

ペルセウス座銀河団中心における 冷たいガスとNGC 1275 活動銀河核の活動



永井 洋

〈国立天文台アルマプロジェクト／総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ¹hiroshi.nagai@nao.ac.jp

近傍銀河団の中心銀河の多くは電波で明るい活動銀河核を持ち、ジェットによる加熱によって周辺ガスが冷却されるのを防ぎ、中心銀河とその巨大質量ブラックホールへの質量降着を抑制すると考えられている。一方で、活動銀河核からのジェット活動を維持するためには、巨大質量ブラックホールへの質量降着が必要である。ジェットによる加熱がある環境下で、どのように質量降着を実現するかは未解決の問題である。近傍宇宙を代表する銀河団であるペルセウス座銀河団の中心銀河NGC 1275の周辺には、ジェットと垂直な方向に、フィラメント状の分子ガスが存在しており、この分子ガスが活動銀河核への質量降着の主要因であることが期待される。アルマ望遠鏡とVLBIを組み合わせた観測によって、分子ガスが核周領域にまで及んでいることがわかり、活動銀河核の活動に本質的な影響を与えている可能性が明らかになってきた。

1. 前置き

筆者は2007年に学位を取得後、強い相対論的ジェットの噴出を伴う活動銀河核（AGN）の電波源進化に興味を持ち、活動を開始して間もない“若い”電波源の物理状態や進化を、超長基線干渉計（VLBI）を用いて観測的研究を行っていた。確か2008年のことだったと記憶しているが、大学院時代の研究室の先輩である浅田圭一氏（現、台湾中央研究院）から1通のメールをいただいたのを鮮明に覚えている。「3C 84がまた明るくなってきた」という内容を伝えるもので、「永井くん、研究をリードしてみない？」と書かれていた。当時、この研究がアルマ望遠鏡を用いた研究へと発展していくとは想像していなかった。15年たって振り返ると、アルマ観測とVLBI観測によって得られたパズルのピースがつながり、銀河団中心銀河におけるAGN活動と周辺環境の関係の理解

が大きく進んだように思う。

2. アルマ望遠鏡による研究前史

3C 84とは電波天文業界では古くから有名な天体である。明るいコンパクトな天体なので、望遠鏡の装置特性や大気起因の信号変動を較正する目的で観測することが多く、天体の素性を知らなくても名前は聞いたことがあるという人が多い。この天体は、ペルセウス座銀河団の中心にある巨大楕円銀河NGC 1275のAGN電波源の名称である。電波放射の起源は相対論的ジェットとそれに付随する電波ローブなどから放たれるシンクロトロン放射である。1960年頃に電波増光が確認され、1980年代前半に最も明るくなって以降、2000年代前半まで減光の一途をたどっていた。1990年代から2000年頃に行われたVLBI観測では、超巨大ブラックホール（SMBH）が存在すると考えられる中心核から、南北方向に5 pc程度にわたっ

て、双対の電波ローブが観測されている。この電波ローブの膨張速度から求められた力学年齢は、1960年頃に始まったジェット噴射によって電波ローブが形成されたと考えて矛盾しない [1]。一方で、中心核の明るさは時間とともに暗くなっている、ジェットの噴出が弱まっていることが示唆されていた。白鳥座Aに代表されるように、AGNのジェットと電波ローブは100 kpcもの差し渡しになることがあるが、 10^7 年程度のジェット噴射の継続を経て、巨大な電波源へと成長していく。これに比べると3C 84は非常に小さい(若い)電波源で、しかも、わずか数十年で活動を終わってしまうかのように見えた。このような電波源がどのように時間進化していくのか、私を含む研究チームは興味を持っていたが、再び明るくなったという報に、一体何が起きているのか突き止めようと、すぐさまVLBI観測の提案を準備した。国立天文台のVERAや大学連携VLBI (JVN)を使った新規観測や、較正天体として観測されていた豊富なアーカイブデータを用いて、2005年頃から新たに活発なジェット噴出が中心核で起きていることを突き止めたのだ [2]。

時を同じくして、この頃ちょうどFermi望遠鏡が打ちあがり、3C 84からガンマ線放射が検出されたことが話題になっていた [3]。Fermi望遠鏡の登場以前、ジェットの視線角が小さい「プレーザー」がガンマ線源の大多数であり、3C 84のようなジェットの視線角が大きい「電波銀河」からのガンマ線放射は限定的であった。なぜ、電波銀河でガンマ線が検出されるのかという大きな問題が議論されるようになった。また、Fermi望遠鏡によって測定された3C 84のガンマ線光度は、1990年代EGRET/CGROによる観測によってつけられた上限値よりも1桁以上高く、10年のタイムスケールで増光していることがわかった。ガンマ線の変動との関係からも3C 84電波源の変動の研究は注目された。ガンマ線放射の起源についてはこの記事では掘り下げないが、いずれにして

も、NGC 1275/3C 84のAGN活動において、多波長で顕著な時間変動が観測されていた。

3. AGN時間変動と冷たいガス

3C 84の電波像を見ると、pcスケールから100 kpcスケールにわたって、複数の電波ローブの構造が確認できる [4]。このことは、最近になって観測されたジェットの再帰的活動が偶然の現象ではなく、過去にわたって何度も繰り返していることを示している。それでは、このようなAGNの活動に大きな時間変動を作る要因は何なのだろうか？SMBHへの質量降着の時間変動が最有力であるが、SMBH極近傍にある降着円盤の密度むらや不安定性のような局所的物理に起因するもの、あるいはもっと大きな空間スケールの天体物理学的影響によるものなど、複数の要因が考えられ、あまりはっきりしたことはわかっていない。前述の通り、NGC 1275はペルセウス座銀河団の中心にあり、銀河全体は 10^7 Kかそれ以上になる高温プラズマに覆われている。銀河団中心ではX線制動放射による放射冷却が強く効き、宇宙年齢よりも短い時間で、中性原子や分子などの冷たいガスが形成されることが知られている。こうした冷たいガスはフィラメントや塊(クランプ)を形成しやすい。仮にこうした冷たいガスがSMBH近傍にまで供給されているとすると、質量降着は非定常となり、AGN活動の時間変動を説明可能である。近年、銀河団中心の環境を模した数値実験でも、放射冷却で冷えたガスがいくつものフィラメントやクランプを形成することが明らかにされている。特に乱流がある条件下では、冷たいガスが作る構造の成長が加速され、SMBHへの質量供給に支配的な役割を果たすことが示唆されている [5, 6]。こうしたガス降着をChaotic Cold Accretion (CCA)と呼ぶ。CCAが成長するのに必要な乱流速度は 150 km s^{-1} 程度とされており [7]、実際にHitomi衛星によって観測されたペルセウス座銀河団における乱流速度と同程度であることが知られている [8]。

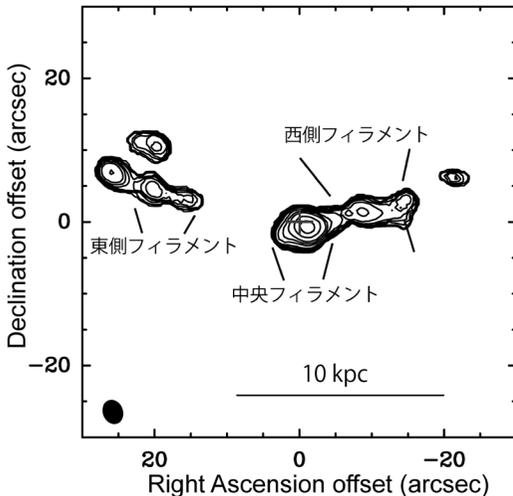


図1 SMAによって観測されたNGC 1275のCO輝線強度分布 ([9, 10] の図を一部改変). 図中の十字 (+) は、AGNの位置を示し、左下の楕円はビームサイズを表す。

NGC 1275では実際に大量の分子ガスの存在が観測によって明らかにされている。Submillimeter array (SMA) の観測によって、kpcスケールにおいて、AGNから東西方向に一酸化炭素分子 (CO) がフィラメント状に分布することが明らかにされている [9] (図1)。こうした構造はCCAとも酷似している。この分子ガスが、よりAGNに近い領域でどのように存在し、どのような運動構造を持つのかを探ることは、銀河団中心銀河におけるSMBHへの質量降着とAGNの活動性との関係を探るうえで極めて重要となる。

4. AGNフィードバックの観点から

前のセクションではAGNの時間変動の要因として、冷たいガスの降着の可能性について紹介した。ここで別の角度から、冷たいガスの観測の重要性を考えたい。

近傍宇宙において観測される、母銀河のバルジ質量とSMBH質量との相関は、母銀河とSMBHの共進化によるものと多くの研究者が考えるところであり、この相関を作るために、AGNから母

銀河へのエネルギーフィードバックが必要と考えられている。AGNからの輻射によって駆動されるアウトフローと、相対論的プラズマの流れであるAGNジェットの両方が、フィードバックの主要因と考えられている。前者は、明るいAGNが最も多く存在した赤方偏移1-2頃の時代において主要なフィードバック機構となっていたと考えられる。一方、近傍宇宙の銀河団中心のような環境では、卓越したAGNジェットをもつ銀河が多く、ジェットが主要なフィードバック機構を担っていると考えられる。アウトフロー・ジェットのいずれにしても、SMBHに一定の質量降着が継続しないとAGN活動を持続できず、フィードバックが働かない。つまり、AGNから母銀河へのフィードバックは、母銀河からAGNへの質量降着と対で考えるべきで、両者を「程よく」実現する「フィードバックループ」があるはずである。

では、このフィードバックループはどのように実現できるのか？ジェットは指向性を持つため、周辺環境に一樣にフィードバックを与えることは難しいと考えられる。そのため、ジェットの軸とは垂直な方向では、フィードバックの影響をあまり受けずに、銀河・SMBHへの質量供給を継続できる可能性がある。実際に、SMAで観測されたkpcスケールの分子ガスフィラメントは、大局的にジェットと垂直方向に分布している。ジェットによって加熱されたガスは、やがて放射冷却によって冷えて分子ガスを形成し、ジェットと垂直な面に集積するようにCCAを作り出しているのかもしれない。このように、銀河団中心銀河における冷たいガスの調査は、フィードバックループがどのように実現するのかを明らかにする点でも重要である。

5. アルマ望遠鏡による核周円盤の発見

ここまで、銀河団中心銀河において冷たいガスの研究の重要性を述べたが、NGC 1275で観測さ

れている分子ガスが、果たしてAGNにまで供給されるのだろうか？ここでNGC 1275におけるいくつかの空間尺度と、望遠鏡の分解能の関係を整理しておく。SMBHの重力が支配的になる領域として、Sphere of gravitational influence (SOI) と Bondi半径がある。前者は、星の運動に対して重力の影響が勝る領域、後者はガスの熱運動に対して重力の影響が勝る領域として定義される。NGC 1275の場合、前者は約60 pc、後者は約10 pcである。一方で、アルマ望遠鏡登場以前、SMAがNGC 1275の分子ガスを観測した際の角分解能は約3秒で、距離にして約1 kpcに相当する。SMAの観測では、AGN付近に分子ガスの集中が見られるものの、ブラックホールの重力圏を示す指標に比べて圧倒的に分解能が悪い観測のため、分子ガスが本当にSMBHの燃料源となっているのかは定かではない。これに対し、アルマ望遠鏡は、最大で10ミリ秒角（距離にして約3.5 pc）程度の分解能を發揮する望遠鏡である。これはSOI, Bondi半径ともに分解可能である。

よりブラックホールに近い領域の分子ガスの分布・運動を調べるべく、Cycle 5の観測募集に提案をすることにした。過去のSMAによる観測や、いくつかの事前知識、観測実行のされやすさなどを考慮し、バンド6で観測が可能ないくつかの分子輝線を狙うこととし、SOIスケールを分解できる望遠鏡配列で観測を計画した。私自身はもともとAGNにおける高エネルギー現象を専門としていて、もっぱらシンクロトロン放射を観測することが多く、分子ガスの観測に取り組むのはこれが初めてであった。色々勝手がわからないこともあり、国内外の心強いエキスパートたちを共著者に迎え、入念に観測計画を練った。話は脱線するが、アルマ望遠鏡の観測募集は当時倍率が4-5倍程度あり（現在はもっと高いのだが）、観測が採択されるのは容易ではない。自身の経験を振り返ると、「どれくらい早く観測提案書を書き始めたか」と「レフェリーによる評価」はよい相関があ

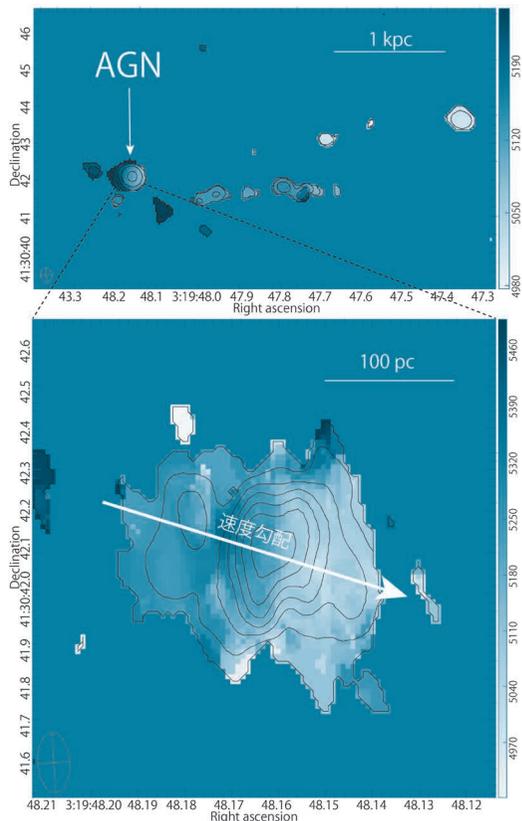


図2 等高線はCO輝線の積分強度図、カラーはCO輝線の速度分布(単位 km s^{-1})を表す。上図は、干渉計の短基線データに重みをかけてイメージングした画像で、kpcスケールの構造を示したもの。ビームの長軸は0.4″、短軸は0.3″。図1で示した中央フィラメントの領域に相当する。AGNの位置から主に西側に複数のフィラメント・クランプ状のガス雲が見て取れる。下図はAGN付近の核周領域のみに着目した画像。ビームの直軸は0.14″、短軸は0.08″。北東から南西にかけて方位角70°に速度勾配が観測され、回転円盤を示唆する。

るように思う。この観測提案の第1稿は、締め切りの約1ヵ月前に用意し、その後、幾度となく共著者とのやり取りを行い、提出に至った。幸い、観測提案は採択され、部分的ではあったが観測も無事実行された。

図2にアルマ観測で得た一酸化炭素(CO)輝線の積分強度分布・速度分布を示す。図2の下図

の分解能は約30 pcで、SOIを空間分解する解像度である。図2の上図では、フィラメントのほとんどは過分解され、全貌を見ることができないが、SMA観測で1本のフィラメントのように見えていた領域は、一直線上にないいくつかの副構造（サブフィラメント）からなり、しかもそれぞれの副構造が異なる速度成分を持つことがわかった[10]。CCAの数値実験でも、複数のフィラメントが形成されることが示唆されていて、kpcスケールの分子ガスがCCA由来であることを支持している。そして、一番の発見だったのは、中心100 pc以内に、円盤状のガスの分布が見られたことである（図2下図）[10]。方位角70度の方向に速度分布の勾配が見られ、回転するガス円盤であることを示唆する。以降、この分子ガス円盤を核周円盤と呼ぶ。CO輝線強度から見積もられる核周円盤全体の分子ガス質量は約 $10^8 M_{\odot}$ になる。楕円銀河は一般的にガスが少ないと言われるが、 $10^8 M_{\odot}$ は近傍宇宙で見られる星形成銀河の核周領域の分子ガス質量と遜色がなく、NGC 1275の核周領域に大量の分子ガスが存在することが明らかになった。ここで、質量降着率のおおよその見積りをしてみる。核周円盤は幾何学的に薄く、運動学的粘性によって円盤内のガスの角運動量輸送が行われていると仮定した場合、ガス降着のタイムスケール(τ)は $\tau=r/\alpha c_s \sim r/\Delta v$ と見積もることができる。ここで、 r は円盤半径、 α は粘性係数、 c_s は円盤ガス中の音速、 Δv はガスの速度分散である。円盤ガスの質量降着率は $\dot{M} \sim M/\tau$ と見積もることができる。CO輝線強度から分子ガス質量への変換の際に使用する変換係数の値にも依存するが、 $\dot{M} \sim 1-10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ となる。NGC 1275のAGN光度は $10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ で、放射効率0.1を仮定した場合に必要な質量降着率は $0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ であることから、AGN光度を説明するのに十分な質量降着率であることがわかる。実際には星形成にガスが消費されたり、AGNからの輻射圧によってガスの一部が吹き飛ばされる可能性があり、この質量降

着率が維持されるとは限らないが、この点については後で触れる。

興味深いことに、核周円盤の速度勾配から示唆される回転軸と、VLBIで観測されているジェットの噴出方向[11]がほぼ一致する。ジェットはブラックホールの事象の地平線スケールに存在する降着円盤の回転軸方に噴出すると考えられる。10-100 pcスケールにおける核周円盤と事象の地平線スケール($\ll 1 \text{ pc}$)の降着円盤という、空間スケールが大きく異なる二つの円盤の回転軸がほぼ一致するという事は、核周円盤が降着円盤の角運動量を決めていることを示唆する。このことから、核周領域の分子ガスがAGNの活動を特徴づける重要な役割を果たしていると考えられる。

6. 吸収線とVLBI観測が伝えるAGN近傍のガス分布

アルマ望遠鏡による観測では、CO輝線のほかに高密度ガスのトレーサーとしてよく用いられるHCN、 HCO^+ 輝線の観測も行った。CO輝線同様、HCN、 HCO^+ ともに強度分布・速度分布は核周円盤の存在を示唆する。しかし、CO輝線では見られなかった吸収線を検出することに成功した。NGC 1275には、明るい連続波電波源3C 84が存在する。そして、電波連続波の90%以上を、2005年頃から噴出が始まったジェットからの放射が担っている。このジェットの全長は、アルマ望遠鏡の観測時点で約1 pcであった。これほどコンパクトな背景光に対して吸収線が観測されるには、母銀河スケールの分子雲ではなく、背景光付近に存在する分子雲が吸収を担っているのが妥当である。しかも、この吸収線は、NGC 1275の系の速度に対して $300-600 \text{ km s}^{-1}$ で青方偏移していることから、観測者に向かって飛んでいることになる。この状況を説明するもっともなシナリオは、ブラックホールから1 pc付近にある分子雲がジェットと衝突した結果、観測者の方

向に飛んでいると考えると都合がよい。ジェットの進行方向、すなわち、核周円盤の赤道面から垂直な方向にそのような分子雲がなぜ存在しているのかは定かではないが、CCAによって供給された分子ガスという可能性が考えられる。あるいは、AGNからの輻射圧によって核周円盤のガスの一部が赤道面から垂直方向に吹き上げられたものかもしれない。いずれにしても、分子ガスが1 pcの領域にまで及んでいることは確実に考えられる。

ちなみに、我々の研究グループは、VLBIを使って3C 84のジェットの運動を長年追っている。このVLBI観測から、非一様な周辺物質との相互作用の結果、ジェットの先端（ホットスポット）の不規則な運動を検出している [12-14]。つまり、pcスケールの核周物質はクランプ状に分布していることを示唆する。こうしたジェットと相互作用を起こすクランプが、アルマ望遠鏡で観測された吸収線を引き起こしているのかもしれない。

7. 核周円盤からの非熱的放射の発見

アルマ望遠鏡による観測によって、核周領域に大量の分子ガスが存在すること、さらにその一部は少なくとも1 pcスケールにまで及んでいることを明らかにした。核周円盤からは、HCNやHCO⁺のような高密度ガストレーサーも検出されていることから [10]、星形成が行われている可能性が高い。核周円盤のガスは星形成によって消費されつくしてしまわず、SMBHへと降着することができるのだろうか？また、そもそも分子ガスはほとんど粘性を持たないので、角運動量を抜き取るためには、別の粘性要因が必要となる。その粘性要因はなんだろうか？

核周円盤における星形成によって大質量星が作られている場合、超新星爆発によって円盤中に非熱的電子が供給されると考えられる。非熱的電子は磁場と相互作用することでシンクロトロン放射

を発生する。このシンクロトロン放射の光度は星形成率を見積もる指標となる。これによって、円盤のガスが星形成によってどの程度消費されるのかを推定することが可能だ。また、超新星爆発は核周円盤中に乱流を形成するため、乱流粘性による角運動量輸送を可能とする [15, 16]。これによって核周円盤の分子ガスのブラックホールへの降着を促進させている可能性がある。以降、この理論モデルをSN乱流モデルと呼ぶ。この推論を確かめるために、核周円盤に付随したシンクロトロン放射の観測を試みた。そこで用いた観測データは、300 MHz帯の「超低周波」のVLBI観測である。超新星爆発に伴うシンクロトロン放射は、低周波ほど明るい。一方で、望遠鏡の開口を固定した場合、低周波にいくほど分解能が悪くなるので、アルマと同程度の分解能を得るためには、アルマよりもはるかに大きい開口（長い基線長）が必要となる。偶然にも、この「超低周波（300 MHz）」と「VLBI」という組み合わせが、ちょうどアルマ望遠鏡と同程度の空間分解能を提供し、核周円盤における分子ガスの分布とシンクロトロン放射の分布の比較を可能とした。

VLBIデータの画像化を行ったところ、見事、核周円盤に付随したシンクロトロン放射を検出することに成功した（図3[17]）。シンクロトロン放射の光度から見積もられる星形成率は $3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ となった。SN乱流モデルと見積もられた星形成率を用いて、超新星爆発によって作られる乱流の程度を見積もることが可能である。川勝等 [15, 16]のモデルをもとにすると、乱流速度は 24 km s^{-1} であることがわかった。この乱流速度は、アルマ望遠鏡で観測された分子ガスの速度分散（ $\sim 25 \text{ km s}^{-1}$ ）と非常によく一致する。つまり、超新星爆発によって駆動される乱流によって角運動量輸送が起こっていると考えて矛盾しない。

では、星形成によって消費されるガスと、質量降着によってより中心に落下するガスの量は、どちらが多いだろうか？アルマによる観測で得られ

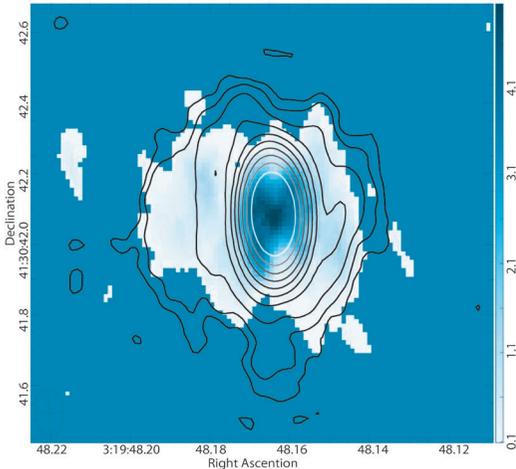


図3 カラーはCO積分強度(単位 $\text{Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$)と等高線は330 MHz連続波強度分布を表す。CO積分強度は図2(下)と同一。核周円盤にわたって超新星爆発起源と考えられる連続波放射(シンクロトロン放射)が検出されている。

た分子ガス質量を、上記見積もりで得た星形成率 $3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ で割って得られるガスの消費タイムスケールは 10^8 年になる。一方で、前述の核周円盤の降着タイムスケールは 10^7 年のオーダーであり、星形成によって消費されるタイムスケールよりも短い。したがって、核周円盤中のガスの一部は、さらに内側へと落下することができると考えられる。

8. その他銀河団中心銀河における分子ガスとAGN活動の関係

ここまで見てきたように、NGC 1275にはCCAとよく似た分子ガスフィラメントが存在し、フィラメントを通じて核周領域にガスが供給されていると考えられる。核周領域ではガスが円盤を形成するが、円盤中で発生する超新星爆発起源の乱流によって、ガスがさらに内側へと降着することが実現されていると考えられる。従来、銀河団中心

銀河では、熱いプラズマガスによるBondi降着によって、AGNへの質量降着が起こっていると考えられてきたが、NGC 1275では冷たい分子ガスが質量降着が重要な役割を果たしているようである。これはNGC 1275だけの特異な現象なのだろうか？

東京都立大の藤田裕氏との共同研究で、アルマ望遠鏡のアーカイブデータを用いて、他の銀河団中心銀河9天体の核周領域のガスについても調査を行った [18]。これによると、核周領域の分子ガス質量と、X線キャビティ*1から求められたジェットのパワーとの間に緩やかな相関があるのに対し、ミリ波帯の連続波強度から見積もられるジェットのパワーと核周領域分子ガス質量との間には、顕著な相関が見られなかった。X線キャビティはkpcスケールの構造であるため、そこから見積もられたジェットのパワーは、長いタイムスケールにおけるジェットの平均的なパワーと考えられる。一方で、ミリ連続波は比較的ブラックホールに近いジェットの根本から放射されるため、現在のジェットパワーと考えることができる。つまり、核周領域の分子ガスは長期的なAGNの活動を定める主要因になっていることを示唆する。

9. まとめと今後の展望

NGC 1275におけるフィードバックループの描像を模式図にしたものが図4である。NGC 1275では、CCAとよく似たフィラメントを通じて、核周領域に大量の冷たい分子ガスが注ぎ込まれていると考えられ、この分子ガスがAGNの活動に本質的な役割を果たしていると考えられる。さらに、核周領域の分子ガスの質量とジェットパワーの関係から、その他の銀河団中心銀河においても、分子ガスがAGN活動に主要な役割を果たし

*1 X線を放射する銀河団ガス中に作られる空洞のこと。ジェットによってガスが押し除けられているために空洞となって観測される。

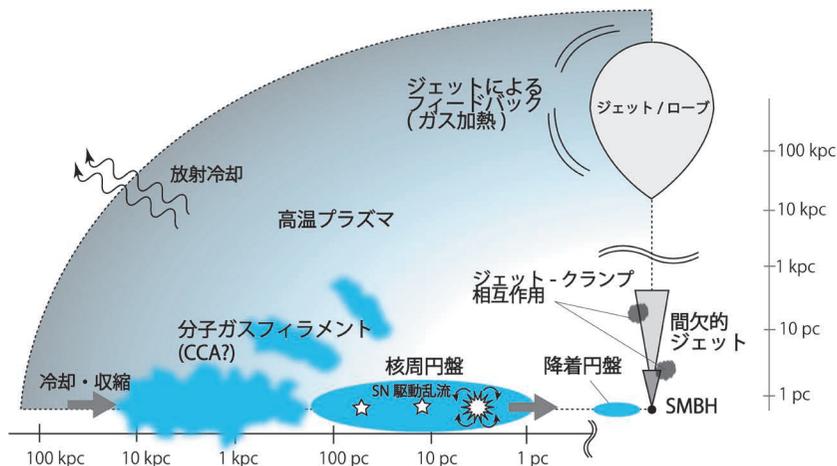


図4 NGC 1275のAGNとその周辺環境の想像図。

ていることの間接的な証拠を得ることができた。いずれの研究も、アルマ望遠鏡登場前には、感度・分解能の両面から不可能な研究であった。

現在、我々の研究グループでは、さらに解像度の高いアルマ望遠鏡データを用いて、Bondi半径付近の分子ガスの調査を行っている。この領域においても分子ガスの存在が認められれば、ブラックホールの重力圏内に冷たいガスが存在することが示され、冷たいガスがAGNの燃料になっているという描像をさらに確実なものとする。アルマ共同科学事業フェローの川中宣太氏（都立大）や同大の学生と一緒に、このテーマに挑んでいる。

10. アルマ望遠鏡運用開始10周年に寄せて

私にとってアルマ望遠鏡は、研究のツールであると同時に、所属機関における職務の舞台でもある。アルマ望遠鏡が最初の科学運用を開始した年に、国立天文台アルマプロジェクト（当時アルマ推進室）の研究者として着任した。アルマ望遠鏡の運用、観測機能の科学試験、ユーザー支援に携わり、望遠鏡サイトにも何度も通った。まさにアルマの10年の歩みとともに、天文学者としての

キャリアの多くの時間を過ごしてきた。微力ではあるが、自分の手でアルマ望遠鏡という巨大なシステムを作り上げる一端を担ったという自負がある。そんな手塩にかけた望遠鏡で取得されたデータが自分の手元に届いたときは、感慨深いものがあった。先日、チリのプエルト・バラスで開催された10周年記念研究会では、“transformative”（変革をもたらす）という言葉は何度も聞いた。様々な分野において、大きな変革が起こった10年であることが再認識できた。一方で、次の10年に向けた望遠鏡拡張「Wideband Sensitivity Upgrade (WSU)」が動き出しており、新たな変革を前に進める時期を迎えている。今後もアルマ望遠鏡と共に歩めることが楽しみであるとともに、目の前に積みあがったWSUの難問・課題にどう取り組むか、身の引き締まる思いだ。

謝辞

本稿は主に [2], [10], [11], [14], [17] の結果をもとにしています。一連の研究を通じて、大変多くの方々にお世話になりました。全員のお名前をあげるのには控えさせていただきますが、すべての共著者の方々はこの場を借りて感謝を申し上げます。また、執筆の機会をいただきました甘日出文

洋さん、本記事の校正を担当していただいた宮本祐介さん、日下部展彦さんをはじめ、天文月報編集委員の方々にお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Asada, K., et al., 2006, PASJ, 58, 261
- [2] Nagai, H., et al., 2010, PASJ, 62, L11
- [3] Abdo, A. A., et al., 2009, ApJ, 699, 31
- [4] Pedlar, A., et al., 1990, MNRAS, 246, 477
- [5] Gaspari, M., et al., 2013, MNRAS, 432, 3401
- [6] Gaspari, M., et al., 2015, A&A, 579, A62
- [7] Gaspari, M., et al., 2017, MNRAS, 466, 677
- [8] Hitomi Collaboration, Aharonian, F., et al., 2016, Nature, 535, 117
- [9] Lim, J., et al., 2008, ApJ, 672, 252
- [10] Nagai, H., et al., 2019, ApJ, 883, 193
- [11] Nagai, H., et al., 2014, ApJ, 785, 53
- [12] Kino, M., et al., 2018, ApJ, 864, 118
- [13] Kino, M., et al., 2021, ApJ, 920, L24
- [14] Nagai, H., et al., 2017, ApJ, 849, 52
- [15] Kawakatu, N. & Wada, K., 2008, ApJ, 681, 73
- [16] Kawakatu, N., et al., 2020, ApJ, 889, 84
- [17] Nagai, H. & Kawakatu, N., 2021, ApJ, 914, L11
- [18] Fujita, Y., et al. 2023, PASJ, 75, 925.

Cold Molecular Gas as the Main Fuel for Active Galactic Nucleus of NGC 1275

Hiroshi NAGAI

National Astronomical Observatory of Japan, ALMA Project, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Central galaxies at nearby cluster of galaxies preferentially have radio-loud active galactic nuclei (AGNs), which drives radio jets. The jets provide an enormous energy in the intracluster medium and intragalactic medium, preventing catastrophic cooling of the gas and eventually regulating gas accretion onto the central galaxies and their super massive black holes (SMBHs). However, the AGNs must be fueled at some level to maintain the AGN jet activity. Fueling mechanism to SMBHs under the heating by the jets is still an open question. NGC 1275 at the Perseus cluster is the reservoir of a large amount of cold molecular gas with filamentary structures on kpc-scale. Recent our ALMA observations as well as VLBI observations have revealed that the cold molecular gas is in fact provided in the circumnuclear region (<100 pc) and plays an important role for maintaining AGN activity. We report observational results indicating the cold molecular gas as a main fuel of the AGN.