

# 研究報告書

## 概要

スペイン・アンダルシア天体物理学研究所の Jose Francisco Gomez 氏を鹿児島大学及び国立天文台に招聘し、主にここ数年来共同で進めてきた星周メーザー源の研究についての科学的考察と今後の戦略について議論を深めた。詳細なメーザー源構造の把握と年周視差計測を可能にする VLBI (超長基線電波干渉法) (日本の VERA 等)、メーザー源の全体像を詳細に把握するミリ波・サブミリ波熱的放射の観測 (ALMA)、及び大規模なメーザー源掃天探査 (SPLASH 計画や GASKAP 計画) と重要メーザー源の単一鏡継続的追跡観測 (豪州 Tidbinbilla 及びスペイン Robledo 70m 電波望遠鏡) を今後実施していき、星形成や進化末期恒星質量放出の仕組みの解明や天の川銀河力学構造の把握に資するための具体的な計画を練り上げるに至った。以下この報告書の内容は、招聘研究者及び受入研究者が直接やりとりを行った鹿児島大学での活動 (11/4-11/29) に絞っている。しかし、招聘研究者からの報告内容と補完的なものになるようにまとめた。

## 1. 経緯

招聘研究者及び受入研究者は、宇宙メーザー、主に水酸基 (OH)、水 ( $H_2O$ )、一酸化珪素 (SiO) 分子が放出するメーザー放射の特殊性に注目し、高い角分解能を実現する日本国内外の優れた電波干渉計を駆使して研究を進めてきた。これらメーザー放射は、励起に必要な特殊な物理環境、それを実現する恒星進化上のごく短い期間でしか見られない。それにも関わらず、これらは多くの星形成領域や進化末期星に見られ、個性豊かな観測的特徴を持つ。恒星の寿命 (大質量星でも  $>10^6$  年) に対して非常に短いメーザーが観測される期間 ( $10^3$ - $10^5$  年) の間に、恒星進化が急速に進み、その様子がコンパクトな多数のメーザースポットの集団が成す空間分布や三次元運動によって逐一浮き彫りにされていることを意味する。招聘者と受入研究者は当初、個別に同様な分野の研究を進めてきた。しかし、2009 年から発足した GASKAP (Galactic ASKAP Spectral Line Survey、豪州 Australian SKA Pathfinder-ASKAP を使った天の川銀河系に対する中性水素及び水酸基放射の広域掃天探査計画) へ共に steering committee メンバーとして合流した。このことを契機にお互いの情報交換が進み、自らによる新規観測計画の立案・推進の契機が高まった。その範疇は、GASKAP と SPLASH (Southern Parkes Large Area Survey for Hydroxyl、GASKAP に先駆けて行われた Parkes 64m 電波望遠鏡を用いた天の川銀河面の水酸基放射掃天探査) がカバーするセンチ波から ALMA (Atacama Large Millimeter-submillimeter Array) がカバーするミリ波・サブミリ波に及ぶ非常に広い電波波長バンド域となっている。今回の招聘事業は、これらを包括的に深く議論する機会をもたらすこととなった。

## 2. 共同研究に関する議論の詳細

### 2.1. OH メーザー源の天の川銀河広域掃天探査

まだ試験観測段階にある ASKAP を使った GASKAP 計画に先立って、SPLASH の観測がひと通り完了している。受入研究者らは事前に、SPLASH 初期科学データを入手し OH メーザー源の同定を進めておき、その結果について招聘研究者と議論した。その中で招聘研究者は主に、個々のメーザー源が付随する天体の中に特殊な進化段階にあるもの (惑星状星雲形成にまで進化した高速双極ジェット=「宇宙の噴水」を伴うようなもの) を探査することに注目している。そこで、SPLASH 観測の角分解能 (14 分角) があまり高くないのにも関わらず、我々が同定した殆どのメーザー源の位置が既知の赤外線源の位置と天体同定に十分な精度 ( $<30$  秒角) で特定できていることを確認した。これは、電波干渉計による位置計測のための追加観測を待たずに天体同定と特徴 (可視光線・赤外線をも含む spectral energy distribution に基づいて特定) の把握を事前に進められることになる。また、無バイアスの掃天観測であるため、天の川銀河面と垂直方向におけるメーザー源分布の様子から、天の川銀河全体で OH メーザー源が約 5000 個存在することを推定することもできた。このような作業を通して、SPLASH/GASKAP で得られる OH 放射データのうちコンパクトなメーザー放射を伴う天体に的を絞った時に追求すべき課題を確認することができた。

### 2.2. 「宇宙の噴水」天体及び惑星状星雲に付随する水メーザー源の VLBI 及び単一望遠鏡観測の計画

恒星進化途上非常に興味深いこれら天体については、星本体が星周ガスに深く埋もれ

ていたり放射源が空間的に広がってしまっているため、これら天体の物理量の推定に不可欠な距離の推定が困難である。しかしこれらに付随する水（及び水酸基）メーザー源を使えば、VLBIによって年周視差計測に基づく距離推定が可能となる。ただ現状は、過去に惑星状星雲については1例、宇宙の噴水天体についても2天体でしか年周視差計測が行われていない。我々は現在3天体目の宇宙の噴水天体に対する年周視差計測を進めているが、もっと組織的かつ大規模に実施できないか議論を行った。そこで我々は、年周視差計測が可能で個々に探求してきた研究から計測対象を20天体程度選定し、VERA年周視差計測プロジェクトとして立ち上げる方向で今後検討を進めることにした。それに先立ち、恒星の急速な進化や脈動変更に伴って強度変化する水メーザー源のスペクトルを単一電波望遠鏡で継続的に追跡することが重要である。日本には、年間を通して使用できこの目的に適するような大口径電波望遠鏡が存在しない。しかし、豪州とスペインにNASA深宇宙探査用の口径70m電波望遠鏡(Tidbinbilla及びRobledo)がこの目的のために利用できるため、我々のグループで観測を提案・実施して行くこととなった。これらは後日適当な時期にVLBIでも連続撮像観測を行うことになる。

### 2.3. 星周メーザー源に対するミリ波・サブミリ波観測

惑星状星雲や宇宙の噴水天体、及び長周期脈動変光星は、漸近巨星枝(AGB)星及び後AGB星段階の星であり、ただ激しいだけでなく断続的/周期的で非対称性を伴う質量放出を伴う。メーザー源のVLBI観測ではコンパクトなスポット群の運動を追跡して星周ガス縁やジェット of 三次元的運動を動的に捉え、このような複雑な質量放出の詳細を把握することができる。今後KaVA(Korean VLBI Network and VERA Combined Array)を使った組織的な観測を実施するにあたって、スペインの研究グループとの連携を持つことについて議論を行った。それに伴い、Robledo 35m鏡でもSiOメーザー源の継続的観測を実施する方向で検討を始める事になった。しかし、このようなメーザー源のVLBI観測だけでは、星周ガス縁やジェットの全体像や物理量の把握ができない。ALMAなどを使った一酸化炭素や塵などの熱的放射の撮像も欠かせなくなる。我々は今後、メーザー源観測で蓄積されて行くユニークな研究成果とアイデアをもとに、競争倍率の高いALMA観測を共同で提案していくように定期的に会合を持つことで議論を進めることにした。

## 3. まとめ・今後の課題

世界における電波天文学の直近の将来は、科学運用を既に開始したALMA(ミリ波・サブミリ波)と建設計画中のSKA(長波長)が国際観測装置として双璧を成し、お互いが研究面で相補的な役割を果たすはずである。現在はそのような状況に向けて、既存観測装置を使った研究を通して大型国際チームを編成する土壌を形成し成果を積み上げて行くことが重要である。今回の招聘事業を通して、欧州、特に電波天文学が進んでいるスペインの研究グループとの継続的連携を進める土台が固まったものと総括できる。我々の星周メーザー源に対する共同研究の遂行は今後、VERA/KaVA/VLBAなどのVLBI観測網、ASKAP、ALMA等の大型電波干渉計を用いて大規模で系統的なプログラムの企画に基づいて進められるはずである。これに加えて、日本だけでなくスペインや豪州の単独大型電波望遠鏡を使ったメーザー源の継続的観測も実施されるだろう。

今回の招聘事業では、スペインを代表する電波天文学である招聘研究者を日本に短期滞在する機会を得るところまで漕ぎ着けた。今後は、招聘研究者と受入研究者それぞれの研究チームぐるみでの交流へと発展させていくことが望まれる。双方の国に優れた電波天文学観測装置を使える機会があるため、そうなる可能性は高いと思われる。しかしそうなってくると、日本の受入研究者のチームに加わる人材、特に日本人大学院生について、国際交流能力(つまり英語力)の向上が急務である。招聘研究者による英語での講義「先端科学特別講義」(5回受講すれば2単位取得できる講義のうちの1回分)を企画したのにも関わらず、海外からの留学生によるもの以外では、質疑があまり展開できなかった。このことから、その課題の克服が容易ではないことが伺え、大学内、特に研究に関する議論においては、英語でのやりとりの機会を充実させる必要があることを認識した。また、ALMAやKaVAなど、国際観測提案公募への大学院生による自主的参加を、組織化されつつあるこの共同研究の機会を契機に強く促していくことも必要だと思われる。