

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

East-Asia AGN Workshop

氏 名：登口暁（愛媛大学D1（渡航当時））
 渡航先：台湾
 期 間：2019年1月20日～24日

私は今回の渡航において、台湾の中央研究院天文及天文物理研究所で開かれた研究集会“East-Asia AGN Workshop”に参加し、“Discovery of blue-excess dust-obscured galaxies from the Subaru Hyper Suprime-Cam survey”というタイトルでポスター発表を行いました。本研究会は、日本、台湾、韓国、中国の大学および研究機関で活動銀河核の研究を行っている研究者が集まり議論する研究集会であり、講演内容は活動銀河核に関する中心のブラックホールから母銀河まで、理論と観測、すべての波長といった幅広いフィールドでの研究内容が発表されていました。

本研究集会で私が発表した内容は、すばる望遠鏡を用いた塵に覆われた銀河（dust-obscured galaxies: DOGs）の探査から可視光線の波長帯において極めて青い天体を発見したというものです。近年、銀河進化を理解する上で注目されている観測事実として、太陽の100万倍から10億倍の質量を持つ超巨大ブラックホール（super massive blackhole: SMBH）の質量とそのSMBHを持つ母銀河の星質量の間に見られる強い相関関係があり、SMBHと母銀河はお互いに影響を及ぼしあいながら成長してきた可能性が示唆されています。この現象を「SMBHと母銀河の共進化」と呼んでいますが、この共進化がどのような物理プロセスを生じているのか、その実態は未だ理解されていません。従って、共進化を行っている最中であると期待される天体を観測して、その天体の物理状態を知ることは、銀河進化の理解に必要な共進化の実証と理解を行う上で必要不可欠であ

ると考えています。その候補天体として、クエーサーと呼ばれる母銀河よりもSMBH周りよりも明るい天体があり、この天体の形成過程を共進化を用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合体を想定したものが 있습니다。ガスや塵を多く含んだ銀河同士の合体が生じると、合体した銀河は塵に覆われた活発な星形成（star-formation: SF）の段階を経験し、その後銀河中心に降着する物質によってSMBH周りが明るく輝く、塵に覆われたAGN段階になり、AGN活動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。ただしこれは理論的シナリオに過ぎず、これを観測的に立証するためには、クエーサーへ進化する前に、塵に覆われたAGNが塵を吹き飛ばしていることを示すことが求められました。先行研究ではDOGsと呼ばれる、可視光線よりも中間赤外線で1,000倍以上も明るい天体に着目することで、効率よく塵に覆われたSF段階やAGN段階の天体を発見していました。しかし、従来の観測機器で発見されていたDOGsに着目するだけでは塵に覆われたAGNがクエーサーへ進化する前に塵を吹き飛ばすことを明らかにできませんでした。原因として、(i) 塵を吹き飛ばすタイムスケールはDOGsの寿命に比べて非常に短いこと、(ii) DOGsの空間数密度が非常に低いことが挙げられます。

そこで、本研究ではクエーサーが可視光線で非常に青いという性質に着目し、「塵を吹き飛ばしつつある天体は中心のAGNが完全に塵によって覆われていないためAGN光が漏れ出している」と仮説を立てました。この仮説検証のため、我々はすばる望遠鏡の可視光線超広視野カメラ（Hyper Suprime-Cam: HSC）を用いた広範囲探

査のデータと中間赤外線全天探査衛星 (Wide-field Infrared Survey Explorer: WISE) のデータを用いて DOGs の大規模サンプルの中から可視光線で青い天体の発見を試みました。結果として、HSC と WISE を用いて 571 個の DOGs を新たに検出し、その中から世界で初めて可視光線で極めて青い DOGs (blue-excess DOGs: BluDOGs) を 8 天体発見しました。また、571 個の DOGs を (i) SF 段階、(ii) AGN 段階、(iii) 可視光線で極めて青い段階に分類し可視光線のカラーを調べ、(i) から (iii) にかけて青くなっていることがわかりました。天体を覆う塵による減光の影響で可視光線のカラーが決まるとすると、(i) から (iii) にかけて塵の減光が弱まると言え、シナリオに一致する結果が得られました。ゆえに 8 天体の BluDOGs は塵を吹き飛ばしつつある天体に対応すると考えられます。よって、これまでの研究で未発見であった塵を吹き飛ばしつつある天体を本研究によって初めて選出できるようになりました。

今回の研究集会を通して、英語が苦手であるものの様々な人に声をかけて、北京大学のポスドクの方やソウル大学の学生の方等と議論が少しでもできたことは、研究の議論を他の国の方々と前向きに行えなかった自分にとっては大きな進歩だと思いました。その中の質問として、「もし BluDOGs の青い光が漏れだした AGN の光であるならば X 線の観測で検出されていそうだけどどうなのか」というものがあり、その方へは「X 線

カウンターパートを探す作業はまだできていないが、AGN の光が漏れていると考えているので X 線で検出されて欲しい」と回答しました。また、BluDOGs の選出基準に関して基準の根拠を聞かれ、可視光線で平らな SED を示す珍しい天体を取得するための閾値であり、SDSS のクエーサーサンプルの平均的な SED と同程度のカラーを閾値として設定していることを伝えた上で、クエーサーに似た可視光線の光を持っている天体を選択するための閾値であることを説明しました。今後、他の研究会においてこの結果を発表する際には上記の点を丁寧に説明するべきだと感じました。

また、DOGs よりも塵の温度の高い天体に焦点を当てて研究を行っている Chao-Wei Tsai 氏と BluDOGs の分光観測や空間的分解能に関する議論ができ、日本に帰国後にも更にメールでやりとりができたことはとても嬉しいことでした。特に、Tsai 氏からのコメントで、BluDOGs の分光データはブラックホール質量と関わるので興味深いという話があり、まさにこれから始めようとしている BluDOGs の VLT と Subaru での分光観測の結果が待ち遠しいと感じました。分光データが取得できた際には、解析結果を研究会の場等で Tsai 氏等と議論したいと考えています。

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および関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Linking galaxies from the epoch of initial star formation to today

氏 名：鈴木智子（東北大学/国立天文台研究員
（渡航当時））

渡航先：オーストラリア・シドニー

期 間：2019年2月17日～23日

今回私は、オーストラリア・シドニーで開催された国際研究会議“Linking galaxies from the epoch of initial star formation to today”に参加し、“Spatially resolving star-forming regions within galaxies in a dense proto-cluster core at $z=2.53$ ”というタイトルで口頭発表を行いました。この研究会は、ESOと最近ESOに参加したオーストラリアの研究機関との間のコラボレーションを促進することを大きな目的としたものではありましたが、参加者はオーストラリアとESOからだけでなく、カナダ、アメリカ、そして日本など、様々な国から研究者が参加していました。研究会の規模も大きく、近傍から遠方、可視近赤外線から電波、そして観測からシミュレーションの話まで、銀河に関する幅広い分野の話聞くことができました。

私の発表では、すばる望遠鏡の赤外線撮像分光装置IRCSと補償光学装置AO188を用いて遠方星形成銀河に対して行った、高い空間分解能の撮像観測から得られた結果について話しました。この研究では、110億年ほど前（赤方偏移 $z\sim 2.5$ ）の原始銀河団と呼ばれる非常に高密度な環境に存在している星形成銀河をターゲットとしており、補償光学装置（Adaptive Optics; AO）と狭帯域フィルターと呼ばれる特殊な幅の狭いフィルターを用いることで、ターゲットとなる銀河内部の星からの光だけでなく、星形成領域を反映しているH α 輝線領域の構造を捉えるということを行いました。AOを用いることで、地上からの観測でも

ハッブル宇宙望遠鏡に匹敵する空間分解能を達成することができ、遠方銀河の構造を調べることが可能となります。AOと狭帯域フィルターを組み合わせることで得られた、空間的に分解された星形成領域の情報を用いて、 $z\sim 2.5$ の原始銀河団領域において星形成銀河がどのようにしてその構造を成長させているのか、そして同時代の一般的な密度領域にいる星形成銀河との間に違いは見られるのかということ調べました。その結果、私たちのサンプルの中で特に質量の大きい星形成銀河はその星の構造よりもより広がった星形成領域を持っていること、そしてその傾向に、環境に対する依存性は見られないということが分かりました。これらの結果は、 $z\sim 2.5$ という遠方においては原始銀河団のような非常に密集した環境であっても、星形成銀河の構造成長は外的な要因よりはむしろ内的な物理過程によって支配されており、銀河の構造は星形成によって内側から外側へと徐々に成長していることを示唆しています。

今回の研究会では、近傍・遠方問わず銀河を“分解する”という内容の研究発表が多く見られ、それぞれの研究で、どのようなアプローチで銀河の内部構造やより詳細な物理状態に迫ろうとしているのかを学ぶ非常に良い機会になりました。その中で、 $z>2$ のような遠方かつ原始銀河団領域で銀河の内部構造を調べるといった研究はあまり見られず、その点で私たちの進めている研究を宣伝することはできたと思っています。質疑応答でもいくつかの質問を受けることができました。

また、大型の電波干渉計ALMAやVLTの多天体面分光装置KMOSを用いた最前線の研究についての話を聞くこともできました。ある発表では、ごく最近の結果として $z\sim 2$ の星形成銀河に対してALMAで500pcのスケールにまで分解し

たCOガスの分布図が示されました。銀河内部の星形成クランプのスケールにまで綺麗に分解されたCO分子ガスの画像は非常に印象に残りました。遠方の星形成銀河に対して空間分解したCO分子ガスの情報を得るといことは私たちのグループも目指しているものの一つであったため、発表者と直接話をし、実際の観測時間やターゲットの選択方法などを議論しました。別の発表では、VLT/KMOSを用いて $z>3$ のLy α 輝線銀河の面分光サーベイを始めたという話がありました。これまで $z\sim 2.5$ までの星形成銀河に対して行われていたサーベイがさらに遠方へと拡張されていくということでした。こちらもこれまでの自分の研究と非常に関係するもので非常に興味深い内容であったと同時に、それぞれの研究グループが同じようなサイエンスゴールに向かって次々と新しい

プロジェクトを始めているのだということを改めて感じました。さらに、今回の研究会ではESOとオーストラリアの次世代の観測装置やサーベイ計画について詳細な話を聞くことができ、これは今回の研究会ならではの機会だったと思います。日本のすばる望遠鏡の将来計画との比較という意味でも興味深い内容でした。

研究会を通して、様々なアプローチで銀河の内部構造を調べようとする研究の話聞くことができたのは、今後どのような方向性で自身の研究を進めていくのかを考えるにあたって非常に良い機会になりました。これを良い契機として、自身の研究をより発展させられるように努めていきます。

最後になりましたが、研究会参加にあたって援助をいただいた日本天文学会早川幸男基金およびその関係者の皆様に心から感謝いたします。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Exploring the Infrared Universe: The Promise of SPICA

氏 名：馬場俊介（国立天文台PD：学振（渡航当時））

渡航先：ギリシャ・クレタ島

期 間：2019年5月18日～25日

私は、2019年5月20日から23日にギリシャのクレタ島で開催された国際会議“Exploring the Infrared Universe: The Promise of SPICA”に参加し、“Revealing molecular outflow in active galaxies with SPICA high-resolution spectroscopy”というタイトルで口頭講演を行いました。研究会のタイトルにあるSPICAとは、日本と欧州が共同で推進している次世代赤外線天文衛星です。極低温（8 K）に冷却した口径2.5 mの望遠鏡による中間・遠赤外線の高感度観測によって「銀河進化を通しての重元素とダストによる宇宙の豊穡化」および「生命居住可能な世界に至る惑星系形成」を解き明かすことを目的としており、2030年頃の

打ち上げを目指し現在計画が進められています。今回の研究会は、SPICAが可能にする新しいサイエンスを共有し、ミッションの今後の検討と開発を勢い付けることを目的とするものでした。参加者は164人にのぼり、口頭講演70件、ポスター講演77件が行われ、非常に活発な研究会となりました。

今回の私の口頭講演では、SPICAの観測装置の1つである中間赤外線観測装置SMIの高分散分光機能（HR）を用いることで、活動銀河核（AGN）からのアウトフローをどのように研究できるかについて論じました。AGNが放出する高エネルギーのアウトフローは、母銀河の星形成にまで影響を及ぼすため、銀河進化を理解するうえで欠くことのできない要素です。そのアウトフローの質量の大部分は分子ガスの状態で存在しているので、AGNフィードバックにおいて、分子ガスアウトフローの寄与は大きな割合を占めてい

ます。そのため、分子ガスアウトフローの運動状態を理解することが、宇宙史の中で星形成が最も活発であった時代（赤方偏移 $z\sim 2$ ）において、特に重要です。HRでは、波長 $12\text{--}18\ \mu\text{m}$ の連続的な範囲で、分解能 $R\sim 33,000$ の分光が可能です。この性能を生かして分子の輝線・吸収線の速度プロファイルを観測すれば、分子ガスアウトフローの運動状態を直接的に調べられます。今回の講演では特に、 H_2 、 CO のラインを利用した方法を提案しました。 H_2 の純回転輝線 $S(5)$ ($6.91\ \mu\text{m}$) から $S(17)$ ($3.49\ \mu\text{m}$) は、 $z=1.5\text{--}2.5$ で観測できます。これらの輝線は比較的強く、分子ガスアウトフローの効率的な探索と速度・質量の推定に役立ちます。一方、詳細な物理状態と幾何学的構造の推定には、 CO の基準振動回転遷移 ($v=1\leftarrow 0$, $\Delta J=\pm 1$) の観測が効果的です。この遷移では波長 $4.67\ \mu\text{m}$ を中心に異なる回転準位のラインが $\sim 0.01\ \mu\text{m}$ の間隔で現れるため、数十の励起レベルが同時に測定でき、そのためにガスの密度、温度、内部速度場などの物理状態を強く制限できます。またこれらのラインは、中心核に加熱されたダストからの熱放射を背景光として、基本的に吸収線として観測されるので、中心核の近傍を実効的に高い空間分解能でプローブできます。各ラインの速度プロファイルは、アウトフローの開口角が小さければ吸収のみですが、大きい場合、吸収と放射から成るP-Cygniプロファイルとなります。このプロファイルを調べることで、中心核近傍における分子ガスアウトフローの幾何学的構造を推測することができます。このようなCO P-Cygniプロファイルの分解は、SPICA HRで初めて可能になるものです。2021年打ち上げ予定

のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の中間赤外線装置MIRIでは、波長分解能が1桁低く、十分ではありません。今回は、ある質量放出率、あるアウトフロー形状のときに、CO振動回転遷移の全体的なスペクトルおよび各ラインの速度プロファイルが、SPICA SMI HRの分解能でどのように観測されると予想されるかを例示しました。

今回の研究会では、口頭ポスターかという発表の形式は、SOCによるアブストラクトの査読によって振り分けられました。錚々たる参加者の面々から口頭講演の枠に選んでいただけたことは光栄の至りです。貴重な機会をいただいたお陰で、SPICAを用いたユニークなサイエンスを、世界中の一流研究者へ向けて宣伝することができました。講演後には私がこれまで取り組んできたCO振動回転吸収の衛星観測についてのご質問もいただき、それをきっかけに海外研究者との新たな協力関係を築きました。自らの知識と経験を他者の研究に役立てるためにも、研究成果の積極的な紹介が必要だと、改めて実感した次第です。

他の講演の聴講も非常に勉強になりました。今回の研究会はSPICAを用いたサイエンスという軸で構成されているため、発表内容は銀河進化だけでなく、遠方宇宙、星形成、惑星形成と、空間スケールでも時間スケールでも多岐にわたりました。各講演でその分野の未解決問題が示されたことで、天文学が今後十数年で取り組んでいくべき課題を俯瞰し見据えることができました。

最後に、今回の渡航はとても有意義なものとなりました。今回の渡航に対して多大な援助をいただいた日本天文学会早川幸男基金および関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Supernova Remnants II: An Odyssey in Space after Stellar death

氏名：春日知明（東京大学D1（渡航当時））
 渡航先：ギリシャ・クレタ島
 期間：2019年6月2日～10日

私は、2019年6月3日からギリシャ・クレタ島（図1）で開催された“Supernova Remnants II: An Odyssey in Space after Stellar death”に、早川基金を利用して参加した。本会議は3年前に開催されたものの2回目であり、超新星残骸観測の研究者および超新星爆発理論の研究者が世界中から集い、200人の参加者を前にシングルセッションで朝から夕方まで講演が一週間行われるという、大変に密度の濃いものである。この中で私は、“Doppler Velocity Measurement of Fe Ejecta in Kepler’s Supernova Remnant”と題し、20分間の口頭発表を行った。

本研究は、Ia型超新星の「多様性」に迫るものである。Ia型超新星の元となるのは炭素+酸素コアの白色矮星であり、質量増加による星の内部の核融合を電子の縮退圧で制御できなくなるにつれて核融合が暴走し、最終的には爆発に至る。その光度曲線が一様であることから、Ia型超新星は宇宙における距離の指標（「標準光源」と呼ばれる）に用いられ、宇宙の加速膨張の証明にも一役買うこととなった。また重力崩壊型超新星のようにFeの光分解を伴わないため、宇宙空間に散らばる重元素の起源としても知られている。このような「普遍性」が独り歩きしている一方で、その爆発メカニズムの詳細は未解明である。例えば、質量降着は白色矮星を含む連星系において行われるが、それが白色矮星同士から成る連星白色矮星メインなのか、恒星を伴星とする白色矮星連星メインなのか、という問題が存在する。また電子の縮退圧によって記述されるチャンドラセカール質量

という限界が白色矮星には存在するが、これに近づいて爆発する機会が多いのか、このはるか手前で爆発してしまうものが多いのかも定かではない。このような「多様性」を解明することは、「普遍性」を利用する上でも重要となってくる。

核融合の生成物は、爆発噴出物として観測される。近年の理論研究の進歩により、この噴出物の運動状態の傾向が爆発メカニズムによって異なることが示唆されている（e.g., Fink et al. 2010; Maeda et al. 2010; Klomer et al. 2013; Pakmor et al. 2011）。よって噴出物の観測は「多様性」の解明の手がかりとなりうるが、超新星自体はコンパクトであるため噴出物の運動状態を探るのには適さない。そこで超新星残骸の出番である。超新星残骸は広がった天体であるため噴出物の運動状態を測定しやすく、特に若い超新星残骸であればその運動は爆発当時の影響を色濃く残していると考えられる。噴出物は超新星残骸中の逆行衝撃波によって一千万度近くまで加熱され、X線帯域でK輝線を放射する。K輝線を発するような高温プラズマは噴出物由来でしか説明できないため、噴出物観測にX線観測は大きな役割を果たすと言える。

私は2018年に出版した論文（Kasuga et al. 2018, PASJ, 70, 5, 88）において、若いKepler超新星残骸（SN 1604の残骸）のFe噴出物に注目し、K輝線のドップラーシフトから視線方向の運動状態を測定した。本研究では、高い角分解能と十分なエネルギー分解能を併せ持つChandra衛星CCD検出器の特性を活かし、電離状態から推定した静止系でのK輝線エネルギーと、実際のスペクトルから得られるK輝線エネルギーの差を、バルクなFeの塊ごとに調べた。また微細な領域ごとに光子の平均エネルギーを調べ、ドップラー運



写真 会議場そばの海岸から眺めた、発表当日の日の出.

動のプローブとなるマップも作成した. その結果, 残骸の中心付近には逆行衝撃波で加熱された Fe は地球から遠ざかる成分しか存在しないことを, 世界で初めて発見した. 同時に手前側に飛ぶ Fe が台頭している領域も発見している. このように我々は, Kepler 超新星残骸中での Fe 噴出物の運動の非等方性を明らかにした.

発表では, 上記の Kepler 超新星残骸の話題に加え, 近い年齢である Tycho 超新星残骸 (SN 1572 の残骸) との比較も行った. Tycho は Si などの元素を用いた運動解析でその等方性が知られていたが (Sato & Hughes 2017; Williams et al. 2017), Kepler と同様の手法で比較することにより Fe においても等方性が現れた. Kepler の非等方性との差は, 2つの Ia 型超新星の爆発機構の違

いを示唆するものとなった. 質疑応答では星周物質による影響に関する質問を受け, 関心を持って聞いていただけたことがわかった. 発表後にも何人かの研究者と個別に議論をさせていただき, セミナーのお誘いも一件いただいた. また類似の比較が 2019 年に Chandra 衛星のグレーティング検出器を用いて Si 噴出物で行われたが (Millard et al. 2019), 会議ではこの研究者らとも実際に議論することができた. このように, 超新星残骸の観測や超新星爆発の理論で名を轟かす各国の研究者と議論ができたことのみならず, 同世代で活躍する学生や若手研究者らとの交流を深められたことは, 今後の研究活動をしていく上で意義深いものであったと考えている. ここに改めて, 早川幸男基金事務局の皆様にご感謝し申し上げる.