

論文の内容の要旨

Millimeter and Submillimeter Studies on the Active Trinity of Gas, Stars, and Black Holes in the Central Regions of Seyfert Galaxies

(セイファート銀河中心部における活動的なガス、星、
ブラックホールの三相のミリ波サブミリ波帯における研究)

氏名：泉 拓磨

本論文の主題は、近傍セイファート銀河の中心部における活動現象、すなわち活動銀河核 (Active Galactic Nucleus = AGN) と爆発的星形成 (Starburst = SB) の間の物理的連関、また、両者が周囲の環境に及ぼす影響の理解を、それらの形成・進化に大きく影響する分子ガスの調査を通じて深めることにある。特に、銀河中心部でしばしば観測される 100 pc 程度の大きさの circumnuclear disk (CND) に着目して研究を進めた点が新しい。

近年の観測により、大質量銀河の中心には超巨大ブラックホール (SMBH) が存在し、かつその質量 (M_{BH}) と母銀河の性質の間には強い相関があることが明らかになってきた。これは、空間的には圧倒的な隔たりがある両者が何らかの物理的連関を持って進化したことを示唆しており、「共進化関係」として知られている。この非自明な関係の起源を解き明かすには、母銀河から SMBH へとガスを降着させる機構の解明が不可欠である。この観点から、特に銀河中心 < 1 kpc 領域におけるガスの主要形態である分子ガスの諸性質を調べるのが重要となる。特に、密度が 10^4 cm^{-3} を超えるような「高密度分子ガス」は、SMBH 成長の材料・中心核の遮蔽体となりうるだけでなく、大質量星形成の母体でもあり、CND スケールで AGN と SB の間に提唱されている進化的連関の性質・起源を調べる上でも重要である。しかし、これまでの活動銀河における分子ガス観測は、主に電波単一鏡に基づく「総量」の測定であり、その空間分解能は一部の天体を除き、1 kpc を上回っていた。また、過去の研究の多くは、臨界密度の低い ($\sim 10^{2-3} \text{ cm}^{-3}$) CO 分子の回転遷移輝線を観測しており、密度の高さが特徴的である CND スケールを選択的に調査するには不向きであった。

そこで本研究では、近年本格稼働し始めた Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) による高空間分解能・高感度観測データを主に用いて、近傍宇宙における代表的な活動銀河の一種、セイファート銀河に着目し、その CND スケールでの高密度ガスの性質を調べた。アーカイブデータや文献値も用いることで、この空間スケールにおけるミリ波サブミリ波帯高密度ガストレーサー (具体的には HCN(1-0)、HCN(4-3)、 $\text{HCO}^+(4-3)$ 、CS(7-6) の各分子輝線) に関してかつてない規模のデータ群を構成した。

第2章では、このデータに基づき、熱源の違いに起因する分子化学組成の変化に着目した熱源診断法を構築、提唱した。ここでは、過去にいくつかの近傍 AGN において申請者が発見した、HCN(4-3)/HCO⁺(4-3)、HCN(4-3)/CS(7-6)の両比が、星形成銀河での値より著しく高い現象 (submm-HCN enhancement) に注目した。今回集めた合計 16 天体・25 個のデータの解析から、CND スケールでは、確かに AGN でこの現象が確認され、その熱源診断法への応用の妥当性が支持された (図 1)。その一方、主として単一鏡で取得された >1 kpc 分解能のデータには、輝線超過を示さない AGN も存在した。これは、空間分解能不足により、AGN を取り囲む星形成領域の寄与を除去できていないことに起因すると解釈でき、ミリ波サブミリ波帯での熱源探査における空間分解能の重要性を示唆する。

次に、こうした熱源診断法が成り立つ物理的・化学的な要因や素過程について考察した。AGN や SB といった銀河中心部の活動現象は、そのスペクトル型の違いを反映して、周囲の分子ガスに”異なる分子化学組成”を実現しうることが知られている。OB 型星からの紫外輻射は分子雲表層に photodissociation region = PDR を、AGN からの X 線は深部に浸透して X-ray dominated region = XDR を形成することが期待される。さらに、AGN からのジェットやアウトフロー、ないしは超新星爆発といった力学的機構で、分子雲を極めて効率よく、かつ、最深部まで加熱する機構も提唱され始めている。こうした物理化学過程と構築した熱源診断法を関係付けるために、非局所熱力学平衡条件下での輝線強度比の解析を行なった結果、submm-HCN enhancement は HCN 分子の存在量を増やす (すなわち系の分子化学組成を変える) と再現できることを明らかにした。AGN について推定された HCN/HCO⁺存在量比は、星形成領域での典型値よりも数倍から 10 倍以上も高い。ただし、この特異な組成は、XDR でのイオン分子反応では実現が困難であることも分かった。そこで、申請者は、輻射ではなく、AGN のジェットやアウトフローといった力学的な機構が分子ガスを深部まで >300 K 程度に加熱した結果、反応障壁を伴う中性-中性反応が促進されることが、submm-HCN enhancement の発現に重要であることを提唱した。これは、特徴的な化学反応の結果、高い HCN/HCO⁺分子存在量比が自然と実現される「高温化学モデル」 (Harada et al. 2010) とよく整合するシナリオである。

上記の成果は 100 pc 程度の CND スケールでの分子ガス観測に基づくものであるが、第3章では、さらに、ALMA を用いたサブミリ波帯水素再結合線の観測を通じて、AGN のより内側 (<1 pc) の構造を探査する可能性を検討した。ダスト減光を受けずに AGN に特徴的な広輝線領域を検出すれば、AGN の存在を確定させると同時に、中心核ごく近傍の力学構造を探ることも可能である。ところが、解析的計算から、AGN 広輝線領域から放射されるミリ波サブミリ波帯水素再結合線は著しく弱く、さらに、場合によっては同じプラズマから発生する自由-自由放射と完全平衡に達して輝線として観測されないことが示された。すなわち、その検出は ALMA をもってしても非現実的であると言える。

第4章では、CND スケールでの AGN への質量供給機構を探る観点から、セイファート銀河におけるミリ波帯の高密度ガストレーサーである HCN(1-0)輝線データを、ALMA アーカイブや文献から集めて解析した。10 天体分の CND スケールのデータ、32 天体分の母銀河スケール (> kpc) のデータから、各々の高密度ガス質量 (M_{dense}) を推定した結果、まず、CND での M_{dense} は $\sim 10^{7-8} M_{\text{sun}}$ と大きく、AGN 光度や CND スケールの星形成活動を >10 Myr 程度にわたり持続させるに十分な量であることが分かった。次に、AGN 全光度から推定される質量降着率と M_{dense} の間に正の相関があることを発見した (図 2)。CND スケールの観測でこの種の相関を見出したのは本研究が初めてであり、CND が SMBH への直接的質量供給源として機能している可能性が提示された。CND では、かねてより星形成率と AGN 光度 (もしくは質量降着率) との間に相関があること (AGN-SB connection) が観測的に示唆されているが、高密度ガスが星形成の母体であることを考慮すると、本研究で明らかになった相関は、この AGN-SB connection と同質のものであると推論される。さらに、この相関が因果的であると仮定し、その物理的起源を考察した。ただしここでは、依然として CND スケールの観測例が少ないことを考慮し、過去の観測事実も鑑みて、「超新星爆発に駆動される乱流の粘性でガスの角運動量が引き抜かれて AGN へと降着する」という機構を作業仮説として採用した。その結果、CND 内縁からさらに内側 (すなわち降着円盤スケール) へ流入するガス量 (モデル予測値) と、観測的に推定された降着円盤スケールでの AGN 降着率とそこでのアウトフロー率を足した値がほぼ一致することを見出した。モデルに依存する結果ではあるが、これは、CND スケールで初めて質量降着流同士の均衡を示した結果である。

以上のように、本研究は、ALMA を用いた高空間分解能のミリ波サブミリ波帯輝線観測を中心として、100 pc 程度の CND スケールにおける AGN への質量降着機構や活動現象からのフィードバックを調査した。熱源の違いに起因した分子化学組成の違いに着目し、星間ダストによる減光の影響を受けにくいミリ波サブミリ波帯で「熱源診断法」を構築し、物理化学的説明を与えた。ダストに深く埋もれた天体の発掘を通じた銀河進化研究への応用・発展が期待される。また、CND スケールの高密度分子ガスが、SMBH への質量を供給する重要な構造であることを明らかにすると共に、AGN 近傍での超新星爆発に駆動される乱流粘性モデルの下では、CND スケールの質量流入・流出の収支が整合的に理解できることを初めて示した。こうした成果を踏まえると、今後、性能向上が続く ALMA を駆使し、より内側の空間スケールを解像し、より詳細にモデルを検証することが鍵となると予測できる。

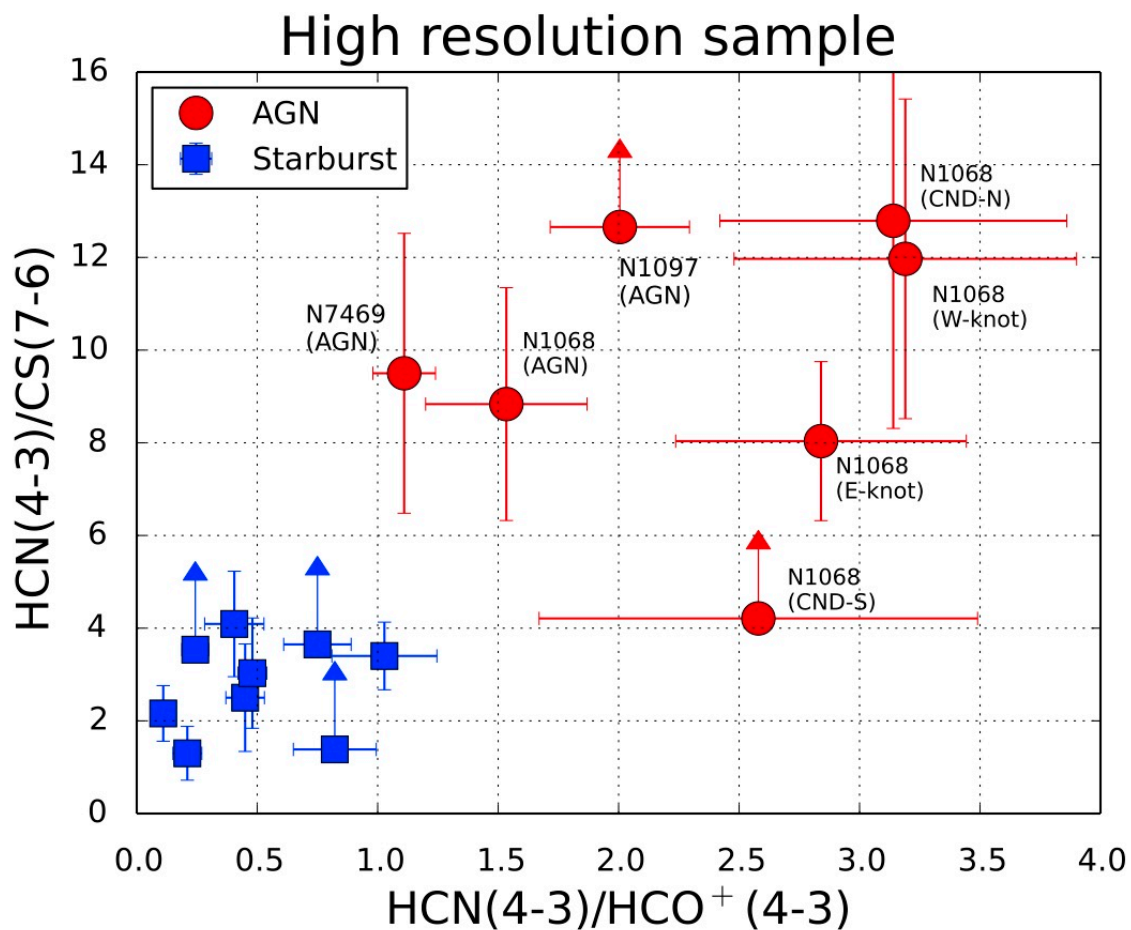


図 1 : AGN と SB 天体の $\text{HCN}(4-3)/\text{HCO}^+(4-3)$ と $\text{HCN}(4-3)/\text{CS}(7-6)$ 輝線強度比の分布。干渉計を用いた <500 pc 分解能のデータのみをプロットしている。AGN が系統的に高い強度比を示している (submm-HCN enhancement) 。

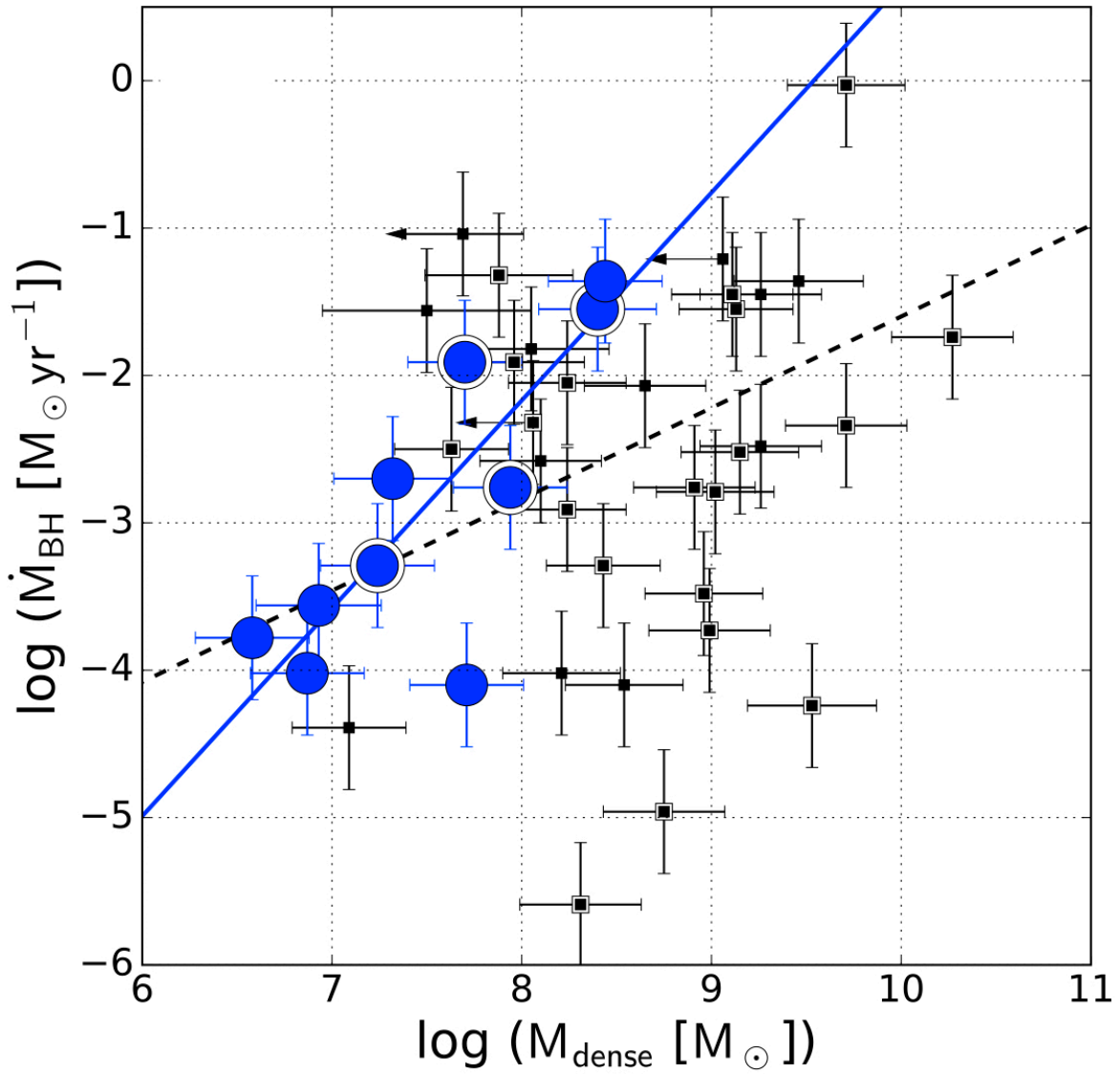


図 2：近傍セイファート銀河における、高密度ガス質量と AGN 降着率の相関図。青点は干渉計を用いた CND スケールのデータ、黒点は単一鏡による母銀河スケールのデータを示す。線はそれぞれのデータへのベストフィットを表す。CND スケールではこれらの量の間に関連が見られ、CND が AGN への質量供給源として機能している描像を示唆している。