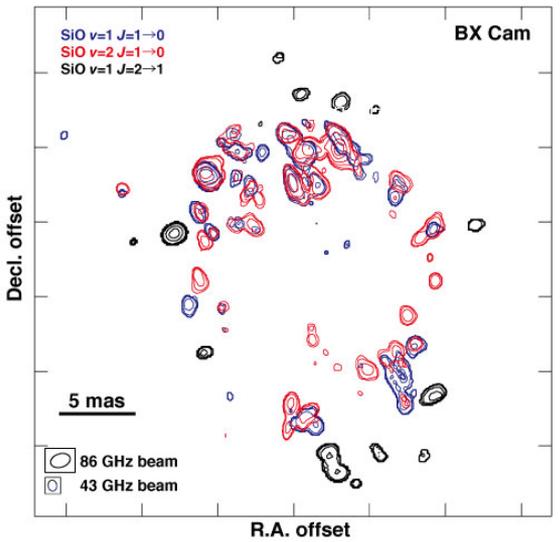
AGB星を用いた天の川銀河の研究

- VLBIによるAGB星の計測量 (x, y, z, V_x, V_y, V_z) を利用し、銀河系の進化を理解する。とくに渦状腕と中心核バルジおよび中心核ディスクを対象とした研究を立案する。
- 渦状腕との相関
 - 重いAGB星(Extreme-OH/IR星)を利用
 - 明るく時間的に高安定のメーザー(H₂O, SiO)が付随
 - 年齢に1-2億年の制限がつく → 渦状腕/spurとの関係
 - 空間分布やI-V図による他の若い星との比較
- 中心核バルジと中心核ディスク(100-200pcスケール)
 - バルジのOH/IR星は大質量と考えられる
(変光周期が長いほど高いSiOメーザーの検出率が知られる)
 - メーザー源を用いて運動を把握 → 銀河回転に順行逆行
 - 年齢制限と位置天文情報でバルジ領域の構造形成や星形成史の解明に寄与
 - 固有運動情報だけでも活用が可能
 - 感度向上に向けた環境整備が必要 (野辺山45mの活用)



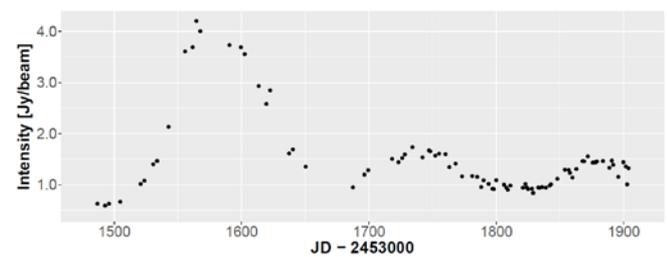
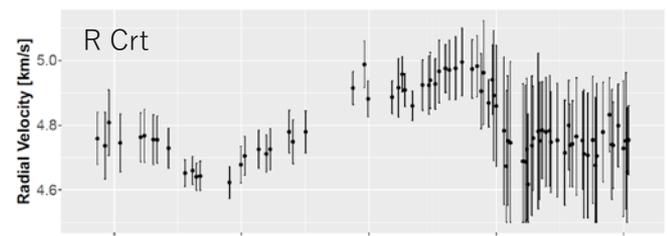
AGB班 独自性と優位性, 新規性

- 習熟した22GHz, 43GHz 位置天文の手法を活用
 - QSO準拠位相補償VLBIによる年周視差の計測
 <近年の広帯域化改造による43GHz 年周視差計測の性能向上>
 - Self Calibrationによる星周物質の分布と運動の計測
 - 多周波間位相補償によるSiOメーザー重ね合わせ



Imai et al. (20XX)

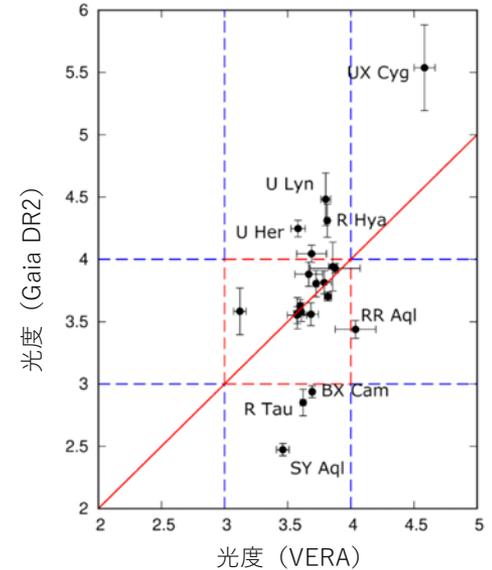
- 様々な時間スケールの観測に挑む
 - VLBI観測：
 - min, hr, day, week, month, yrスケールを織り交ぜた観測で、メーザー励起、星間シンチレーション、加速などに迫る
 - 単一鏡観測：
 - 過去のデータとの結合により数十年のデータ活用が可能
 - 準自前アレイによる機動性による突発現象への対応



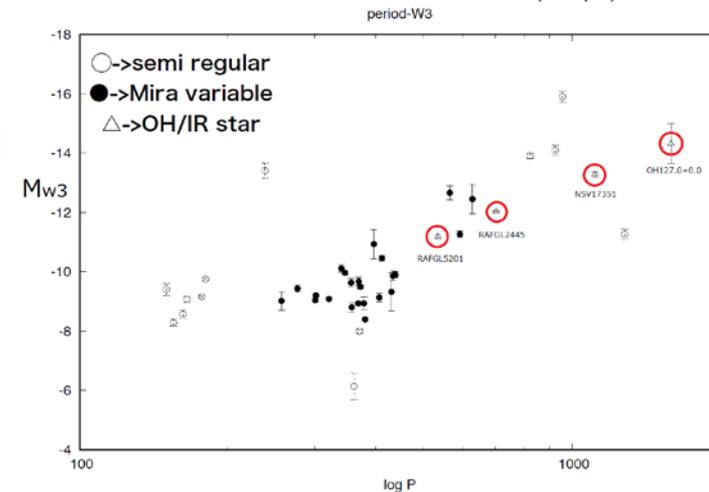
Sudou et al. (2017)

AGB班 独自性と優位性, 新規性

- 電波VLBIの優位性を再確認
 - auスケールの星周構造や運動の把握にはVLBIが不可欠
 - AGB星は厚いダストをまとい、可視光観測が困難
 - Gaia DR2 にも光学重心の揺らぎによる影響が残る
 <Gaiaとの棲み分けまたは協調の視点>
- VLBIによるAGB星位置天文カタログとしては最大の規模をVERAで達成
 - 新たな周期光度関係の存在が示唆される
 - 重いAGB星(Extreme-OH/IR星)でもすでに準備研究(位置天文VLBI)が進む
- 脈動変光や表面化学組成は近/中間赤外領域で観測
 - 非変光星OH/IR星の発見と進化上の位置づけ
 - Long secondary period の理論研究で日本は先行
 <TAOや他の理論グループとの協力>
- 次世代赤外線位置天文計画との連携
 <Small-JASMINEを見据えた研究>



周期光度関係 @WISE W3-band (11.6 μm)



AGB星 新規性(将来計画として)

- AGB, Post-AGB星の磁場観測

直線偏波, ゼーマン効果の検出に挑む

AGB星における磁場観測の観点は我々のコミュニティでは経験が浅く、新規性の要素が非常に強い。

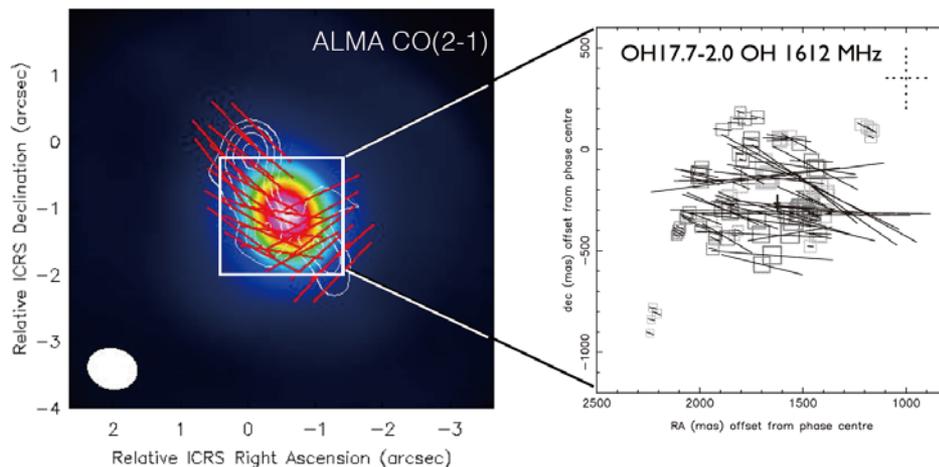
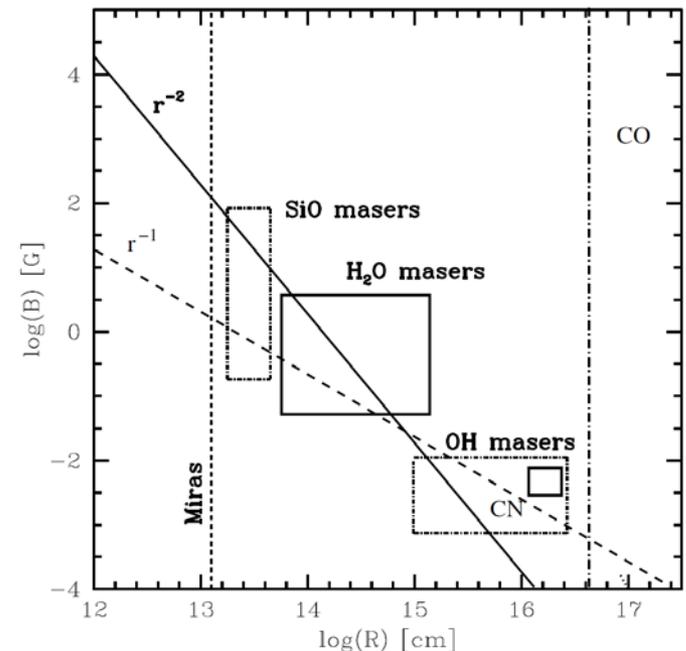


Figure 2. A comparison of the magnetic field determined using ALMA observations of the Goldreich-Kylafis effect on circumstellar CO (left, Tafaya & Vlemmings, in prep.) and MERLIN observations of OH masers (right, Bains et al. 2003) around the post-AGB star OH 17.7-2.0. These observations show that the CO and OH trace the same large-scale magnetic field.



AGB班 研究計画と必要な準備

- 提案する研究は星表面から最外層までの広い空間スケールでのメーザー分布や速度場、そしてその時間変化を多くの星について観測することで達成できる
- 天体の選定
 - Mira, OH/IR, SR, PPNなど種別を代表する星を厳選してVLBI観測
→ESTEMAでBX Cam, NML Cyg, o Cet, S CrBなど数天体
 - OH/IR星の新たな周期光度関係確立のため周期方向に散らして天体を選定
→VERAプロジェクトで進行中の星を含め数十の候補天体
- 銀河中心バルジに属するAGBをいかにして探すかが大きな課題
 - AGB星メーザーの本質的強度条件や8kpcの距離による感度不足をいかに乗り越えて検出するか
- 潜在的観測天体数は多く (10,000 H₂O, SiO masers in the whole Galaxy)、単一鏡の対象対象AGB星はすでに数100-1000天体のリストあり。
 - 次世代の第サンプル研究を明るい天体の研究で先取り
- BAaDE, GASKAP, THORなどの大規模な測光モニターデータを活用

AGB班 研究計画と必要な準備

- 周波数：1.6GHz(OH), 22GHz(H₂O), 43GHz(SiO), 86GHz(SiO), 88.6GHz(HCN)
- 観測装置、アレイ
 - 電波観測：VERA(2beam位相補償装置として), KAVA, EAVN, 臼田1.6GHz
 - 赤外線観測：TAO, Small-JASMINE, IRSF, 鹿児島1m
- 観測頻度：VLBIについてはmin, hr, day, week, month, yrスケールを織り交ぜた観測
- 開発項目（優先順位）
 - 43GHz位置天文はVERA4局2ビーム位相補償以外に困難。代替手法の確立が必要。
 - K/Q (22G/43GHz) 同時観測
 - 86GHz受信機の導入(VERA2ビームへ? コンパクト化が必須)、
 - 1.6GHz 観測環境の確保
- 他波長研究者、理論家との連携
 - 脈動変光Phaseとスペクトル、星周物質運動との関連付け、予測
 - C/O比とレーザー現象論の関連付け、予測
 - 非変光星の正体

AGB班 研究計画と必要な性能

星表面からの距離 (R^*)	現象	周波数	アレイ、基線長	サイズ、分解能	観測技法	開発項目
1-2	脈動 SiO maser 励起 SiO, H ₂ O ガス 磁場?	43GHz (SiO) 86GHz (SiO)	VERA, KaVA, EAVN (1000km) 単一鏡	1au 1mas	高頻度ムービー 年周視差 内部相対運動 単一鏡 偏波(磁場)?	偏波対応 2 beam 機構維持
10-数10	加速 H ₂ O maser 励起 ダスト形成 HCN maser? 磁場?	22GHz (H ₂ O) 88GHz (HCN)?	VERA, KaVA, EAVN (1000km) 単一鏡	10-数10au 1mas	年周視差 内部相対運動 単一鏡 偏波(磁場)?	偏波対応 2 beam 機構維持
1000-10000	加速 定常流 終端速度 OHへの乖離 OH maser 磁場?	22GHz (H ₂ O) (薄いH ₂ O?) 1.6GHz (OH)	短基線(100km)が 欠かせない 単一鏡 SKA	数10mas	年周視差 内部相対運動 単一鏡	1.6GHz (OH) 観測
星間空間	最外層ダストと ISMの相互作用		SKA ngVLA	asec	CO連続波	
銀河系	渦状腕理論 中心核バルジ 中心核ディスク	22GHz (H ₂ O) 43GHz (SiO)	VERA, KaVA, EAVN (1000km) 野辺山は重要?	1mas	年周視差 固有運動	感度向上

AGB班 推進計画

• 2020年度の状況

- VERAのAGB星位置天文プロジェクト進行中
- ESTEMAによる代表的AGB星のVLBI観測
- HINOTORI：野辺山45m鏡3バンド同時観測システムの構築

• 2022年3月までの研究

- Extreme-OH/IR星の位置天文初期成果：星周メーザー分布、H₂Oメーザーの終端速度近くまでの加速、OHメーザーとの類似性
- 化学組成モデルとメーザー現象論の関連付け
- ESTEMA第1期 (BX Cam, NML Cygモニター) 終了
- 3バンド同時観測手法の確立、HCNメーザーのVLBI検出

• 2022年4月以降 (第4期中期計画~2027年度)

- 偏波観測による磁場の検出？課題、開発項目は？
- Post-VERAアレイによる43GHz位置天文手法の確立 → 銀河系中心バルジ/ディスクへ
- 86GHz受信機の整備、HCNメーザーの検出
- ESTEMA 第2期 (o Cet ほか, 3バンド同時観測)