（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和７年度　海外派遣研究員研究報告書〔研究実績〕

令和７年１０月２４日

日本大学理事長　　殿
日本大学学長　　殿

所　　属　　工学部（工学研究所）
資格・氏名　　教授・高野　秀路

令和７年度海外派遣研究員（　短期Ａ　）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　短期Ａ
２　研究課題

原子及び分子を用いた近傍銀河の活動性に関する研究

３　派遣期間　　西暦２０２５年４月１２日　～　２０２５年８月３０日
４　派　遣　先　　ドイツ
５　研究目的

本研究の目的は、比較的近い距離に存在し、詳細な観測を行いやすい銀河を用いて、銀河内のガスの原子・分子組成を調べ、それらの反応及び天体現象による影響を明らかにすることである。

近年、可視光、赤外線、及び電波の望遠鏡を用いた観測により、宇宙の初期において、多くの活動的な銀河が見つかっており、宇宙及び銀河の進化を考える上で注目されている。銀河のエネルギー源としては、「爆発的星形成（スターバースト）」と「活動銀河核（AGN: active galactic nucleus）」があるが、これらの２つのメカニズムは異なり、その特定が進化の研究に極めて重要である。しかし、銀河の中心部は多量のダスト（塵）に埋もれている場合があり、その場合、可視光及び赤外線観測での特定は、大きな減衰を受けるために困難である。

一方、電波は波長が長いため、ダストによる減衰を受けにくい。そこで、本研究では、電波を観測するアルマ望遠鏡を用いる。アルマ望遠鏡は、チリの砂漠地帯で 2013 年に稼働を開始した国際共同の巨大電波望遠鏡である。エネルギー源の違いがガスの組成に違いをもたらすと考えられており、その素過程を解明する。このことにより、天文・物理・化学にわたる広い分野に波及する成果を挙げる。

以上の研究を、本研究分野の大きな拠点であるドイツ・マックスプランク地球外物理研究所(MPE: Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics)の星間化学研究センター(CAS: Center for Astrochemical Studies)において実施する。このセンターには、星間

化学分野の観測、実験、及び理論の研究者・大学院生約３０人が所属しており、日々の議論やセミナーが活発に行われている。このような充実した環境で、周囲の研究者と議論などを行い、本分野の知人を増やし、最新情報を得る。これらのことにより、報告者の研究を格段に進める。

6　研 究 概 要

①研究の方法

今回の４ヶ月半の派遣期間中に、本研究テーマの中でも、中性炭素原子(C)の観測データを集中的に扱う。銀河内の星間空間では、炭素は一酸化炭素(CO)の形態で気相に多く存在している。一方、銀河内の活動的な領域では、強い放射や衝撃波の影響で CO が解離し、CO → C + O の反応により、C が多く生成すると考えられる。

報告者らは、アルマ望遠鏡を用いて、近傍の活動的な銀河 NGC 1068 の C の観測データをすでに取得しており、その初期成果の論文を出版している（Saito et al. 2022）。この論文では、銀河の中心部のデータを解析している。

一方、報告者らは、この銀河の腕の部分（渦状腕）のデータも取得しているが、そのデータの解析はまだ十分ではない。このデータ解析を進め、銀河の中心部の活動的な部分(AGN)と、腕の部分での C の振る舞い（存在量、運動など）の違いを明らかにしたい。腕の部分では、星の形成が盛んに起こるとともに（スターバースト)、銀河の回転に伴うガスどうしの衝突も発生している。一般に星間空間にはダストが存在し、その表面での反応が、分子生成に大きな役割を担っていると考えられている。表面で生成した分子は、星の形成による温度上昇などで、気相に昇華すると考えられており、例えばメタノール(CH_3OH)は、そのような過程で気相での存在量が増えると考えられている。腕の部分では、報告者らの別の観測により、メタノールが特に多い領域が見つかっており(Takano et al. 2014, Tosaki et al. 2017)、その領域での C の振る舞いについても研究を行う。

アルマ望遠鏡のデータは、電波の強度分布の２次元画像であり、さらに周波数（速度）方向の情報があるため、合わせて３次元の情報となる。これらが、時期的に何回かに分かれて取得される。また、今回の C のデータは、２種類のアンテナ（直径 12m 及び 7m）で取得されている。そのため、データ量は多い。その処理及び解析には、アルマ側から提供された Python スクリプト、及び解析ソフト CASA などを用いる。また、天文観測で得られたデータのファイル形式としては、一般に FITS という形式が採用されている。

解析では、FITS 形式の画像データどうしを割り算するなどで比較し、さらに、ドップラー効果を用いてガスの運動を調べる。その際には、Python を用いて解析することが便利である。Python を用いることにより、FITS データを扱うための module を使用することができ、解析者の意図を柔軟に反映した解析が可能となる。

報告者は、渡航前に Python の基礎を十分に学び、現地での解析に活用することを目指していたが、時間的な制約などから渡航前の準備は不十分で終わり、現地で準備から始めることとなった。そして、現地でプログラミングを開始し、【研究結果・成果】の項目に記した計算・解析を行った。

②渡航先での活動内容

渡航先は、ドイツ・マックスプランク地球外物理研究所の星間化学研究センターの１か所である。現地では、Python でのプログラミングの習得、実際のプログラミング、それを用いた計算、そして表及び図の作成を行った。

実際のプログラミングに際しては、自分で勉強したり調べたりするのに加えて、現地の研究者から参考となる例をいただいたり、日本の共同研究者からご教示をいただいたりした。

その結果に基づき、現地のグループミーティングで途中経過を紹介する機会があり、研究内容を知ってもらうとともに、有益な質疑応答ができた。また、グループリーダーの Paola Caselli 氏とは、議論を集中して行う機会を２回得て、関連する文献の紹介をいただくなど、大変有意義であった。帰国してからも、オンラインでの議論を行う予定である。さらに、グループミーティングでは、グループ内の活動報告を聴講することができた。それに加え、グループのメンバーとも日頃から交流することで、研究の情報を得たり、実験室を見学させていただいたりした。

実験室は 4 つあり、そのうち 2 つが気相の分子分光学（センチ波～サブミリ波の回転スペクトル）のものである（主にサブミリ波のフリースペースセルを用いたもの、及び主にセンチ波のキャビティーを用いたフーリエ変換型のもの）。3 つ目は、主にダスト表面の反応を調べるための実験室であった。4 つ目は、気相でのイオンの反応を調べるものであった。それぞれ活発に成果を出しており、大変参考となった。

さらに、このグループには多くの研究者の訪問があり、私の滞在時にも、常に 2-3 人の訪問者がいた。論文でお名前を知っていた方が多く、それらの研究者と知り合いになれ、議論の機会を持てたことは、予想外の成果であった。

また、マックスプランク地球外物理研究所があるガーヒングには、ミュンヘン工科大学(TUM)、ヨーロッパ南天天文台(ESO)、及び他のマックスプランク研究所が集まり、小さな学園都市となっている。ヨーロッパ南天天文台（マックスプランク地球外物理研究所から徒歩数分）にはしばしば行き、セミナーに参加し最新の成果を聞くことができた。ヨーロッパ南天天文台のセミナーの 1 つの種類として、ランチトークというものがあり、セミナー後には毎回ピザが振る舞われ、参加者と談笑しながら情報交換する機会となった。

7　研究結果・成果

解析内容を、作成した主な図や表ごとに説明させていただきたい。ただし、未発表ものが多いため、概要とさせていただく。また、星間空間での分子ガスのトレーサーとして、一酸化炭素分子 CO がよく使われるが、そのデータも一緒に解析し比較を行った。

- 強度比の分布図

C のスペクトル線強度と、CO のスペクトル線強度の比、C/^{12}CO 及び C/^{13}CO を求め、それらの比の分布図を作成した。このことにより、銀河のどのような現象によって比が影響されるかを調べることができる。銀河の中心部においては、ガスの吹き出し（outflow）に沿って比が増大することが、すでに我々のグループの研究で知られている(Saito et al. 2022)。今回、存在量が少ない ^{13}CO も用いることにより、光

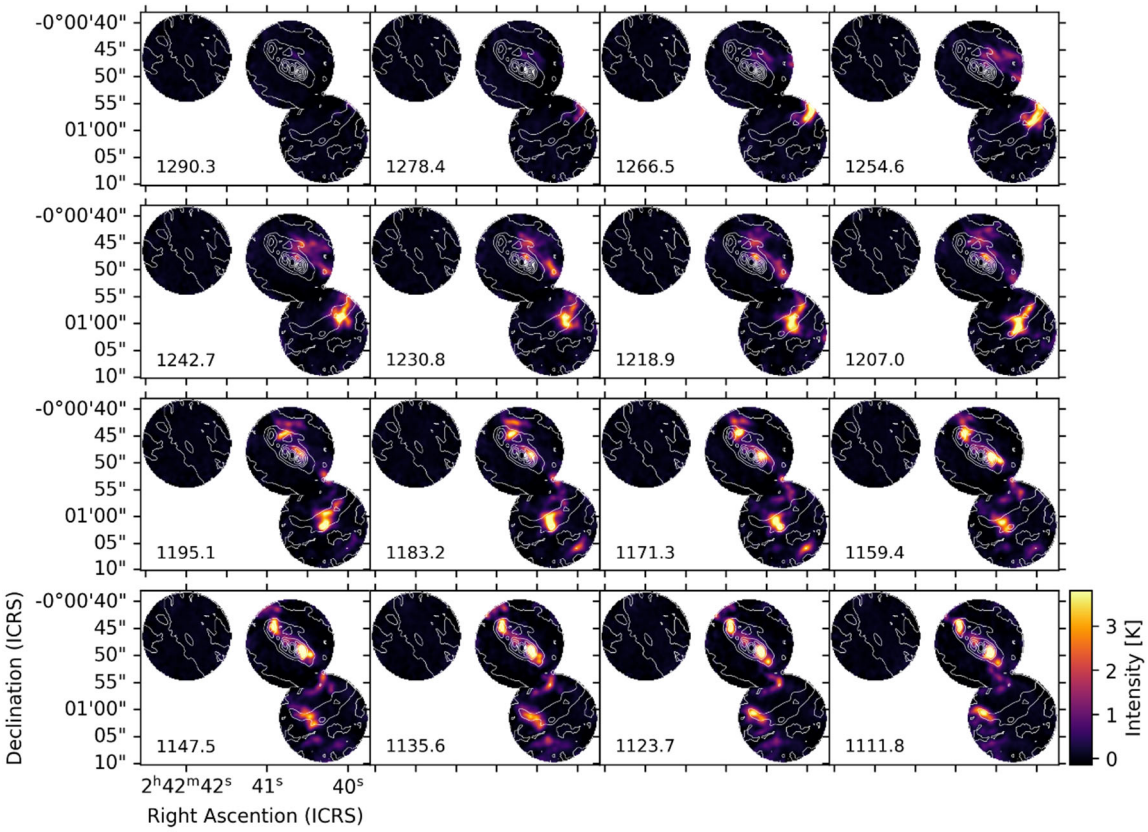
学的厚みが大きくなりすぎない状況で、より詳しい比の変化を捉えることができた。

- 存在量の計算

スペクトル線強度から、C と CO の存在量を銀河内の主要な場所（約５カ所）で算出した。そのためには、（局所的な）熱平衡を仮定した。各存在量から、$C/^{12}CO$ 及び $C/^{13}CO$ の存在量比を求めた。これらの値は、銀河の中心部でやはり高く、腕の部分で低くなった。これらの結果を表にまとめた。

- 速度の解析　チャネルマップ

スペクトル線のドップラー効果を用いて、銀河内での C の運動を調べた。そのために、ある一定の速度間隔ごとのガスの分布を示す図（チャネルマップ）を作成した。その一部を下図に示した。各パネル中の数字が速度を km/s 単位で示したものであり、カラーで C の強度分布を示している。また、コントア（白線）は、C の全速度での強



度分布を比較のために全パネルで示したものである。この図などを用いて、視線方向の運動やガスどうしの衝突を調べることができる。ガスどうしの衝突が契機となり、星の形成が進むと考えられており、前述の関連のことでは、メタノールの生成メカニズム及び気相への昇華の起こりやすさについての、重要な情報となった。

速度の解析では、position-velocity diagram という図も用いられる。それをある程度自動的に生成するスクリプトも作り始めたが、これは完成せずに帰国時期となった。今後は、渡航先では終了しなかった解析をさらに進める。そして結果を近傍の他銀河とも比較を行い、共通性と特異性を明らかにし解釈を深める。以上の解析及び議論をまとめ、論文原稿を執筆し、早々に出版することを目指す。

（ 様式D－２ ）

今回の４ヶ月半の滞在では、当然ながら職場も住居も変わり、大きな環境の変化であった。そのような中で、得がたい経験をさせていただいた。そして、予想外のことも含め、様々な成果を得ることができた。多くの関係者のご協力、ご配慮により、このような滞在の機会をいただいたことに、深く感謝申し上げる。

以　　上