

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Science with the Submillimeter Array: Present and Future, & JCMT Users Meeting

氏名：崔仁士（東京大学／国立天文台D2（渡航当時））

渡航先：台湾

期間：2019年11月4日～8日

早川基金からの援助を得て、台湾の中央研究院で開かれた国際研究会 *Science with the Submillimeter Array: Present and Future*, および *JCMT Users Meeting*（以下、それぞれ *SMA Workshop*, *JCMT UM* と記す）にてそれぞれポスター発表、および口頭発表を行ったのでその内容と成果を報告する。共同研究者は大橋永芳（国立天文台ハワイ観測所）教授（当時）、松本倫明（法政大学）教授、麻生有佑（台湾中央研究院）博士（当時）、*Anaëlle Maury*（*CEA Saclay, France*）教授らである。今回の渡航で申請者が研究発表を行った二つの研究会はハワイのマウナケア山に設置されている電波干渉計 *SMA* と単一鏡型電波望遠鏡 *JCMT* のこれまでの成果の報告と、それらを踏まえた今後の科学的戦略を議論するものである。取り扱われる分野は、遠方宇宙や活動銀河核なども含み多岐に渡っているが、申請者の研究分野である星形成の分野でも多くの発表があった。また、発表内容は *SMA* と *JCMT* の観測に限らず、それら望遠鏡とのシナジーという観点で、他の望遠鏡を用いた観測結果を聞くこともできた。

今回の研究会で、申請者は原始星周囲における原始惑星系円盤の形成・成長の物理過程の解明を目指して行った、二つの観測的研究について発表を行った。*SMA Workshop* では、“*ALMA Observations of the Class I Protostar L1489 IRS: Warped Disk Structure*” というタイトルでポスター発表を行った（以下、研究1とする）。原始星周囲の環境は大きく三つの構造、(1) ~100 au

の大きさでケプラー回転をする円盤、(2) ~1,000 au の大きさで回転と落下運動を示すエンベロープ、(3) ~0.1 pc の大きさで剛体回転に近い回転を示す分子雲コア（以下、コアとする）に分けられる。これまで、電波干渉計を用いた分子輝線の観測からガスの運動を調べ、力学的に円盤とエンベロープを切り分ける手法で、十数の原始星周囲でケプラー円盤の存在が確認されてきた。しかし、空間分解能の不足から、円盤の詳細な構造までは未だ明らかにされてこなかった。そこで、研究1では太陽系近傍に位置する原始星 *L1489 IRS* に対して行われた、大型電波干渉計 *ALMA* を用いた高空間分解能観測（~40 au）をもとに、*L1489 IRS* 周囲の円盤の詳細な構造を調べた。*C¹⁸O J=2-1* 分子輝線での観測から、北東から南西にかけて伸びる円盤状の構造と、その構造が回転している様子が捉えられた。さらに、半径~200-300 au でその構造の伸びる向きが15°程度変化していることがわかった。位置速度図を用いて、半径ごとに回転速度を測り、その半径依存性を調べたところ、半径~600 au まで回転速度はおおよそ $v_{\text{rot}} \propto r^{-0.5}$ （ケプラー回転）に従う一方で、それより外側では回転速度はおおよそ $v_{\text{rot}} \propto r^{-1}$ （角運動量を保存しながらの回転）に従うことがわかった。これらの事実から、*L1489 IRS* は半径~600 au の歪んだ円盤をもち、その外側は角運動量を保存しながら落下するエンベロープに覆われていることが示唆される。実際に、半径~200-300 au で円盤面の向きが変わる歪み円盤モデルを作成し、観測結果との比較を行うことで、歪み円盤モデルが観測結果をよく説明することを示した。さらに共同研究者である松本教授の協力のもと簡単な数値計算を行い、このような歪み円盤は途中で回転軸の向きが変化するエンベロープからの質



量降着によって形成されることを示した。

JCMT UMでは、“Transition from a Quiescent Core to a Dynamical Envelope around the protostar L1489 IRS” というタイトルで口頭発表を行った。上に述べたように、円盤とエンベロープの切り分けから円盤の存在が確認されてきたが、エンベロープとコアを切り分けた例は未だほとんど存在しない。

そこで、申請者は研究1を受けて、L1489 IRSに対してエンベロープとコアの切り分けを行うことを目指した。L1489 IRS周囲の $\sim 1,000\text{--}10,000$ auスケールのガスの運動を調べるために、単一鏡型電波望遠鏡IRAM 30 mを用いた ~ 0.1 pc \times 0.1 pc領域をカバーする $\text{C}^{18}\text{O } J=2\text{--}1$ 分子輝線でのマッピング観測（空間分解能 $\sim 1,600$ au）を行った。観測の結果、原始星周囲の半径 $\sim 2,000$ auの比較的コンパクトな領域にガスが集中していることがわかった。また、その領域の外側での C^{18}O ガスの速度分散 ~ 0.2 km/sと比べて、領域内では速度分散が ~ 0.7 km/sと大きいことがわかった。この事実は、半径 $\sim 2,000$ auより外側ではガスが静的である一方で、内側ではガスは動的

であることを示唆している。

さらに、原始星を中心に差し渡し8,000 auで、円盤面とおよそ同じ向きに回転による速度勾配が見られた。位置速度図を用いて半径ごとに回転速度を測り、回転速度の半径依存性を調べたところ、半径 $\sim 2,400$ auより内側では回転速度はおよそ $v_{\text{rot}} \propto r^{-1}$ に従う一方で、外側では $v_{\text{rot}} \propto r^{0.2}$ に従うことがわかった。このことは、半径 $\sim 2,400$ auが落下エンベロープと剛体回転に近い回転を示すコアの境界であることを示唆している。

ポスター発表では、自ら積極的に人に声をかけ多くの人に自身の研究を紹介することができた。また、そのうち3, 4人の分野の近い人とは研究内容についてよく議論をすることができた。円盤の歪みの原因を探るためにレーザーの観測から円盤の歳差運動を測る手法など、新しい観測の提案を得ることもできた。口頭発表では、質疑応答で質問を受けることができたことから、自分たちの研究をよく宣伝できたと思う。また、のちに質問をした研究者と個別に話をすることができ、連続波の輝度分布からダストの密度分布を導出し、その半径依存性を調べることで、分子輝線の解析と

は独立にエンベロープとコアの境を調べ、今回の発表内容の結果と比較する、というアイデアをもろうこともできた。

また、他者の発表では積極的に質問を行えた。質問をする人が比較的固定化されていたことや日本からの参加者が少なかったこともあり、日本からの学生として存在感を示せたと思う。台湾、韓国、中国、ベトナム等からの研究者ともよく交流することができ、研究会参加の一つの目的であっ

た、アジア圏の研究者との関係作りもできたと思う。また、SMA, JCMTの強みやこれから重要となる観測をよく知ることができた。特に、磁場を調べるための偏光観測は大きなサーベイの結果もまどまりつつあり興味深かった。

以上のように、今回の研究会に参加したことで様々な面で多くの収穫があった。このような機会を得られたことも早川基金からの援助があつてこそであり、ここに心より感謝申し上げる。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 *Subaru Telescope 20th Anniversary Conference*

氏 名：佐衛田祐弥（愛媛大学M2（渡航当時））

渡航先：アメリカ・ハワイ

期 間：2019年11月16日～25日

申請者はハワイ Waikoloa Beach Marriott Resort & Spa で開催された研究会，“Subaru Telescope 20th Anniversary Conference”に参加し、遠方クエーサー母銀河をテーマとした研究成果についての口頭発表を行いました。本報告書では、本渡航の趣旨とその学問的意義、成果について報告いたします。

現在、銀河の成長や進化に関する観測的事実として、銀河中心に存在する超巨大ブラックホール（Super massive black hole: SMBH）の質量とそのSMBHを宿す母銀河の星質量は、10桁以上も空間スケールが異なるにも関わらず相関関係（マゴリアン関係）を示すことが知られています。この事実から、銀河中心のSMBHは母銀河と共に影響を及ぼし合いながら成長、進化してきた（共進化）という仮説が示唆されており、銀河の成長・進化について説明したシナリオの一つに、ガスや塵を多く含んだ銀河同士のコア合体を想定したものがあつます。このシナリオでは塵やガスを多く含ん

だ銀河同士が衝突合体することで、塵に覆われた活発な星形成段階を経験し、その後銀河中心に降着する物質によってSMBHが明るく輝く、塵に覆われた活動銀河核（AGN）になると考えられています。そして、AGNの放射によって周りを覆っていた塵が吹き飛ばされて、塵の晴れたAGN（クエーサー）へ進化すると考えられています。特にクエーサーへの移行段階ではAGNからの放射により星の材料となるガスや塵が吹き飛ばされ、母銀河の星形成が抑制されること（AGNフィードバック）が理論的に予想されており、このAGNフィードバックこそが共進化を引き起こす機構の有力な候補と考えられています。こうした予想を観測的に裏付け、銀河と巨大ブラックホールという宇宙の基本的構成要素がどのような物理のもとで共進化を遂げてきたのかを解明することが現代天文学の最も重要な課題の一つです。しかし、上記のシナリオの中で共進化の中核を担う機構として予想されているAGNフィードバックについてまだ観測的に実証されていません。また、マゴリアン関係の起源である宇宙史前半において、ブラックホールと母銀河の関係は詳しくわかっていません。



そこで申請者は、遠方に位置するクエーサーの母銀河に注目し、その星形成活動がAGNでない銀河 (non-AGN) に比べて活発かどうかの調査を行いました。上のシナリオのように、AGN フィードバックが効いていれば母銀河の星形成活動は不活発であると予想されます。本研究の課題として、クエーサーからの強い放射が銀河からの淡い放射をかき消してしまうため、その母銀河からの情報を得ることは困難であること、加えて遠方にあるクエーサーほど、観測装置の感度や分解能の限界から母銀河の様子を捉えることが難しいことが挙げられます。そこで我々は、広視野・高分解能を誇るすばる望遠鏡の可視光広視野主焦点カメラ (Hyper Suprime-Cam: HSC) で撮像されたデータを用いることで、大規模なクエーサーサンプルを構築し、得られた天体画像から PSF 画像を差し引くことで、これまで以上に正確にクエーサー成分と母銀河成分の分離を可能にしました。さらに同じ赤方偏移に存在する天体画像を重ね合わせて (スタック) 画像のノイズを小さくしました。これにより、個々の天体では検出の難しかった遠方クエーサー母銀河の検出が可能となりました。研究方法としては、 $z > 1$ のクエーサー 3528

天体を3つの赤方偏移帯に分け、5つのバンド (g, r, i, z, y) で母銀河のスタック画像を作成し、各赤方偏移における平均的な母銀河のカラーを測定し、色等級図上でクエーサー母銀河と non-AGN を比較し、違いが見られるかの調査を行いました。その結果、クエーサー母銀河は色等級図上で bluecloud と呼ばれる星形成を活発に行なっている銀河と、red sequence と呼ばれる星形成をやめた銀河の間の種族である green valley に位置することがわかりました。このことからクエーサー母銀河は星形成が活発な銀河から星形成をやめる銀河の移り変わりの銀河であると言えます、本研究の結果はAGNフィードバックによって星形成活動が抑制されるというシナリオの間接的な証拠になると考えられます。

今回の研究集会では、すばる望遠鏡利用者に向けて上記の研究成果について報告し、国内外の研究者と議論を行いました。中でも、今回の研究の中で得られたクエーサー母銀河が色等級図の上で green valley に位置するという結果がAGNフィードバック以外の機構によって引き起こされた可能性を考える必要があるという助言は複数の研究者からいただきました。これについては今後の研究の中でしっかりと検討していく必要があると考えます。

また、比較的近傍宇宙で同様の研究を行なっている研究者とも議論を行い研究成果を比較できたことは本渡航の一番の成果だと考えます。最後になりましたが、このような素晴らしい国外の研究集会への参加に対する支援を行ってくださった、日本天文学会早川幸男基金及び関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。