

# 多波長観測で探る合体銀河中の銀河 -ブラックホール共進化機構



山田 智史

〈理化学研究所 開拓研究本部 榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉  
e-mail: satoshi.yamada@riken.jp

銀河とその中心の大質量ブラックホール (Supermassive Black Hole; SMBH) の共進化過程を解明するため、銀河同士の合体による爆発的成長期に着目し、様々な合体段階の57天体に対して過去最大規模のX線スペクトル解析を行った。多波長観測の結果も用いることで、合体に伴い銀河とSMBHの成長率は共に増加することが判明した。特に合体末期では、活動銀河核がガスやダストに埋もれた構造になることや、SMBH近傍から銀河に莫大な物質がアウトフローとして輸送されることも示唆された。最後に、合体における共進化過程の全体像について議論する。

## 1. はじめに

銀河と銀河中心ブラックホールの「共進化」は、天文学の中でも分野を超えて広く語り継がれてきた宇宙の神秘の一つであろう。銀河の中心には大質量ブラックホール (Supermassive Black Hole; SMBH) が存在し、このブラックホール質量と、その母銀河の星質量には相関がある [1]。この事実から両者は相互作用して共に進化 (共進化) したと考えられている。しかし、銀河 ( $\sim 10^4$  pc) とSMBH ( $\sim 10^6$  pc) の空間スケールには大きな隔たりがあり、両者に相関を与える物理的起源はいまだ謎に包まれている。

共進化を理解するうえで、SMBHへの質量降着により銀河中心が非常に明るく輝く活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) が着目されてきた。AGNの構造は、SMBHと降着円盤、その周囲を取り囲むダストトーラス (以下、トーラス) で主に構成される。加えて、SMBHへの質量降着率が大きい場合には、降着円盤からの輻射圧により噴出するアウトフローも生じると考えられている。共進化を引き起こす要因として、AGNによ

る輻射やアウトフローなどが主な候補として挙げられている [2]。特にアウトフローはSMBH近傍から銀河スケールまでの質量輸送を行うだけでなく、SMBHへの質量降着の障害、銀河での星間物質の加熱や散逸などの負のフィードバックにより両者の成長を抑制すると考えられている。それゆえ、銀河進化 (星形成)、SMBH進化 (AGN)、アウトフローの三要素がどのように絡み合うのかを解明することが共進化の研究で重要なテーマとなっている。

この分野の研究では厄介なことに、「そもそも本当に共進化しているか?」という問いも議論の最中である。全宇宙における星形成率密度とSMBHへの質量降着率密度の歴史を比較すると、双方とも $z\sim 2-3$ にピークを迎えており、平均的には銀河とSMBHが同時に成長してきたと予想される [3]。一方で、 $z\geq 1$ でAGNが活発なクエーサーでは、銀河質量に対して比較的大きいSMBH質量を持つ天体が多く見つかった [4-6]。また、 $z\geq 6$ で見つかった低光度なクエーサー (Subaru High- $z$  Exploration of Low-Luminosity Quasars; SHELLQs) [7] や近傍で中程度の光度を持つAGN

[8-10], 遠方宇宙でサブミリ波で明るく星形成が活発なサブミリ波銀河 [11] などの種族では、通常の質量相関と同程度か比較的小さいSMBH質量を持つ傾向が報告されている。以上を踏まえると、少なくともAGNや星形成が活発な進化段階にある種族では質量相関が成立するとは限らないようだ。要するに、銀河とSMBHは大局的には共進化するが、その過程では銀河とSMBHが必ずしも同時に進化していない可能性が示唆される。近傍宇宙の質量相関では、古典バルジを持つ銀河や楕円銀河などの比較的穏やかな種族を対象としている。そこで、近傍で急激な進化段階にある種族でも同様に調べることで、銀河とSMBHの進化過程を解明し、実際に共進化しているのかを検証できるだろう。

そのような背景の下、極近傍宇宙 ( $z < 0.1$ ) の合体銀河を対象として、筆者も共進化の研究に取り組んだ。合体時には、高密度な環境下で星形成活動が促進され、角運動量損失によりAGN活動も誘発される [12]。特に合体段階で分類することで、両者の進化過程を調べることができるため、成長開始からその終わりまでの時間軸に沿った共進化過程を解明できると期待される。次章からは、筆者らの研究により明らかになってきた合体銀河における共進化過程の全体像について報告する。

## 2. 合体銀河中の埋もれたAGN

本題に入る前に、理論的な研究で示唆され、我々の分野でよく紹介される合体進化シナリオについて紹介する [12]。宇宙には赤外線で非常に明るい超／高光度赤外線銀河 (Ultra-/Luminous Infrared Galaxy; U/LIRG) が存在する。LIRGは赤外線光度が  $L_{8-1000 \mu\text{m}} > 10^{11} L_{\odot}$  ( $L_{\odot}$ は太陽光度) を、ULIRGは  $L_{8-1000 \mu\text{m}} > 10^{12} L_{\odot}$  を超える天体であるが、近傍宇宙においてはその大半が衝突・合体銀河であることが知られている。図1に示すように、U/LIRGは銀河中心でAGNや星形成の活



図1 超／高光度赤外線銀河の概念図。

動が活発であり、その周囲はガスやダストで深く覆われた構造になる。それゆえ中心源の強い放射がガスやダストにより再放射されるため、赤外線ですべて非常に明るく輝く。合体末期ではAGN活動が活発になるためにアウトフローが生じ、ガスやダストが吹き飛ばされて星形成活動が抑制され、AGNのみで輝くクエーサーになる。クエーサーの後にはAGNの活動も終息し、最終的に楕円銀河として観測される。このように合体時にU/LIRGとなり、合体後はアウトフローによるフィードバックでクエーサーや楕円銀河になる描像を合体進化シナリオと呼んでいる。

### 2.1 SMBH質量を測定することの難しさ

観測的に合体進化シナリオは支持されているものの、U/LIRGの研究においては課題が多い。近年の研究からは、U/LIRGの大半が合体銀河であり [13]、それらは実際にガスやダストで覆われていることが示唆されている。特にU/LIRG中のAGN活動に着目すると、赤外線では炭素系塵による吸収 ( $3.4 \mu\text{m}$ ) やシリケート系塵による吸収 ( $9.7 \mu\text{m}$ ,  $18 \mu\text{m}$ ) など強いダスト減光の兆候があり [14, 15]、X線では孤立銀河に比べてU/LIRGにおけるトーラスの吸収量が多いことが示唆されている [16]。筆者らも過去に中間赤外線を用いて、中心領域の  $12 \mu\text{m}$  光度 (トーラスの放射成分) と  $[\text{OIV}] 26 \mu\text{m}$  光度 (狭輝線領域の放射成分) の比から、合体が進むにつれてトーラスの立体角が増

加するという示唆を得た [17]. 加えて, 可視光観測でも大半がトーラスの内側に存在する広輝線領域が隠されて見えない2型AGNであり [18], これらの結果からU/LIRG中ではトーラスがSMBHのほぼ全方向を覆うほどに発達していると予想されている. このようなAGNを「埋もれたAGN」と呼んでおり, これが共進化の研究を非常に困難にしている. というのも, 埋もれたAGNでは1型AGNのように可視光の広輝線プロファイルからSMBH質量を推定できる天体が非常に少ないため, 銀河質量とSMBH質量の比較による信頼度の高い議論が絶望的に難しくなるからだ.

とはいえ, 筆者らはU/LIRGにおけるSMBH質量に言及できれば重要な結果が得られると信じ, 無謀ながらにその推定に取り組んだ. サンプルは後述するが, U/LIRGが持つAGNに着目し, 独立した4通りのSMBH質量推定法を試してみた(図2). これらが一致していれば, 決して悪くない推定値として使えると思ったわけである. 具体的な手法としては, 銀河の星質量(可視光観測等で推定)とSMBH質量の典型的な相関式を用いて推定したもの(四角), 銀河バルジ成分の速度分散とSMBH質量の相関式から推定したもの

(丸), 銀河バルジ成分のHバンド(1.6  $\mu\text{m}$ )光度とSMBH質量の相関式から推定したもの(菱形), その他の手法([OIII]輝線の速度幅を用いた手法, 反響マッピング法など多数)から推定したもの(三角), の4通りである. しかし, 各手法で推定したSMBH質量に一致性は見られなかった. 赤外線から見積もったAGN光度(質量降着率に相当)との依存性はなかったが, U/LIRGでは手法の違いによるSMBH質量の系統誤差は約1桁であり, 近傍の質量相関に見られる不定性(0.28 dex)より大きい [4]. どの推定法の結果が正しいかを根拠を持って判断することは難しいため, 銀河質量とSMBH質量を比較する手法では共進化過程の定量的な評価は困難であることがわかった [19].

### 3. 埋もれたAGNの研究に向けて

銀河質量とSMBH質量の議論ができなくても, その時間微分量である銀河とSMBHの成長率を比較することは可能である. 実際, 星形成率は銀河の成長率を反映する値であり, 一方でトーラスに存在するダスト吸収を補正したAGN光度は降着円盤領域からの放射を反映するため, SMBH成長率を推定できる. しかし, AGN光度の推定において, 赤外線とX線で全く異なる結果になることが報告されている. 赤外線観測で見積もるAGN光度に対して, X線の光度は予想よりも1-2桁ほど小さいというのだ [20]. その原因もわかっていないために, どちらを信じるかによって結論が大きく異なってしまう. したがって, 埋もれたAGNの物理的構造を解明し, 真のAGN光度を推定することで, 初めて合体銀河における銀河とSMBHの進化過程を調査できるようになる.

これらの状況を踏まえると, 合体銀河における共進化を理解するための手順として, (1) U/LIRGが持つAGNを少しでも多く特定すること, (2) AGN成分の赤外線光度とX線光度の関係を決定している物理的要因を見つけること, (3) 真のAGN光

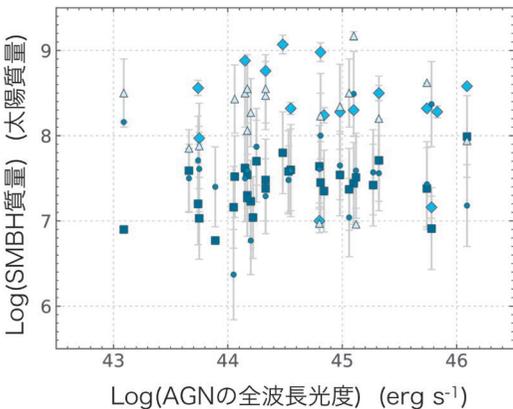


図2 U/LIRGが持つAGNに対し, 独立した最大4種類の手法で推定したSMBH質量の比較. AGN光度に依存せず, 手法(マーク)の違いで見積もりが約1桁も異なることを示している.

度と星形成の活動、及びアウトフローの活動との関連を調査すること、の3段階が必要である。特に埋もれたAGNでは、赤外線や軟X線 (<10 keV) を用いても星形成由来の放射成分との判別が難しいため、透過力が高く星形成放射の混入がない硬X線 (>10 keV) の観測が極めて重要である。

### 3.1 U/LIRG内の埋もれたAGNの探査

本研究は、IRAS衛星の全天赤外線観測により検出された202天体の近傍U/LIRGを母サンプルとした [21]。埋もれたAGNを見逃さないため、NuSTAR衛星 (3–79 keV) により硬X線の観測が行われた56天体を選択した。さらにSwift/BATの全天観測データ (14–195 keV) を加えることで、新たに硬X線源も1天体追加したため、本研究で扱うのは57天体である。多くは合体銀河であり、複数の銀河で構成されている。そこで可視光画像や先行研究を参照し、84銀河まで分離し、見かけ上の銀河間距離も測定した。また、銀河の形態によりstage A (銀河同士が初めて遭遇する), B (潮汐力により生じるtidal tailが見える), C (銀河形態の対称性が崩れる), D (2つの核が共通外層を持つ), N (合体の兆候なし) で合体段階を分類した [22]。ここで、合体末期はstage Dを指す。

次に、84銀河の中からAGNの有無を調査した。NuSTARやSwift/BATの観測では角度分解能がそれぞれ18秒角と20分角であり、個々の銀河の空間分解が困難であるため、以下の手順でAGNの同定を行った。(1) まずはNuSTAR (8–24 keV) とSwift/BAT (14–195 keV) のX線画像を用いて、 $>3\sigma$ 以上の有意度で検出される硬X線源を特定し、その位置誤差を算出した。(2) ダスト減光を受けにくい中間赤外線 (Spitzer衛星) や軟X線 (Chandra衛星, XMM-Newton衛星) での検出の有無を調べ、その座標と比較することで硬X線源を同定した。(3) 硬X線源に対してX線スペクトル解析を行い、AGN成分の有無を判別した。X線データの質を少しでも向上するため、NuSTAR (FPMA, FPMB), Chandra (ACIS), XMM-Newton

(MOS1, MOS2, pn), Suzaku (XIS 0–3, HXD), Swift (XRT, BAT) の過去20年分 (計400以上) の観測データから使用可能なものはほぼすべて解析した。暗い天体を検出するため、天体とバックグラウンドの抽出領域を決める際にも、宇宙X線背景放射やCCDギャップ等の影響までを考慮して装置毎に最適な方法を適用した。これらの作業により、本研究では先行研究 [16] の約1.6倍もの大サンプルとなる40天体のAGNの同定に成功した。他の44銀河に対しても、X線スペクトルや検出限界値からAGN光度の上限値を推定し、その中でAGN候補はせいぜい8天体以下であることもわかった。

本研究で得た40天体のAGNでは、高質かつ広帯域なX線スペクトル解析 (図3) により、トータスによる吸収量 (<10 keVでの減光の強さとして反映される) や、吸収補正したX線光度 (>10 keVで吸収されていない成分の放射強度として反映される) を高精度で推定できた。図4に示すように、銀河間距離が近づくにつれて吸収量 (水素柱密度;  $N_H$ ) は急増しており、合体末期 (星印) にはCompton-thick ( $N_H > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ) AGNの割合が大きくなる。この結果は、U/LIRGが埋もれたAGNを持つ描像と一致する (2.1節)。

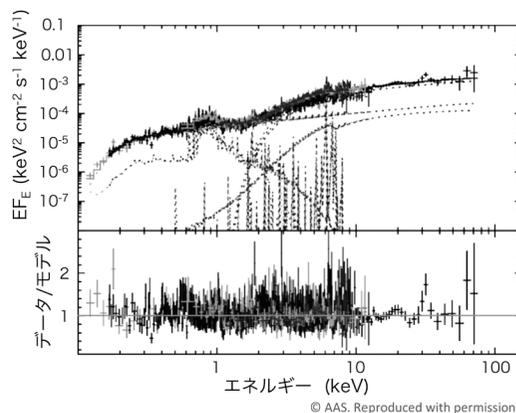


図3 X線スペクトル解析の例 (合体末期の銀河Mrk 231)。下段はデータとモデルの比を示す。

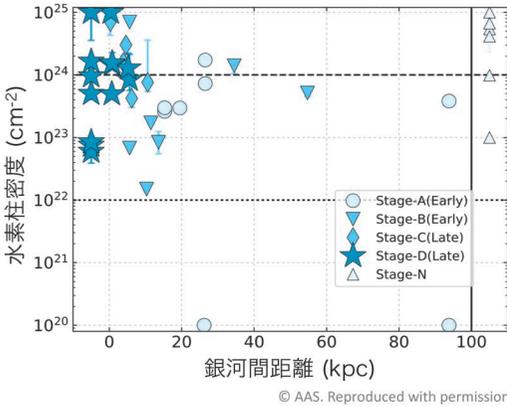


図4 銀河間距離と水素柱密度の比較. 丸, 下三角, 菱形, 星, 上三角はstage A, B, C, D, Nを示す. stage Dで2つの中心核領域が完全に分離できない天体は左端 (銀河間距離は負), stage Nの天体は右端に表記している.

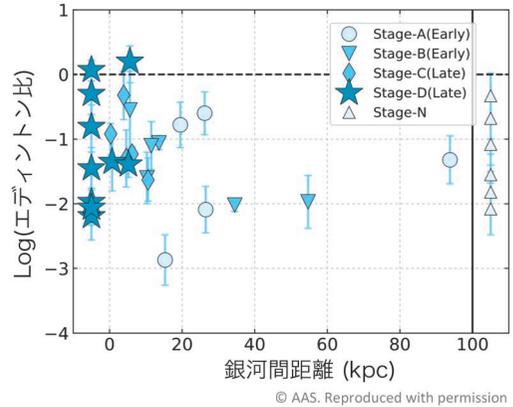


図5 銀河間距離とエディントン比の比較. 各記号は図4と同様.

### 3.2 埋もれた AGN の活動性

次に、赤外線と X 線から推定される AGN 光度について調査した. 赤外線の結果から AGN 光度を見積もる際には、SMBH 質量の時と同じく独立した 4 通りの手法で推定した. 各手法の結果には一貫性が確認できたため、その平均値を各天体の AGN 光度として採用した. また、AGN 光度 / SMBH 質量に比例するエディントン比 (AGN の全波長光度をエディントン光度で割った値;  $\lambda_{\text{Edd}}$ ) を見積もるため、SMBH 質量には 4 つの手法の平均値を適用した (2.1 節). ここで、SMBH 質量の約 1 桁の系統誤差 ( $\pm 0.5$  dex 程度) は値に含めていないため、本研究のエディントン比には別途その不定性を加味すべき点に注意して議論を行う.

近年の合体銀河の理論研究では、合体末期にエディントン比はその臨界値 ( $\lambda_{\text{Edd}} \sim 1$ ) に到達すると予想されている [23]. そこで、赤外線の結果を用いると、AGN 光度は合体末期で最大値を示すことがわかった. エディントン比に関しても理論研究の予想と一致することが判明した (図 5). 一方、トーラス吸収を補正した X 線光度を用いると結果は異なる. AGN の全波長光度は X 線光度の 20 倍で計算するという慣例があるが、この概

算ではどの合体段階でも  $\lambda_{\text{Edd}} \sim 0.1$  が最大値となる. また、合体が進むほどエディントン比が小さいという、合体進化シナリオとは矛盾する結果になる. 本研究では高質かつ広帯域 ( $\sim 0.1\text{--}150$  keV) の X 線スペクトルを用いたため、トーラスの吸収量や X 線光度が間違っているとも考えづらい.

実は、吸収補正した X 線光度と全波長光度の比は約 20 倍とは限らず、エディントン比が高くなると 100 倍など大きな値が必要になるため [24], 合体末期に質量降着率が高くなるのが原因だろうと考えた. そこで、X 線の暗さ (AGN の全波長光度 / 吸収補正した X 線光度;  $\kappa_{\text{bol,X}}$ ) と赤外線から推定したエディントン比で相関を調べた (図 6). ところが、大変驚くことに、先行研究でよく適用される相関式 ( $\kappa_{\text{bol,X}} \sim 20\text{--}100$ ) [25] と比べても、合体末期 (星印) の X 線光度は 1 桁近く小さいことが判明した. 縦軸と横軸の値は、双方とも赤外線光度に比例するため、その不定性を考慮しても相関式には近づけない. また、横軸は (SMBH 質量) $^{-1}$  に比例するが、その系統誤差もせいぜい  $\pm 0.5$  dex 程度であり、やはり X 線光度が相対的に小さいという結論になってしまう. 最も驚くべき点は、合体末期の AGN ではエディントン比が小さくても X 線で暗いという点である. つまり、X 線の暗さは質量降着率だけで説明できず、合体の有無も関

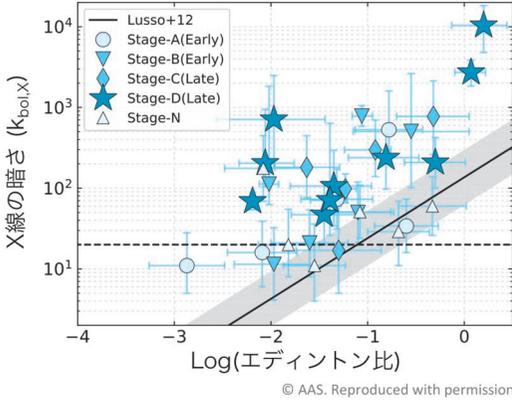


図6 エディントン比と $K_{bol,X}$ の比較。黒の実線はAGNにおける典型的な相関式 [25] を示す。

係しているという結果が得られたのである。

### 3.3 アウトフロー活動の調査

当初はX線で暗くなる理由について全く目処が立たなかった。しかし、見落としている物理があるはずだと思い、過去の論文を読み漁ったところ、U/LIRGのアウトフローに関して整理した論文が少ないことに気づいた。加えて、孤立銀河よりも合体銀河の方がアウトフローは強いという結果を示す論文 [26] を見つけ、何か関係があるかもしれないと思い、追加の調査を行った。

アウトフローと言っても、波長ごとに観測している物質は全く異なる。X線では光速の10-30%の速度で青方偏移した鉄イオンの吸収線として検出される超高速アウトフロー (UltraFast Outflow; UFO) が観測できる [27, 28]。可視光では狭輝線領域を持つ電離ガスのアウトフロー [29]、サブミリ波では分子ガスのアウトフロー (ただし、星形成起源もありうる) [30] が観測され、それらの速度は $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ 程度である。UFOは $< 1 \text{ pc}$ のSMBH近傍 ( $\sim 10^{-4} r_g$ ;  $r_g = GM_{\text{BH}}/c^2$ ) [31] に存在し、電離ガスや分子ガスのアウトフローは $\geq 100 \text{ pc}$ の銀河スケールで存在する。アウトフローの種類は他にもあるが、本サンプルで最もよく調べられていたこの3種類に着目した。

さらにX線分野では、 $N_{\text{H}}-\lambda_{\text{Edd}}$  診断法 [32] とい

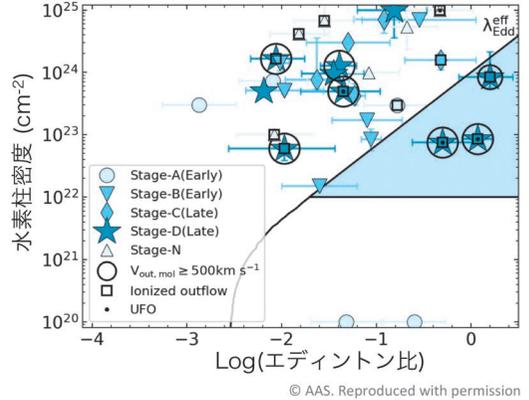


図7  $\lambda_{\text{Edd}}-N_{\text{H}}$  診断法。青領域はアウトフロー領域を表す ( $N_{\text{H}} < 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  はダストレーンの吸収として除く)。UFO、電離ガスと分子ガスのアウトフローの検出は黒点、四角、円で示す。

うアウトフローの研究手法がある。通常のエディントン比は、 $\sigma_{\text{T}}$  をトムソン断面積として、

$$\lambda_{\text{Edd}} = 4\pi GM_{\text{BH}} m_p c / \sigma_{\text{T}} \quad (1)$$

で計算される。実際はダストによる吸収断面積 ( $\sigma_{\text{d}}$ ) の方がトムソン断面積より大きいため、エディントン限界 ( $\lambda_{\text{Edd}}=1$ ) は  $A=\sigma_{\text{d}}/\sigma_{\text{T}}$  (AGNのスペクトルに依存) の値で補正する必要がある。その効果を考慮した値を「有効エディントン比 ( $\lambda_{\text{Edd}}^{\text{eff}}$ )」と呼び、 $N_{\text{H}}$  の値から導出できる。特に  $\lambda_{\text{Edd}}^{\text{eff}} > 1$  を満たす場合はダストへの輻射圧により定常な質量降着ができないため、数pcスケールでアウトフローが生じていると予想される。

この診断法を本研究のAGNに適用した結果を図7に示す。 $\lambda_{\text{Edd}}^{\text{eff}} > 1$  であるアウトフロー領域は青色で表した。Swift/BATのX線観測で見つかったAGNでこの領域に属するのは約1.4%であるが [33]、本研究のAGNでは合体末期の3天体 (7.5%) が該当した。分子ガスアウトフローを持つAGNの多くが合体末期であり、特にこの3天体では3種類のアウトフローのほとんどが検出され、SMBH近傍から銀河スケールに渡る「多相なアウトフロー」を持つことが示唆された。

なぜ合体末期にはアウトフローが検出されるのだろうか？アウトフローは降着円盤からの輻射圧で形成されるため、高い質量降着率が関係すると予想できる。多相なアウトフローであることから分子ガスアウトフローはAGN起源であると想定し、エディントン比とアウトフロー速度を比較した(図8上)。ところが、正相関が得られたように見えて、同じエディントン比でも合体末期(星印)と合体の兆候がないAGN(三角)で速度が3倍ほど異なる。3.2節を思い起こすと、合体の有無はX線の暗さにも影響を与えている。そこで、X線の暗さ( $\kappa_{bol,X}$ )とアウトフロー速度を比較すると、大変驚くことに両者は相関を示し(図

8下)、物理的に関連している可能性が初めて示唆された。

### 3.4 X線で暗いAGNの構造

先行研究でも数天体のULIRGでX線光度が小さい現象は報告されていた。解釈として、エディントン限界を超える際に生じるスリムディスクが関係するという案がある [34]。ただ、低いエディントン比でもX線で暗いAGNになる理由を説明できない(図6)。また、莫大な質量流入により高温コロナが破壊されるという案 [30] もあるが、どのようにしてその非常にコンパクトな領域( $<10r_g$ ) [35] に質量を輸送するのが疑問となる。文献調査を続けると、実はアウトフローにより可視光で広い吸収線を示すBALクエーサーという種族でもX線で暗い現象が報告されていた [36]。この論文では、トーラスより内側にある光学的に厚い“failed wind”がダストフリーな吸収体としてX線を減光させるという状況を考えている。

UFO形成の理論モデルとして有力なラインフォース駆動型円盤風の描像 [37] に基づくと、中間電離状態の金属元素が降着円盤由来の紫外線光子を束縛-束縛遷移で吸収することで、アウトフローは光子の運動量を得て加速される(ラインフォース)。また、降着円盤の内側( $\leq 100r_g$ )では、強いX線照射により原子が完全電離されることで、ラインフォースによる外向きへの力が弱くなり“failed wind”となる。要するに、failed windがX線を減光し、その外側では電離度が大きくなり過ぎずにUFOが形成される。そこで筆者らが考えたのは、合体銀河ではfailed windが発達する(図9)という案である。合体による質量流入により埋もれたAGNになることで、failed windの密度や立体角が増加する状況を想定すれば、合体末期のAGNでのみトーラスより内側の時点でX線は激しく減光され、同時に紫外線光子の吸収が促進されてUFOが卓越するという描像である。もちろんコロナが破壊される案や他の解釈が正しい可能性もあるが、このfailed windによる描像は新たな有

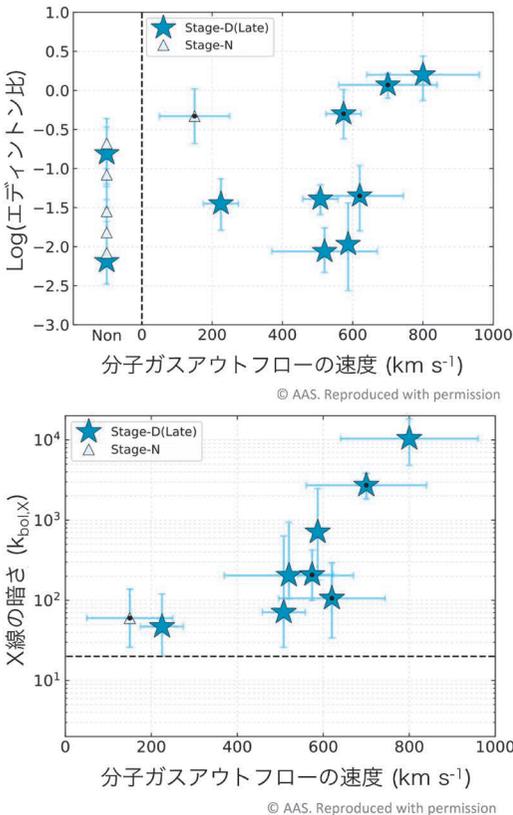


図8 (上) 分子ガスアウトフローの速度とエディントン比の比較。分子ガスアウトフローが未検出、または、未観測な天体は左端に示す。黒点はUFOの検出があることを表す。(下) 分子ガスアウトフローの速度と $\kappa_{bol,X}$ の比較。

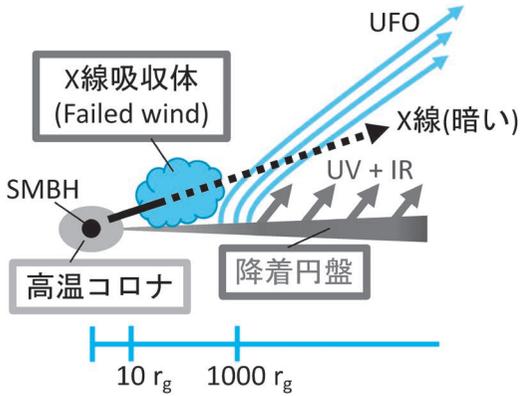


図9 X線で暗いAGNのSMBH近傍の概念図.

方候補として今後も検証する価値があるだろう。

以上を踏まえると、合体の有無で銀河の全体構造は大きく異なると考えられる(図10)。通常の孤立銀河では質量降着率によりアウトフローの強度が決まるだろう。一方、合体銀河では, failed windなどが原因でUFOが効率的に形成され, 周囲の物質を銀河にまで輸送する。したがって, 埋もれたAGNの構造は, 豊富な物質により発達したトーラスを持ち, 質量降着率が高く, SMBH近傍ではX線で暗くなり, 強いアウトフローが銀河にまで到達する構造であることが示唆された。

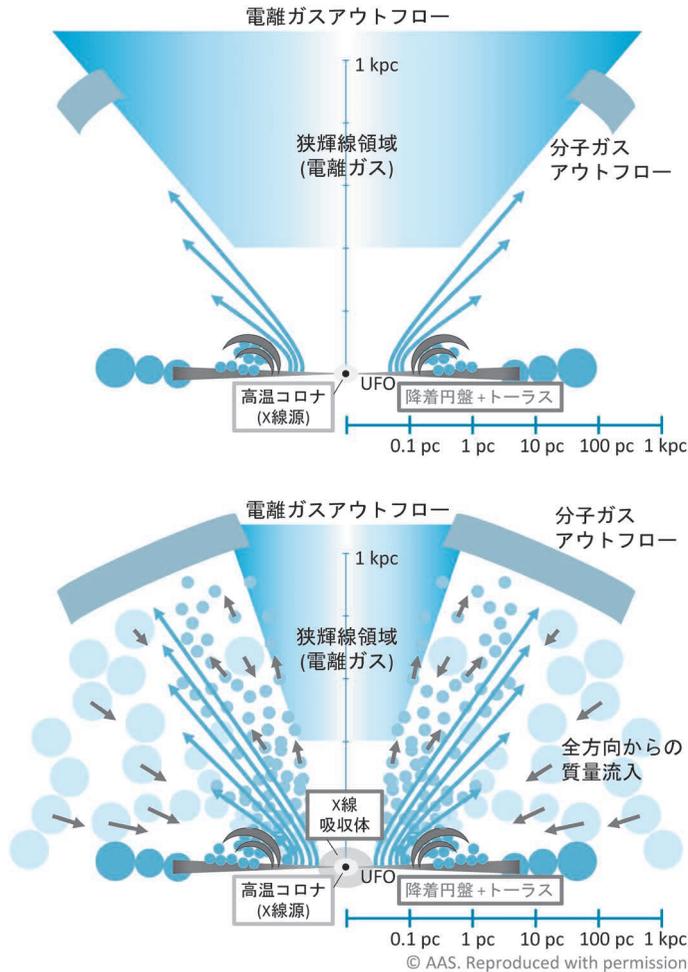


図10 エディントン比が高いAGNを持つ場合の, 孤立銀河(上)と合体末期の銀河(下)の全体構造の概念図.

### 4. 合体銀河の共進化過程

ついに、銀河とSMBHの共進化過程の議論をする準備ができた。今まで述べたようにX線はトーラスによる吸収に加え、より内側の領域でも吸収の影響を大きく受ける可能性が示唆されたため、基本的にAGN光度は赤外線から求めた結果を用いる。星形成率は多波長スペクトルエネルギー分布の解析で推定された値を適用する [38]。

早速、星形成率とAGNの全波長光度を比較した結果を図11に示す。黒の直線は、近傍における銀河とSMBHの質量相関に対して両者が常に同時進化したと仮定した場合の星形成率とAGN光度の関係である [4, 39]。一方、青の点線は本研究で特定したstage A-DのAGNに対して、ベイズ最尤推定法で一次関数フィッティングを行った結果である。本研究の中で最も驚いたことに、両者の関数はほぼ一致したのだ。もう少し丁寧に見ると、合体段階毎に銀河とSMBHの成長率は異なっている。合体前期 (stage A-B; 菱形と薄い三

角) ではAGNが特定されず、星形成活動が主体的な銀河が多い。合体後期 (stage C-D; 星印と濃い三角) ではAGNと星形成の両者が活発であり、共進化の現場になっている。また、合体後の種族と言われているクエーサー (+印) に対しても、同じ赤方偏移 ( $z < 0.1$ ) に絞ると、合体後期と同様のAGN光度を持つが星形成率は小さい。これらの結果から、(1) 大局的には銀河とSMBHは近傍の質量相関を再現するように共進化すること、(2) 合体段階の過程では、両者は同時に進化するのではなく、先に銀河が成長し、少し遅れてSMBHも成長することが判明した。

さらに興味深いことに、合体末期は共進化の現場でありながらも、UFOや分子ガスアウトフローなどの多相なアウトフローが形成されている。クエーサーではAGN活動が主要になっていることを踏まえると、これは負のフィードバックによりU/LIRGがクエーサーになるという合体進化シナリオと一致する。つまり、本研究の結果は、合体銀河における共進化過程を観測的に示すと共に、その物理的起源にはアウトフローによる負のフィードバックが密接に関係することを支持する。

### 5. 今後の展望

本研究で示唆された合体進化の描像に基づく、銀河質量が大きい種族は説明できるが、 $z \geq 1$ で見つかるSMBH質量が大きい種族が存在する理由は説明できない。そこで、遠方宇宙でも同様の研究を進めることで、これらの種族の形成過程の理解が深まるだろう。また、この研究では星形成とAGN活動の系統的調査を行ったが、アウトフローの物理量が測定されている天体が少ない。今後はXRISM衛星によるX線精密分光観測が開始される予定であり、合体銀河中のUFOの速度や物質量を精密に測定できるようになる。特にUFOの質量輸送率が推定されれば、星形成率や質量降着率と比較することで、銀河進化とSMBH進化に与えるフィードバックの寄与を評価できる。そ

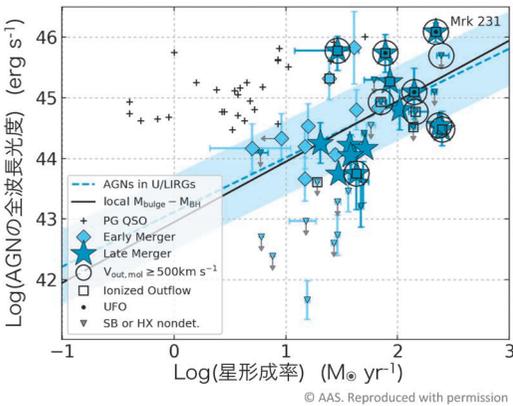


図11 星形成率とAGN光度の比較。黒線は近傍宇宙の銀河とSMBHの質量相関に同時進化した場合の相関式。青の点線はAGNにおけるベストフィットの関数。黒の+印は近傍クエーサー、菱形はstage A-BのAGN、星印はstage C-DのAGN、三角はAGNが特定できていない天体を示す。アウトフローの記号は図7と同様。

の結果を理論研究と比較し合うことで、共進化の研究が飛躍的に進展できると期待している。

## 謝 辞

本稿で紹介した内容は筆者らが発表した論文 [40], 及び, 博士論文の一部に基づいています。京都大学の院生時代に指導教員として親密に議論してくださった上田佳宏氏に大変感謝いたします。共同研究者として解析技術と科学的考察の両面で支援してくださった谷本敦氏, 今西昌俊氏, 鳥羽儀樹氏, Claudio Ricci氏, George C. Privon氏にも感謝いたします。水本岬希氏, 和田桂一氏, 長尾透氏, 寺島雄一氏, また他にも沢山の方々とも議論させて頂き, 感謝いたします。なお, 日本学術振興会の特別研究員制度, 及び, 理化学研究所基礎科学特別研究員制度の支援を受けています。最後に, 本稿を執筆する機会を与えてくださった天文月報編集委員の市川幸平氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Magorrian, J., et al., 1998, AJ, 115, 2285
- [2] Fabian, A. C., 2012, ARA&A, 50, 455
- [3] Madau, P., & Dickinson, M., 2014, ARA&A, 52, 415
- [4] Kormendy, J., & Ho, L. C., 2013, ARA&A, 51, 511
- [5] Mechtley, M., et al., 2016, ApJ, 830, 156
- [6] Setoguchi, K., et al., 2021, ApJ, 909, 188
- [7] Izumi, T., et al., 2021, ApJ, 914, 36
- [8] Heckman, T. M., & Best, P. N., 2014, ARA&A, 52, 589
- [9] Reines, A. E., & Volonteri, M., 2015, ApJ, 813, 82
- [10] Suh, H., et al., 2020, ApJ, 889, 32
- [11] Alexander, D. M., et al., 2008, AJ, 135, 1968
- [12] Hopkins, P. F., et al., 2008, ApJS, 175, 356
- [13] Kartaltepe, J. S., et al., 2010, ApJ, 721, 98
- [14] Imanishi, M., et al., 2007, ApJS, 171, 72
- [15] Imanishi, M., et al., 2008, PASJ, 60, S489
- [16] Ricci, C., et al., 2017, MNRAS, 468, 1273
- [17] Yamada, S., et al., 2019, ApJ, 876, 96
- [18] Yuan, T. T., et al., 2010, ApJ, 709, 884
- [19] Yamada, S., et al., 2022, ApJS, submitted
- [20] Teng, S. H., et al., 2015, ApJ, 814, 56
- [21] Armus, L., et al., 2009, PASP, 121, 559
- [22] Stierwalt, S., et al., 2013, ApJS, 206, 1
- [23] Kawaguchi, T., et al., 2020, ApJ, 890, 125
- [24] Vasudevan, R. V., & Fabian, A. C., 2007, MNRAS, 381,

1235

- [25] Lusso, E., et al., 2012, MNRAS, 425, 623
- [26] Smethurst, R. J., et al., 2019, MNRAS, 489, 4016
- [27] Tombesi, F., et al., 2015, Nature, 519, 436
- [28] Mizumoto, M., et al., 2019, ApJ, 871, 156
- [29] Fischer, T. C., et al., 2013, ApJS, 209, 1
- [30] Laha, S., et al., 2018, ApJ, 868, 10
- [31] Tombesi, F., et al., 2012, MNRAS, 422, L1
- [32] Fabian, A. C., et al., 2008, MNRAS, 385, L43
- [33] Ricci, C., et al., 2017, Nature, 549, 488
- [34] Veilleux, S., et al., 2016, ApJ, 825, 42
- [35] Fabian, A. C., et al., 2015, MNRAS, 451, 4375
- [36] Luo, B., et al., 2013, ApJ, 772, 153
- [37] Nomura, M., & Ohsuga, K., 2017, MNRAS, 465, 2873
- [38] Shangguan, J., et al., 2019, ApJ, 870, 104
- [39] Ueda, Y., et al., 2014, ApJ, 786, 104
- [40] Yamada, S., et al., 2021, ApJS, 257, 61

## Multiwavelength Studies of Galaxy-Supermassive Black Hole Coevolution in Galaxy Mergers

Satoshi YAMADA

*Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

Abstract: We performed a systematic X-ray spectroscopy for 57 local systems in various merger stages. Comparing them with the multiwavelength studies, we find that the star formation rates and bolometric active galactic nucleus (AGN) luminosities increase with merger stage. We suggest that the AGNs in late mergers become deeply buried by gas and dust, and multi-scale outflows can be produced. Finally, we discuss the picture of merger-driven coevolution of galaxies and supermassive black holes.