

# ALMAで探る活動銀河中心核の発現機構 —ガス・星・超巨大ブラックホールが 織りなす三位一体の世界—



泉 拓 磨

〈日本学術振興会特別研究員 PD / 東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: takumaizumi@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

ミリ波サブミリ波帯で輝く低温分子ガスは銀河中心部のガス成分の主たる存在形態であり、星形成活動の母体と呼べる。また、銀河中心の超大質量ブラックホールを育む成長材料としても機能し、同時に活動銀河中心核 (active galactic nuclei; AGN) の各種フィードバックを受ける存在でもある。近年、ALMAの登場により、近傍銀河では中心数百pc以内といったコンパクトな領域での星や超巨大ブラックホールの成長機構やフィードバック現象の理解が大きく進み始めた。本稿ではまず、(世界的にもまだ研究者人口の少ない!) ミリ波サブミリ波帯でのAGN観測の背景をフィードバックの観点から概説した後、われわれの「超新星爆発に駆動されたガス降着」に関する研究成果を紹介する。

## 1. はじめに

天の光はすべて星!...と思う方は本誌読者にはいないだろう。“活動的な”銀河の光は、大雑把に分けると爆発的な星形成活動(スターバースト)だけでなく活動銀河中心核(active galactic nuclei; AGN)にもその起源を求めることができる。後者は太陽の100-1,000万倍以上の質量の超大質量ブラックホール(supermassive black hole; SMBH)に降着円盤を通じて落ち込む物質が解放する重力エネルギーが熱源とされる。ガス降着がSMBHの主たる成長機構ならば、そのほとんどはAGNとして輝く時期に発生したのだろう。

現在、AGNに関する最大公約数的な研究テーマは銀河とSMBHの「共進化」だろう<sup>1)</sup>。これまで多くの研究により、銀河バルジの速度分散や恒星質量と、SMBH質量との間の強い正の相関が

確認されている。恐ろしきは銀河⇔SMBH間の圧倒的な空間の隔たりである。AGNは銀河中心部に鎮座する<0.1 pc程度のコンパクトな存在で、母銀河に比べると10万-100万倍も小さい。単純には両者は情報のやり取りをしそうにないが、現実には見事な相関関係を生み出している。そこで、両者の間には互いの成長を制御する進化機構が存在するのだという主張が生まれ、今日「共進化」と呼ばれる一大パラダイムが構築された。

この関係性の起源として、現在最も広く受け入れられているシナリオでは、(i) 銀河合体により星間ガスが圧縮され爆発的な星形成が誘発される、(ii) 大量の星間ガスが引き続いて銀河中心部に流入しAGNを発現、(iii) AGNの強烈な放射が周囲の残存ガスを散逸し、最終的に銀河とSMBHの質量を固定する、という、天体の自己進化制御機構を取り入れた成長過程が考えられて

いる<sup>2),3)</sup>。しかし詳細は依然として不明で、現代天文学の重要課題となっている。具体的な天体成長機構を観測的に示すことが強く求められているわけだ。この文脈において、AGN (SMBH 成長) 研究の銀河進化論的枠組みでの大義名分も成立すると言えよう。

### 1.1 ALMA で見る近傍 AGN

では、ALMA を用いた近傍 AGN 研究の意義を整理してみよう\*1。まず、ミリ波サブミリ波帯の大きな特徴は、塵 (ダスト) の減光をほとんど受けない点にある。一般的に銀河中心領域はダストが豊富で、可視光帯では見通しにくい。また、形成途上の天体は、必定その成長材料であるガス・ダストを大量に伴う。長波長帯におけるこうした領域・現象に関係する素過程の詳細な観察は、天体進化の完全理解に必須である。

ミリ波サブミリ波帯は多くの分子輝線を擁することも重要だ。それらは典型的には  $H_2$  密度  $\sim 10^{2-6} \text{ cm}^{-3}$ 、運動温度  $\sim 10-100 \text{ K}$  程度の低温高密度ガスを探索するのに適している。この成分は、実は銀河中心の  $< 1 \text{ kpc}$  におけるガス質量のほぼすべてを占める<sup>4)</sup>。これが手を替え品を替え SMBH に降着するのだろう。言わずもがな、高密度分子ガスは星形成活動の母体でもあるので、分子ガスが受ける何らかのフィードバックはそれすなわち星形成へのフィードバックでもある。この意味で、分子ガスは星形成や SMBH 成長、フィードバック現象を含んだ物質の輪廻を語るうえで欠かせない、銀河中心領域の最重要構成要素の一つなのだ (図1)。

近傍 AGN 研究の意義についてはどうだろうか？ 実は、赤方偏移  $\leq 0.1$  に存在する AGN 種族の大半 (セイファート銀河) は “ショボい”。AGN 全光度はせいぜい  $\sim 10^{44-45} \text{ erg s}^{-1}$  程度。より高赤方偏移のクエーサー種族に比べると 1-2 桁は暗く、強力なフィードバックをもって共進化の舞台上で活

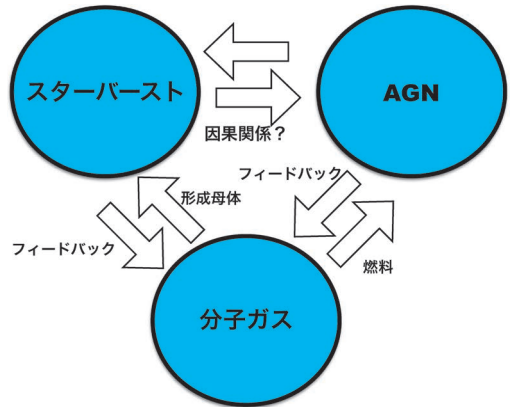


図1 銀河中心領域で生じるガス、星形成、SMBH 成長 (AGN) の関係性の模式図。“因果関係?”と書いているのが、本稿で述べるスターバースト—AGN コネクションだ。

躍しているとは考え難い。しかし、それを考慮しても尚、近傍天体には空間分解可能という極めて大きな利点がある。理論モデルに織り込まれた仮定の妥当性の判断、各種パラメータの現実の値の導出、現実に起きる素過程の同定、等々のためには、空間要素ごとに得た詳細な観測量も重要な情報となるはずだ。もちろん現実には、主たる物理現象の光度や周辺環境、赤方偏移への依存性から、話は簡単ではないが、それでもあるパラメータスペースで起きる現象をつぶさに理解することは、宇宙史における天体進化の理解に少なからず貢献できると信じる。

## 2. SMBH 成長—鍵は星形成にあり？

この信条の元、私はこれまで AGN フィードバック・フィーディングの両面から ALMA を用いたセイファート銀河の観測研究を進めてきた。ここでは紙面の都合上、フィーディング関連の話題に絞って内容を紹介する。一つ注記しておくが、本稿で紹介するわれわれの成果<sup>5)</sup> は ALMA の初期科学運用期のデータを利用しており、典型的な空

\*1 本稿では筆者の研究経験に基づき分子ガス観測を取り上げるが、連続波観測でも多様な AGN 研究が可能である。

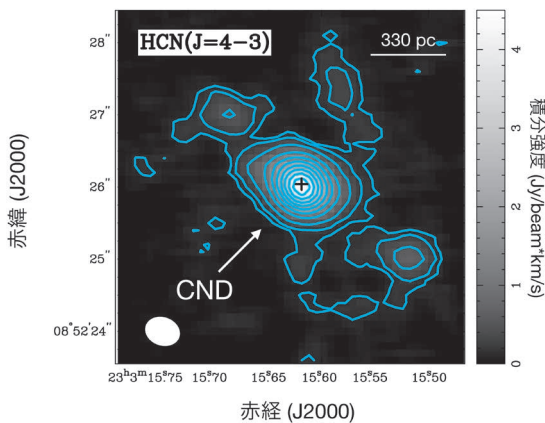


図2 高光度セイファート銀河NGC 7469の中心～1.5 kpc領域におけるHCN( $J=4-3$ )輝線強度の空間分布<sup>8)</sup>。中心に数百pc規模の高密度分子ガスの集中領域が見える。それがCNDだ。中心の十字はAGNの位置を、白い楕円は観測ビームを表す。

間分解能は依然として数百pc程度(角分解能で $\sim 1''-2''$ )である。実は多くの理論モデルが、母銀河から降着するガスはその残在角運動量により銀河中心の数十から数百pc程度の領域に分子ガス円盤を形成すると予言している<sup>3), 6), 7)</sup>(便宜上これをcircumnuclear disk; CNDと呼ぶ, 図2)。つまり、上述の空間分解能はCND相当であり、その中身のさらなる分解には現段階では(ほとんどの場合)至っていない。今後のALMA超高空間分解能観測へ大いに期待するところである。

## 2.1 ガス供給問題

SMBHの成長過程, すなわちSMBHフィーディングを考えるにあたり、重要なのは「いかにして降着ガスの角運動量を引き抜くか」である。このAGNの“ガス供給問題”について、母銀河スケールの話は谷口義明氏による天文月報記事<sup>9)</sup>があるので、そちらをご覧ください。重要な観測事実は、少なくとも $>kpc$ の空間スケールにおいて提唱されている降着機構は、AGNだけでなくnon-AGNでも同様に観測されるという点だ<sup>10)</sup>。たとえば非軸対称ポテンシャルを生み出し効率的なガス降着を促す(恒星系の)棒状構造

は、AGN銀河とnon-AGN銀河でほぼ同じ確率で存在する。 $>kpc$ スケールの現象では両者は峻別不可能だ。

## 2.2 いざCNDへ

$>kpc$ でちががあかないならば、次に注目すべきは銀河中心の数百pc領域だ。そう、CNDである。その定量研究として大きな進展をもたらしたのは、Very Large Telescope (VLT)のSINFONIを用いた高空間分解能面分光観測だ。Hicksらによる観測では、 $\sim 1000$ 度の高温ガスから放射される波長 $2.12 \mu m$   $H_2$ 輝線の面輝度はAGNのCNDのほうがnon-AGNの場合より系統的に高いことが示された<sup>11)</sup>。この輝線の励起機構は多岐にわたるが、もしその光度 $\propto$ ガス質量ならば、AGNではCNDのガス質量面密度が系統的に高い、つまり“CNDのガス質量面密度は質量降着を制御する”と解釈できる。ちなみにこの成果が発表されたのは2013年。いかにこの領域の本格研究が始まったばかりなのかがおわかりいただけるだろう。

さて、ここで1.1節で述べた内容を思い出してほしい。CNDの空間スケールにおいては、ガスの主たる存在形態は“低温”分子ガスであり、決して近赤外線で光る高温( $\sim 1000-3000$  K)分子ガスではない。きちんと低温分子ガスの定量をしないと、決定的なことは言えない。ALMAに期待される役目だ。

## 2.3 スターバースト—AGNコネクション

ガス面密度に関連して注目しておきたいことに、“スターバースト—AGNコネクション”がある。要は星形成活動とAGN現象には進化的関連があるという主張だ。積分形としては冒頭で述べた共進化関係が、微分形としては星形成率(star formation rate; SFR)とSMBHへの質量降着率( $\dot{M}_{BH}$ )が示す正の相関関係<sup>12)-14)</sup>がその主張の根拠になる。後者は特にCNDスケールで統計的有意性が高い。

ここで、 $SFR-\dot{M}_{BH}$ 相関を“因果的”だと考えて

みよう。その論拠は、これまたVLTによるCND中の星種族の研究だ。Daviesらは、AGNのCNDで観測される恒星由来の連続波、その色、吸収線に対する種族合成モデル解析を通じて、スターバーストが始まってからの経過時間がほぼ一様に $\sim 100$  Myr程度であることを突き止めた<sup>15)</sup>。これは、星形成活動によって直接的にAGN現象が駆動されていることを強く示唆する。

以上を踏まえると、大雑把に以下のようなSMBH成長シナリオが考えられるだろう— (1) 母銀河から中心 $\sim 100$  pcまでガスが降着<sup>\*2</sup>。(2) CNDにガスが十分にたまるとスターバーストが起きる。(3) スターバースト、より具体的にはSFRに正相関する機構により、CNDからさらに内側のSMBH御本尊へのガス降着が駆動される一。

重要かつ興味があるのは(3)の機構の正体である。幸運なことに、実は前述の“星形成開始から $\sim 100$  Myrたって効果を発揮する機構であるべし”という縛りをつけると、有力候補はかなり絞られる。その数少ない候補のうち、われわれの研究ではまずは超新星爆発でガス降着が駆動されるというモデルを採用した(理由は後述)。超新星爆発に起因する乱流粘性でガスの角運動量を引き抜くことがミソである。ところでCND領域における超新星爆発、それに引き続くガス降着といえ、和田桂一氏(鹿児島大)による先駆的な流体シミュレーション<sup>16)</sup>がAGN業界では有名である。その研究を発展させ、解析的な扱いが可能なSMBH進化モデルに落とし込んだのが、共同研究者の川勝望氏(呉高専)で、われわれの研究でもその解析モデル<sup>6)</sup>を利用させていただいた。

### 3. CNDはSMBH降着を担うか？

こうして研究の心づもりはできた。観測的に確認したいことは以下の2点だ。

- CNDスケールの分子ガス質量(正確には質量面密度だろう)が $\dot{M}_{\text{BH}}$ を制御するか否か。
- 超新星爆発駆動型質量降着モデルの妥当性。

ところで余談だが、これも何かの巡り合わせか、私がこの研究を始める下準備は自然と整っていた。当時、手元にはAGNによる星間物質への化学的フィードバックの検出<sup>8), 17), 18)</sup>を目標として、低光度セイファート銀河NGC 1097・高光度セイファート銀河NGC 7469に対するALMAデータがあった。観測輝線にはシアン化水素HCN( $J=1-0$ )が含まれている。この輝線は臨界密度が $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ と高く、星形成をする高密度ガスを直接探査できる。星形成がガス降着に与える影響を知りたいというわれわれの目的に適った輝線であったので、スムーズに本研究に移行できたというわけだ。ALMAデータの品質の高さをご承知のとおりで、一つのデータを複数のサイエンスに利用できる。常日頃から多くのテーマにアンテナを張っておくことが重要だ。閑話休題。

もちろん、たった2天体で偉そうに物を言うわけにはいかない。ALMAのアーカイブデータや、出版済論文からのデータ収集を続けた。最終的には2016年頭の時点で、セイファート銀河のHCN( $J=1-0$ )輝線に関する、高分解能・電波干渉計データ10天体分+比較サンプルとしての低分解能・電波単一鏡データ32天体分を得た<sup>\*3</sup>。干渉計データについては、セイファート銀河における過去最大の高密度ガスデータ群である。

#### 3.1 やはりCNDが重要だった！

結果の紹介に移ろう。図3にHCN( $J=1-0$ )の輝線光度から推定した高密度ガス質量( $M_{\text{dense}}$ )と、AGNのX線放射から推定した $\dot{M}_{\text{BH}}$ の相関を示す。前者は観測された輝線光度がビリアル平衡にある多数のガス雲からの放射の集合体であることを、後者はAGN降着円盤の物理状態(質量降

\*2 ここに至る過程は棒状構造でも銀河合体でも何でも良い。結局は残存角運動量でCNDが形成されるからだ。

\*3 メジアン空間分解能はそれぞれ220 pc, 5.5 kpcである。220 pcだとCND全体( $\sim 100$  pc)を内包するので、CNDからの輝線放射はすべて観測できていると思って構わない。



着に対する放射効率)を仮定することで導出できる。ただし2章で注記したとおり、この研究時点での空間分解能ではCNDを分解しきるには至ら

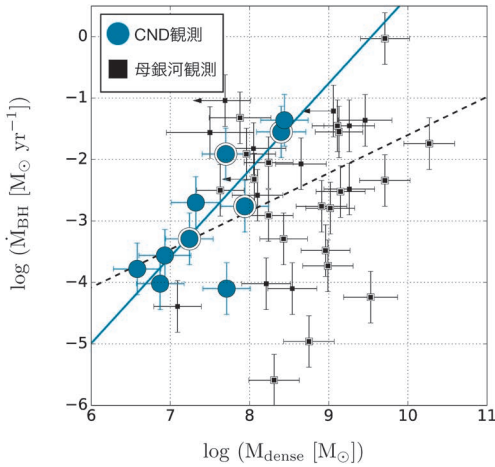


図3 セイファート銀河における高密度分子ガス質量 ( $M_{\text{dense}}$ ) と SMBH への質量降着率 ( $\dot{M}_{\text{BH}}$ ) の相関図。丸印は  $M_{\text{dense}}$  を CND スケールで、四角印は母銀河のスケールで測定したことを意味する。CND スケールでは比較的良好な相関(実線)が確認できるが、母銀河スケールでは相関は弱い。

ず、ガス質量面密度の直接測定は不可能だった。一方で、典型的な CND サイズが皆似たり寄ったりであれば、質量そのものを使った相関図も面密度を使った場合の図と同じ意味をもつ。その意図で作成したのが図3である。

図3からは、CND スケールの  $M_{\text{dense}}$  と  $\dot{M}_{\text{BH}}$  には比較的良好な相関が見える一方、対比サンプルたる母銀河スケールの  $M_{\text{dense}}$  にはほとんど相関がないことがわかる。統計解析で得た相関係数は、前者が  $\geq 0.8$ 、後者が  $\sim 0.35$  として有意に違っており、第一印象のとおりだった。物理的には、CND スケールのガス質量は質量降着を制御する要因となる一方、母銀河スケールに広がるガスの質量なんぞは現在見えている降着現象には何の関係もない、という話になる。降着流の移動にも多大な時間を要すると思うと、これは極めて自然な結果だろう。ようやく CND スケールの分子ガス質量がもつ SMBH 降着への重要性が示せたのだ!

### 3.2 降着モデルの検証一道は険し、されど意義深し

次に目標の2個目、モデルの検証の話をしてしよう。

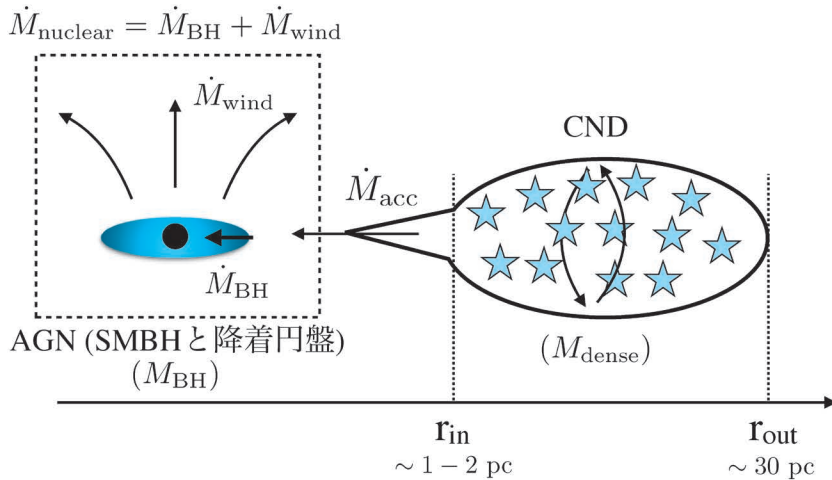


図4 CND における超新星駆動型質量降着モデルの模式図。乱流粘性により CND からさらに中心へ降着する物質 ( $\dot{M}_{\text{acc}}$ ) は、そのまま SMBH 降着 ( $\dot{M}_{\text{BH}}$ ) で消費されるか、一部はアウトフロー ( $\dot{M}_{\text{wind}}$ ) として吹き飛ばされよう。

\*4 内縁の定義は難しいが、超新星爆発をトリガーとする以上、星形成が可能な(すなわちガスが重力不安定になる)最内半径と捉えるのが適切だろう。

本研究に採用した超新星爆発駆動型降着モデル(図4)では, CNNDの内縁半径<sup>\*4</sup> ( $r_{in}$ ) からさらに内側への降着率 ( $\dot{M}_{acc}$ ) は,

$$\dot{M}_{acc}(r_{in}) \propto SFE \cdot \Sigma_{dense}(r_{in}) \cdot \frac{r_{in}^3}{GM_{BH}} \quad (1)$$

と表される<sup>\*5</sup>.  $SFE$ は星形成効率,  $\Sigma_{dense}$ は高密度ガスの質量面密度,  $M_{BH}$ はSMBH質量だ. 簡単のため, 比例係数は流体シミュレーション<sup>19)</sup>で得られる典型値を用いた.  $SFE \cdot \Sigma_{dense}$ は要するに星形成率面密度のことで, 超新星爆発で降着を駆動する以上,  $\dot{M}_{acc}$ がこの量に比例するのは当然である. これはVLT観測で示唆された, AGNのCNNDでは系統的にガス質量面密度が高いという話とも整合する. 絶妙なのは $M_{BH}$ への-1乗の依存性である. 重いSMBHほど, 強大な重力で(角運動量輸送の鍵となる)超新星乱流を抑制する効果が反映されている. ここでたとえば楕円銀河を思い出してほしい. 楕円銀河は普通のセイファート銀河に比べて, 大質量SMBH ( $\sim 10^9 M_{\odot}$ )を持ち, かつAGN活動性が低い. 式(1)とよく合う話ではないだろうか. これらを総合して考え, このモデルを採用するに至ったのだ.

さて, 定性的には既存の観測と整合することからこのモデルはたいへん魅力的だが, その観測的検証となると一筋縄ではいかない. 複数の観測量が必要だからだ. 徹底的に文献サーチをして値を拾ってきたり, あの手この手で値をひねり出したりと, こういう場面でこそ観測屋の手腕(しぶとさ?)が問われるというのは, 多くの方が経験上ご存じだろう. 私もかなり苦労した箇所だからこそ細かく話したいところだが, 天文月報の性格上, 仔細は省略させていただく. とにかくにも努力の結果, 何とか式(1)に放り込むべき値を得たのである. ただし! 多波長にわたる多様な観測量がそろっている天体は, 残念なこと近傍

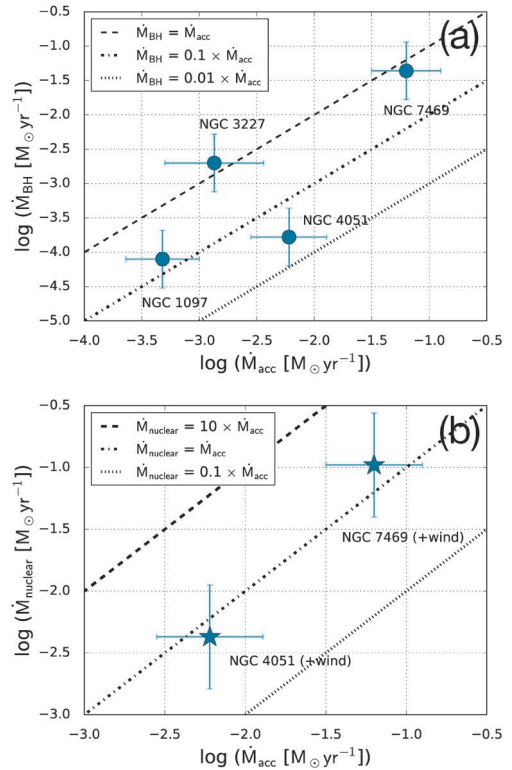


図5 (a) 超新星爆発駆動型降着モデルと実際の観測量を合わせて作成した, CNNDからさらに中心への質量降着率 ( $\dot{M}_{acc}$ ; 横軸)と観測的に推定したSMBHへの質量降着率 ( $\dot{M}_{BH}$ ; 縦軸)の相関図. 必ずしも両者は100%一致しておらず, アウトフローで消費されるガスの存在を示唆している. これは既存の観測的にも至極まっとうな判断だ(図4も参照). (b) (a)の図で, 縦軸を $\dot{M}_{nuclear} = \dot{M}_{BH} + \dot{M}_{wind}$ (アウトフロー成分)に取り直したものの. 予想どおり, 今回は $\dot{M}_{acc} = \dot{M}_{nuclear}$ となり, CNND以内での質量の流入・流出の収支の整合性が初めて観測で確認できた.

銀河の場合でもほとんど存在しない. 元は10天体あった干渉計サンプルも, 悲しいかな, 4天体まで減ってしまった.

気を取り直して式(1)から得たCNNDからさらに内側への降着率 $\dot{M}_{acc}$ と, SMBHへの質量降着率

<sup>\*5</sup> 粘性降着円盤と原理は同じで, 粘性とガス面密度に依存する. ここでは超新星爆発起源の乱流が粘性を担っている.  $\dot{M}_{acc}$ は他のパラメータにも依存するが, 観測的に制限しやすいものを抜粋して記載した.

$\dot{M}_{\text{BH}}$ を比較したのが図5aである(適宜図4も参照)。ばらつきがあるが、大別すると二つのグループに分けられる。まずNGC 7469とNGC 3227。これらは $\dot{M}_{\text{BH}} \sim \dot{M}_{\text{acc}}$ である。つまり、このモデルの下では、CNDから流入したガスのほぼすべてがSMBH成長に消費されていると言える。別のグループはNGC 4051とNGC 1097。これら $\dot{M}_{\text{BH}} < \dot{M}_{\text{acc}}$ 。CNDから流入したガスの一部しかSMBH成長に使われていない。残りはどこにいったのだろうか? 心配ご無用。われわれはその行き先を知っている。すでに多くの観測で、AGN中心部からは高速の物質流(アウトフロー<sup>20)</sup>)が吹き出ている様子が捉えられているのだ\*6。その様子も模式的に図4に示している。AGNの物質収支を考えるには、入る量だけでなく出ていく量も考慮すべきなのである。

そこでアウトフローも含めて図を作り直してみる。勘の良い読者はお気づきだろう。そんなことをする(さらなる観測データを要求する)と、ただでさえ少ないサンプル天体がさらに減ることに…最終的に生き残ったのはわずか2天体。ここまでくると人間、開き直りの境地に至る。図5aと横軸は同じにして、縦軸をCND内での全ガス消費率( $\dot{M}_{\text{nuclear}}$ )に取り直したのが図5bだ。結果はどうだろうか? 天体数は少なく誤差も大きいものの、見事に $\dot{M}_{\text{nuclear}} \sim \dot{M}_{\text{acc}}$ を実現しているではないか! これは画期的なことである。なぜなら、特定のモデルに基づく話とはいえ、初めてCND以内の物質の流入・流出の収支が整合的に説明できたからだ。ALMAに代表される近年のミリ波サブミリ波観測技術の発達、ミリ波からX線に至る多波長観測データの統合利用、そしてもちろん理論家と観測家の緊密な連携をもって初めてなした結果と言えよう。

最後に一点補足情報を。このシナリオで粘性降

着による典型的な降着時間スケールは、CNDから降着円盤を突っ切るまでで~数十Myrである。一方、e-folding時間スケールが~10 Myrの星形成活動において、II型超新星の爆発がピークを迎えるのは実は~10-50 Myr後である<sup>15)</sup>。どうだろうか。値は多少変動するものの、この降着モデルでは星形成のスタートから~100 Myr程度でSMBHに火がつくことになる。まさに、2.3節で紹介した観測成果そのものだ。時間スケールの観点でも、スターバースト—AGNコネクションは“因果的”だという結論が得られた。

#### 4. まとめと今後の展望

さまざまな要素技術の進化と多波長研究の統合をもって、近傍AGN研究は大きな転換期を迎えている。ALMAはその中でも強力な“game changer”であることは間違いない。現に本研究のようなCNDスケールの分子ガスの性質を直接AGN現象と関連づけるなどという話は、ほんの数年前までは観測的には手出しのしようがないテーマだった。まだまだサンプル数は少ないものの、銀河中心部の物質収支が整合的に説明できたのは非常に喜ばしい。スターバースト—AGNコネクションというキーワードで、銀河中心部では星間ガス、星、SMBHがダイナミックかつ因果的に進化している様子が見えてきた。まさに3者の共同作業、三位一体の世界観である(図1)。

もちろん、超新星爆発駆動型降着モデルの検証はあくまで嚆矢であり、今後は他のモデルでも同様の観測検証を進めるべきだ。幸い、この1-2年のALMAの空間分解能の向上には目を見張るものがある。大量天体におけるガス質量面密度とその力学状態の測定は、セイファートからクエーサーに至るまで、ミリ波サブミリ波帯のAGN研究で鍵となる観測量だろう。本稿では大きく触れ

\*6 今注目しているのはCND内部の本当にAGN中心部なので、本研究でいうアウトフローとは紫外線やX線で見える高階電離ガスのフロー(吸収線)を指す。それらの吸収線解析から、アウトフロー率が推定できる。

なかったが、AGNが駆動する分子アウトフローに関する物理の解明も、共進化の観点からは重要課題である。また、CNDやトラスからさらに内側にも、たとえ直接的な空間分解はできずとも研究は進むだろう。原子輝線や水素再結合線、降着円盤コロナの長波長成分あたりが有力なプローブだ。現在は多くの大型望遠鏡計画が地上・宇宙両方で進んでいる時代だ。理論と多波長観測の強固な連携をもって、AGN現象の完全理解を目指したい。

とにかく、CND以内のミリ波サブミリ波帯観測は、まだまだ前例がない未踏の地である。逆に言えば、おそらくどんな結果を出しても“面白い”のである。夢は広がる。これから本格研究をスタートする学生諸君（もちろん先輩方も）の積極的な参入を期待したい。

## 謝 辞

本稿の科学的な内容は、2016年に発表した投稿論文<sup>5)</sup>、および筆者の博士論文の一部に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。共同研究者の川勝望氏、河野孝太郎氏には、飽きることなく議論に付き合ってください。本当に感謝しています。ALMAの安定した観測と運用は、もちろん観測所スタッフの皆さんの日頃のたゆまぬ努力あってこそのもので。この場をお借りし、心より感謝申し上げます。なお、筆者の研究は科研費14J08410とALMA PI経費制度にサポートしていただいております。こちらも併せて感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Kormendy J., Ho L. C., 2013, ARA&A 51, 511
- 2) Di Matteo T., Volker S., Hernquist L., 2005, Nature 433, 604
- 3) Hopkins P. F., et al., 2008, ApJS 175, 356
- 4) Honma M., Sofue Y., Arimoto N., 1995, A&A 304, 1

- 5) Izumi T., Kawakatu N., Kohno K., 2016, ApJ 827, 81
- 6) Kawakatu N., Wada K., 2008, ApJ 681, 73
- 7) Vollmer B., Beckert T., Davies R. I., 2008, A&A 491, 441
- 8) Izumi T., et al., 2015, ApJ 811, 39
- 9) 谷口義明, 2016, 天文月報 109, 339
- 10) Martini P., et al., 2003, ApJ 589, 774
- 11) Hicks E. K. S., et al., 2013, ApJ 768, 107
- 12) Imanishi M., Wada K., 2004, ApJ 617, 214
- 13) Diamond-Stanic A. M., Rieke G. H., 2012, ApJ 746, 168
- 14) Esquej P., et al., 2014, ApJ 780, 86
- 15) Davies R. I., et al., 2007, ApJ 671, 1388
- 16) Wada K., Norman C. A., 2002, ApJ 566, L21
- 17) Izumi T., et al., 2013, PASJ 65, 100
- 18) Izumi T., et al., 2016, ApJ 818, 42
- 19) Wada K., Papadopoulos P. P., Spaans M., 2009, ApJ 702, 63
- 20) Krongold Y., et al., 2007, ApJ 659, 1022

## ALMA's View on a Triggering Mechanism of Nearby Active Galactic Nuclei—An Active Trinity of Gas, Stars, and Supermassive Blackholes

Takuma Izumi

*JSPS Fellow/Institute of Astronomy, The University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

Abstract: Cold molecular gas in the central regions of galaxies works as the stellar nursery, as well as fuel for the central supermassive blackhole. In these years, we have been rapidly compiling revolutionary knowledge on the physical mechanisms at the central hundreds pc of galaxies, including the triggering mechanism (s) of active galactic nuclei, thanks to the advent of ALMA. In this article, I introduce our recent ALMA result on the supernova-driven mass accretion process onto the nucleus. We start to observationally reproduce the balance of “mass flow” of the nuclear regions fairly well.