

星形成銀河と活動銀河核の進化 及び 死んだクエーサー問題とダウンサイ징に関する研究

住江 伸吾[†]

Clarification of Dead Quasars and Downsizing of Galaxies
with Evolution of Star Forming Galaxy and Active Galactic Nucleus

Shingo Sumie

1. はじめに

太陽質量 (M_{\odot}) の100万倍から10億超倍 ($10^6 M_{\odot} \sim 10^9 M_{\odot}$ 超) の質量を持つ超大質量ブラックホール (Super-Massive Black Hole : SMBH) は、マゼラン星雲のような矮小銀河を除くほぼすべての銀河の中心に存在し、クエーサー (Quasi Stellar Object : Quasar/QSO) やセイファート銀河 (Seyfert) やライナー (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region: LINER) などの活動銀河核 (Active Galactic Nucleus: AGN) の輝きは、SMBHの周りの降着円盤に周辺のガスが質量降着して重力エネルギーが解放され、熱核融合の0.7%に比べて圧倒的に高い10%もの高効率で電磁波やジェットのエネルギーに変換されるためであることが明らかになった (Lynden-Bell 1969)。しかし、近傍宇宙でみられる星形成銀河 (Star Forming Galaxy: SFG) とAGNの活動性の違い、初期宇宙での銀河やSMBHの形成過程、銀河とSMBHの共進化 (Magorrian et al. 1998) などについては未解明な部分が多い (谷口 2014)。

特に、銀河の進化の観点からは、2つの大きな未解決問題がクローズアップされている (谷口 他 2012)。

1つ目は「死んだクエーサー問題」である。最も明るい部類のAGNであるクエーサーは、宇宙誕生後20億年～30億年 (赤方偏移 $z=2\sim3$) の遠方宇宙には多く存在するが、100億年以上経った近傍宇宙 ($z < 0.1$) にはほとんど無いことが分かっている (Fan et al. 2001)。10億太陽質量 ($10^9 M_{\odot}$) を超えるSMBHは100億年程度では消滅しないので (Hawking 1975)、クエーサーが近傍宇宙に無いことは不思議なことである。クエーサーの典型的な光度 (単位時間当たりのエネルギー) は $10^{45} \text{ erg/s} \sim 10^{49} \text{ erg/s}$ であるため、対数光度は45～49、絶対等級は-23.7～-33.7となる。銀河の個数密度と赤方偏移 z の明るさ別の変化 (Ueda et al. 2003, Ikeda et al. 2012, Hasinger et al. 2005) で、クエー

サーは $z=2\sim3$ でピークとなり、現在に近づくにつれて減少して近傍宇宙にはほぼ存在しないことがわかる (図1)。

2つ目は「ダウンサイ징」である (Kriek et al. 2007, Ueda et al. 2003, Hasinger et al. 2005, Ikeda et al. 2011, Ikeda et al. 2012)。銀河の進化の過程では、小さい銀河が合体して大きな銀河に成長すると考えるのが自然であるが、観測によると、明るい (=大きい) 銀河の個数密度のピークは宇宙初期で、暗い (=小さい) 銀河ほど現在に近づくことが分かっている (図1)。すなわち、「大きな銀河ほど先に形成された」ということになり、銀河の進化に大きな矛盾が出てくる。

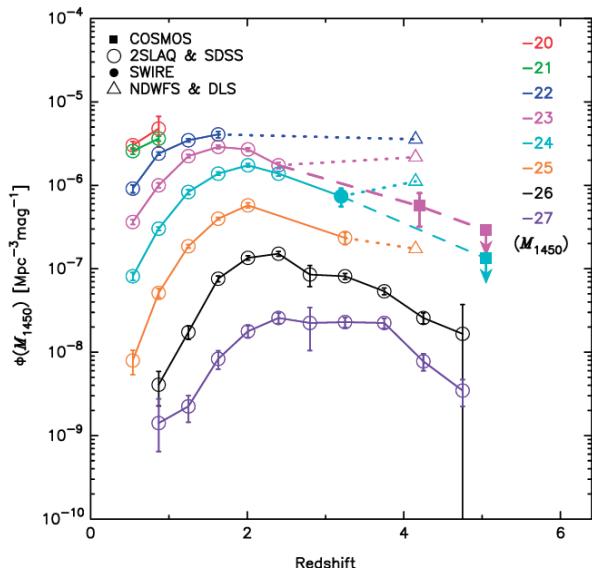


図1 銀河の個数密度と赤方偏移 z の絶対等級毎の変化
(Ikeda et al. 2012 Fig.9 : 紫外線～赤外線)

銀河のマクロ的な進化は、観測値との対応により光度進化 (Pure Luminosity Evolution: PLE) と密度進化 (Pure Density Evolution: PDE) により説明されている。赤方偏移

[†]2023年度修了 (自然環境科学プログラム)

が減少するにつれて明るいAGNの個数密度が減っていく現象を、光度進化では「AGNの光度が落ちていく」と考え、密度進化では「AGNの数が減っていく」と考える。實際には、光度進化と密度進化は並行して起きているとされている。一方、銀河の進化を引き起こすメカニズムには、下記の要因(A)と要因(B)が考えられる(谷口2004)。

要因(A) 「SFGが合体してAGNに変化」

メジャー・マージャー：巨大な渦巻銀河どうしの衝突により、星間ガスがぶつかり激しいウルトラ・スターバーストを誘起、大量に生まれた大質量星がガスを温めて、強い赤外線を放射する超高光度赤外線銀河ULIRG (Ultra Luminous Infrared Galaxy) が形成され、超新星爆発によるガスの放散によりクエーサー級の高輝度AGNが出現

マイナー・マージャー：渦巻銀河と衛星銀河の衝突により、衛星銀河の中心核はガスとともに渦巻銀河の中心核に落下して、高密度ガスの領域でスターバーストを誘起、ブラックホールへの質量降着が起きてセイファート銀河クラスの中輝度AGNを形成。

要因(B) 「AGNの活動性が減少」

ガスの枯渇：AGNを光らせているのは銀河中心部のガスのSMBH(降着円盤)への質量降着で、 $2 M_{\odot}/\text{年}$ 程度。中心部のガスは数万～数億 M_{\odot} 程度(谷口他2012)であるため、数万～数億年程度でガスは枯渇

ADAF：移流優勢流(Advection-Dominated Accretion Flow: ADAF)が形成されると、重力エネルギーの解放で発生した熱は放射で失われることなくSMBHに運ばれるため、放射光度は低下(Ichimaru 1977)

本研究では、SFGとAGNの様々な赤方偏移の宇宙での分布の概略傾向をつかむことにより、上記要因(A)(B)

のメカニズムのどちらが支配的であるかを調査し、「死んだクエーサー問題」と「ダウンサイ징」という銀河の進化に絡む未解決問題について解釈することを目的とする。なお、本論文では表現が煩雑になることを避けるために、SFGを「星を作っている銀河、あるいは活動性を示さない銀河」、AGNを「活動銀河核、あるいは活動銀河核を中心を持つ母銀河」とした。

本研究を通じ、密度パラメータとして Ω_m (バリオン+ダークマター) = 0.3, Ω_{Λ} (ダークエネルギー) = 0.7, ハッブル定数 $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ とした(二間瀬敏史 2002)。

2. 方法

2.1 SFGとAGNの放射光の特徴

活動性の観点から銀河の特徴をまとめると、AGNは高温の降着円盤から強い電磁波を放出して活動性を示す銀河であり、SFGはAGNのような活動性を示さない銀河ということができる。SFGとAGNの放射光の特徴を、連続光、水素原子の再結合線、イオンの高階電離輝線ごとに表1に整理した。

AGNでは、降着円盤の周囲には高速(高温)・高密度のガスプラズマから成る0.1pc程度の広さの広輝線領域(Broad Line Region: BLR)が形成され、高速で移動するガスによるドップラー効果によりFWHMで5,000km/s¹(500km/s¹～10⁴km/s¹)という幅の広い広輝線(Broad Line: BL)を放出する。降着円盤から100pc～1Kpc程度離れたところには低速(低温)・低密度のガスプラズマから成る狭輝線領域(Narrow Line Region: NLR)が形成され、FWHMで400km/s¹(200km/s¹～900km/s¹)と狭い狭輝線(Narrow Line: NL)を放出する。AGNの1型はAGNをフェイス方向から観測した場合でBLRが見えるため、BLとNLの両方の輝線が現れる。2型はエッジ方向から観測し

表1 SFGとAGN(1型, 2型)が放射する連続光、水素原子の再結合線、イオンの高階電離輝線の特徴

放射光	SFG	AGN		備考
		1型	2型	
連続光	黒体輻射	シンクロトロン放射		AGNの放射はべき乗則
広輝線	水素原子 再結合	無 (低速)	H β 等	1型のBLRは>5,000km/sと高速(高温)なため、H β などの広輝線を放射
	イオン 高階電離	無 (低温)	C _{IV} , C _{III}], Si _{IV} +O _{IV}]等	再結合線と半禁制線]を放射、大きなドップラーフィルターのため、スペクトルが混合
狭輝線	水素原子 再結合	Lya, Ha, H β , H γ 等	Lya, Ha, H β , H γ 等	中心から1Kpc程度まで広がった水素原子ガスによるライマン系列やバルマー系列
	イオン 高階電離	無	C _{IV} , Mg _{II} , [O _{III}], [N _{II}], [S _{II}], [O _I]等	AGNのNLRは2,000cm ⁻³ と低密度のため、許容線と半禁制線]と[禁制線]を放射

BLR: Broad Line Region(広輝線領域: 幅広の再結合線と半禁制線]を放射) NLR: Narrow Line Region(狭輝線領域: 幅狭の再結合線と半禁制線]と[禁制線]を放射) 高階電離輝線の詳細: C_{IV}1549, C_{III}1909, Si_{IV}+O_{IV}] (Si_{IV}394, 1403, O_{IV}]1402), Mg_{II}2798, [O_{III}]5008, [N_{II}]6585, [S_{II}]6718, [O_I]6302

星形成銀河と活動銀河核の進化 及び
死んだクエーサー問題とダウンサイジングに関する研究

た場合でBLRはダストトーラスに隠されて見えないため、輝線にはNLだけが現れる。クエーサーではほとんどが1型で2型は0.1%程度と非常に少ないが、セイファート銀河では1型が30%に対して2型は70%と逆転する（谷口2004）。これは、クエーサーでは強い放射がトーラスを破壊する、あるいは高光度のAGNではトーラスが幾何学的に薄いため、クエーサーではBLRからのBLが隠されないためと考えられている（ピーターソン2010）。一方、SFGでは降着円盤が働くためガスは低速・低温で、放出される輝線は主として水素の狭輝線だけである。

2.2 BPT図によるSFGとAGNの分類と赤方偏移依存性

このような輝線の特徴を利用してSFGとAGNを分類する手法には、 $\text{Ly}\alpha$ 輝線の幅の違い（SFG : FWHM \leq 1,000km s $^{-1}$ 、AGN : FWHM $>$ 1,000km s $^{-1}$ ）を利用する方法（Zhang et al. 2021）や、高赤方偏移宇宙のクエーサーが生じるライマン・ブレークをtwo-color diagramにより検出する方法（Ikeda et al. 2011, Ikeda et al. 2012）や、可視光輝線診断図のBPT図（Baldwin et al. 1981）を用いる方法などがある。本研究では、SFGとAGNを分離できる上にAGNをセイファート銀河、ライナーに分離することができるBPT図を用いることにした。

BPT図は、AGNはSFGより高階電離輝線のフラックス（単位面積・単位時間あたりのエネルギー）が大きいことを利用する方法で、それぞれの銀河の禁制線である高階電離輝線と水素のバルマー輝線フラックスの比を2次元図にプロットし、境界線によって分けられる領域によりSFGとAGNに分離する。縦軸に電離度の高い禁制線 $[\text{O}_{\text{III}}]5008$ と $\text{H}\beta$ 線のフラックス比、横軸に電離度の低い禁制線 $[\text{N}_{\text{II}}]6585$ と $\text{H}\alpha$ 線のフラックス比をとる図がよく用いられる。

銀河の進化の様子を把握するため、 $0 < z < 6.5$ （現在～宇宙誕生後10億年）の幅広い赤方偏移の宇宙において、SFGとAGNの個数密度の赤方偏移依存性を調査した。

3. サンプル

赤方偏移が0.5を超えるとバルマー輝線が近赤外線領域に偏移してしまうので、BPT図を $\text{H}\alpha$ ～ $\text{H}\beta$ 領域で作成するためには、近赤外線での分光観測が必要になる。赤方偏移が大きいため銀河の見かけの明るさが暗くなることに加え、近赤外線は可視光よりも検出器の感度が低いので精密な観測が難しい。

地上からの観測では、多くの光を集められる8m～10mクラスの大口径望遠鏡が必要になる。また、同時にできるだけ多数の天体を分光するために、光ファイバーなどを用いた多天体分光による広視野観測が望ましい。このような条件を満たす望遠鏡/装置には、すばる望遠鏡のファイバー多天体分光器（Subaru Fiber Multi-Object Spectrograph: Subaru-FMOS）や、ケック望遠鏡の多天体赤外線分光器（KECK Multi-Object Spectrograph For

InfraRed Exploration: KECK-MOSFIRE）があるため、各2つのデータベースを分析した。

2021年末に打ち上げられたジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（James Webb Space Telescope: JWST）は、高赤方偏移の宇宙を中心に探査している。本研究では、JWSTの観測データによる2つの新しい論文を分析した。

4. 結果

4.1 BPT図での境界設定とKartaltepe et al. 2015の分析（Subaru-FMOS）

BPT図におけるSFGとAGNの識別境界設定法には、固定境界法（Brinchmann et al. 2004）と可変境界法（Kewley et al. 2013a）があるが、SFGとAGNの個数密度の赤方偏移依存性を把握するという本研究には両法とも大差ないため、計算処理が容易な固定境界法を選んだ。また、分離の係数には、Brinchmann et al. 2004のFigure 1に示されている2つの境界線に合致する値とした。その結果、SFGとCMP（Composite）の境界線は、

$$\log\left(\frac{[\text{O}_{\text{III}}]5008}{\text{H}\beta}\right) = \frac{0.61}{\log\left(\frac{[\text{N}_{\text{II}}]6585}{\text{H}\alpha}\right) - 0.07} + 1.30 \quad \text{式 1(青線)}$$

となり、CMPとAGNの境界線は、

$$\log\left(\frac{[\text{O}_{\text{III}}]5008}{\text{H}\beta}\right) = \frac{0.61}{\log\left(\frac{[\text{N}_{\text{II}}]6585}{\text{H}\alpha}\right) - 0.48} + 1.24 \quad \text{式 2(赤線)}$$

となった。

Kartaltepe et al. 2015 Table 2について、各z範囲についてBPT図を作成して、SFGとAGNの個数を求めた（図2）。

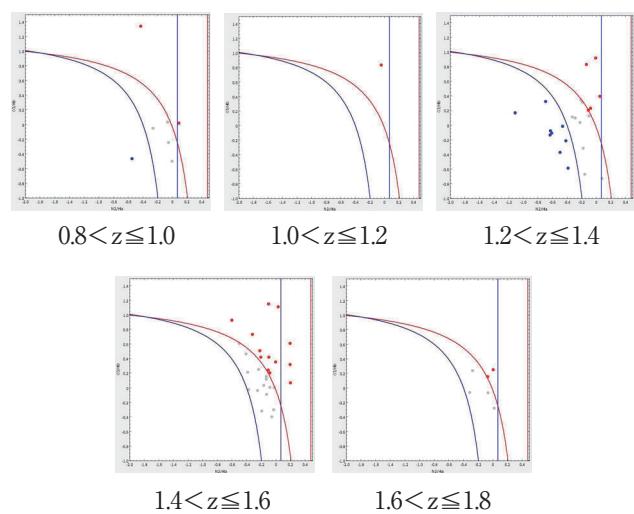


図2 5つのz範囲におけるBPT図
青：SFG、赤：AGN (Kartaltepe et al. 2015 Table 2)

図2から求めたSFGとAGNの個数を個数密度に変換するために、各z範囲の最小zと最大zに対応する共動距離（Comoving Radial Distance: CRD）を半径とする球殻の体積を求め、サーベイ面積（COSMOSは2deg 2 ）の全球面

積 (41253deg^2) との比率を乗じてサーベイ体積を求めた。結果を図3に示す。SFGは低zに、AGNが高zに分布する傾向を示した。

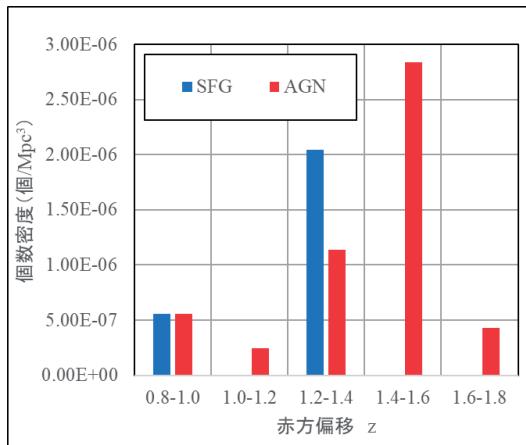


図3 SFGとAGNの個数密度のz依存性
(Kartaltepe et al. 2015のTable 2)

4.2 FMOS-COSMOS-CATALOG-2019の分析 (Subaru-FMOS)

本カタログには、4輝線のFLUX ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$) と共にFLUX_ERR ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$) が記入されていたため、S/N (FLUX/FLUX_ERR) の違いによるSFGとAGNの分布の傾向を把握するために、S/N ≥ 3 , S/N ≥ 5 , S/N ≥ 10 の3種類について分析した。ここでは、S/N ≥ 5 について、各z範囲のBPT図（図4）と、個数密度のz依存性（図5）を示す（サーベイ面積は 1.7deg^2 ）。

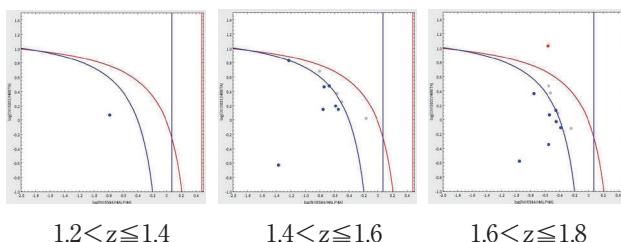


図4 S/N ≥ 5 における3つのz範囲でのBPT図
(FMOS-COSMOS-CATALOG-2019)

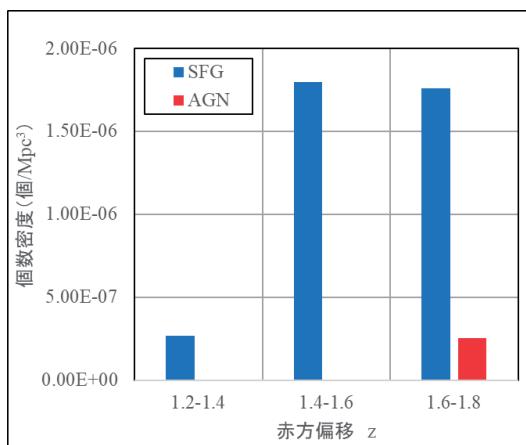


図5 S/N ≥ 5 におけるSFGとAGNの個数密度のz依存性
(FMOS-COSMOS-CATALOG-2019)

S/N ≥ 5 ではSFGは $1.2 < z \leq 1.4$, $1.4 < z \leq 1.6$, $1.6 < z \leq 1.8$ の3領域に分布し、AGNは $1.6 < z \leq 1.8$ の領域にのみ分布した。AGNはSFGより高z領域に存在する傾向は、他のS/Nでも同様であったが、S/Nが向上してデータの信頼性が高まるとより顕著になった。これらのことから、 $1.2 < z \leq 1.8$ の宇宙において、AGNはSFGより高z領域に分布すると考えられる。

4.3 MOSFIRE-KBSSの分析 (KECK-MOSFIRE)

Steidel et al. 2014のTable 1に記載されたzが $2.0 < z \leq 2.6$ の天体251の中で、 $[\text{O}_{\text{III}}]5008$, $[\text{N}_{\text{II}}]6585$, $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$ の4輝線が測定できている天体168個について、0.2刻みの3つのz範囲 ($2.0 < z \leq 2.2$, $2.2 < z \leq 2.4$, $2.4 < z \leq 2.6$) に分けてBPT図を作成し、それぞれについてSFGとAGNを分類した（図6）。個数密度のz依存性を図7に示す（サーベイ面積は 0.13deg^2 ）。

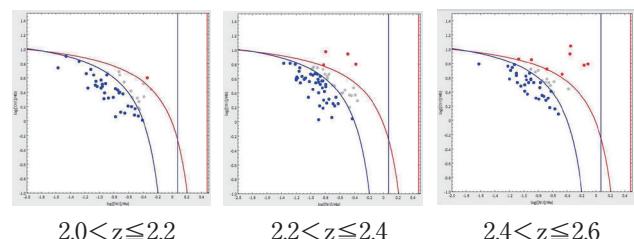


図6 3つのz範囲でのBPT図 (MOSFIRE-KBSS)

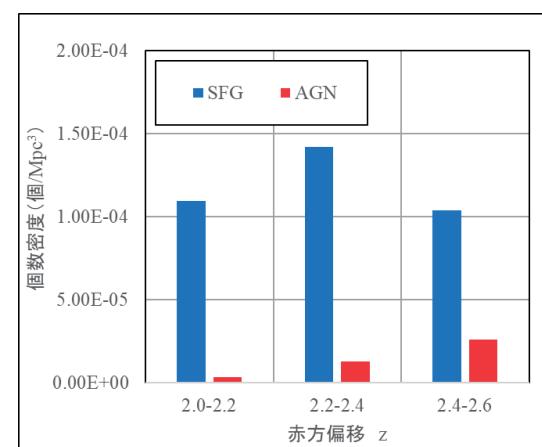


図7 SFGとAGNの個数密度のz依存性(MOSFIRE-KBSS)

図7より、SFGは $2.0 < z \leq 2.2$, $2.2 < z \leq 2.4$, $2.4 < z \leq 2.6$ の各z範囲に大差なく分布するが、AGNは高zに向かうにつれて個数密度が増えることが分かった。分布のピークは、SFGは $2.2 < z \leq 2.4$ であるのに対し、AGNは $2.4 < z \leq 2.6$ 以上であった。すなわち、 $2.0 < z \leq 2.6$ の宇宙において、SFGは低z領域に分布し、AGNは高z領域に分布することが分かった。

4.4 MOSFIRE-MOSDEFの分析 (KECK-MOSFIRE)

本カタログには、 $[\text{O}_{\text{II}}]3727 \sim [\text{S}_{\text{II}}]6733$ の16輝線について、INTERCEPT ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$) ~PREFERREDFLUX_ERR

星形成銀河と活動銀河核の進化 及び
死んだクエーサー問題とダウンサイジングに関する研究

($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$) の22種類の情報が記入されていた。S/N (FLUX/FLUX_ERR) の違いによるSFGとAGNの分布の傾向を把握するために、BPT図による分析に必要な $[\text{O}_{\text{III}}]5008$, $[\text{N}_{\text{II}}]6585$, $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$ の4輝線についてFLUX ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$) とFLUX_ERR ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$) の比を求め、S/N ≥ 3 , S/N ≥ 5 , S/N ≥ 10 , S/N ≥ 15 の4種類のS/Nについて分析した。ここでは、S/N ≥ 10 について、各z範囲のBPT図(図8)と、個数密度のz依存性(図9)を示す(サーベイ面積は 0.13deg^2)。

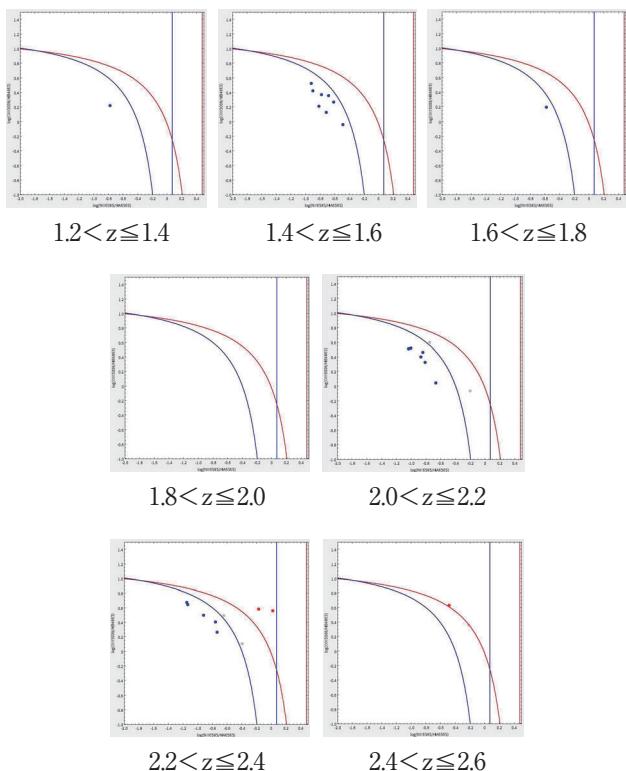


図8 S/N ≥ 10 における7つのz範囲でのBPT図
(MOSFIRE-MOSDEF)

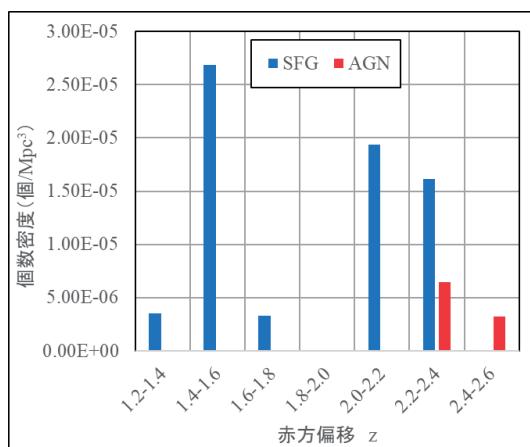


図9 S/N ≥ 10 におけるSFGとAGNの個数密度のz依存性
(MOSFIRE-MOSDEF)

S/N ≥ 10 では、SFGは $1.2 < z \leq 1.4$, $1.4 < z \leq 1.6$, $1.6 < z \leq 1.8$, $2.0 < z \leq 2.2$, $2.2 < z \leq 2.4$ の5領域に分布し、AGNは $2.2 < z \leq 2.4$ 及び $2.4 < z \leq 2.6$ の2領域にのみ分布した。また、

S/N ≥ 15 では、SFGは $1.2 < z \leq 1.4$, $1.4 < z \leq 1.6$, $1.6 < z \leq 1.8$, $2.2 < z \leq 2.4$ の4領域に分布し、AGNは $2.4 < z \leq 2.6$ の領域にのみ分布した。すなわち、AGNはSFGより高z領域に存在する傾向を保有すると考えられる。一方、S/N ≥ 3 とS/N ≥ 5 の低S/Nでは分布の傾向は認められていないが、これは、ノイズの混入が影響していると考えられる。上記より、 $1.2 < z \leq 2.6$ の宇宙において、AGNはSFGより高z領域に分布すると考えられる。

4.5 JWST/NIRSpecによる高z領域の測定論文の分析

Sanders et al. 2023のFigure 3. には、 $z=2.0-9.3$ の164個の天体について様々な輝線の輝度比によるBPT図が掲載されている。本研究では、 $[\text{N}_{\text{II}}]6585$ BPT図(縦軸 $[\text{O}_{\text{III}}]5008/\text{H}\beta$ -横軸 $[\text{N}_{\text{II}}]6585/\text{H}\alpha$)と、 $[\text{S}_{\text{II}}]6718$ BPT図(縦軸 $[\text{O}_{\text{III}}]5008/\text{H}\beta$ -横軸 $[\text{S}_{\text{II}}]6718/\text{H}\alpha$)に着目し、様々なz範囲におけるSFGとAGNのz依存性を分析した。

$[\text{N}_{\text{II}}]6585$ BPT図、 $[\text{S}_{\text{II}}]6718$ BPT図とも、z範囲 $2.7 \leq z < 4.0$ では、 $2.0 \leq z < 2.7$ からzが増加することでSFGが右上に移動し、SFG/AGN境界に更に近づいた。更にz範囲が増加して $4.0 \leq z < 5.0$ や $5.0 \leq z < 6.5$ になると、右上方向への移動傾向は曖昧になり、むしろ上方向に移動したように見える。これは、銀河が遠方に存在することからS/Nの良い $[\text{O}_{\text{III}}]5008$ は測定できているが、 $[\text{N}_{\text{II}}]6585$ や $[\text{S}_{\text{II}}]6718$ の輝度が測定限界に近づいているためと思われる。いずれにしても、zが増加するとAGN領域に分布する銀河の割合が増え、またSFG/AGN境界線から離れた位置に存在するようになっている。SFGとAGNのz依存性は、定性的ではあるが図10のようになる。すなわち、低zではSFG>AGNであり、高zではSFG<AGNの傾向を有することになる。

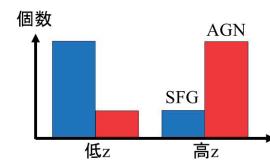


図10 Sanders et al. 2023 の Figure 3 の $[\text{N}_{\text{II}}]6585$ BPT図や $[\text{S}_{\text{II}}]6718$ BPT図から得られるSFGとAGNの定性的なz依存性

4.6 JWST/MIRIによる高z領域の測定論文の分析

Yang et al. 2023では、おおぐま座とうしかい座の間にあるExtended Groth Strip: EGS領域をJWSTのMIRIにより観測し、結果をCIGALEによるSEDフィッティング/モデリングを用いて分析することにより、銀河をSFG(本論文ではSFと記述), mixed, AGNに分類している。

Yang et al. 2023のFigure 3.から各z範囲及びSFGとAGNの個数を読み取って、サーベイ面積(9 arcmin^2)から求めたサーベイ体積により、SFGとAGNの個数密度を算出し、z依存性を図11に整理した。

図11からSFGとAGNの個数密度のzに対する傾向を見ると、SFGは低zではAGNより多くzの増加とともに減少す

るのに対し、AGNは z に関わらず概ね一定で $z \sim 3$ を超えるとAGNがSFGより多くなる傾向が読み取れる。すなわち、低 z ではSFGが多く、高 z になるとAGNが多くなるという結果が得られた。

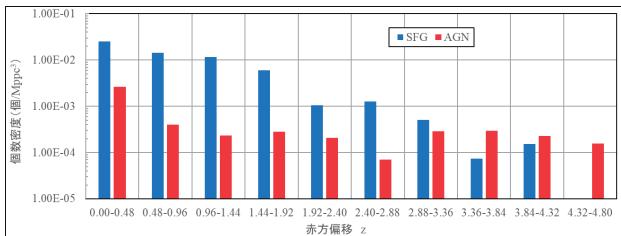


図11 Yang et al. 2023のFigure 3. から読み取ったSFG, AGNの個数密度の z 依存性

5. 考察

SUBARU-FMOS, KECK-MOSFIRE, JWSTによるSFGとAGNの個数密度の z 依存性から、サーベイ全体の傾向を抽出すると図12となる。

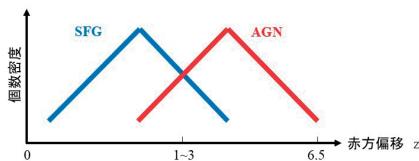


図12 SUBARU-FMOS, KECK-MOSFIRE, JWSTによるSFGとAGNの個数密度の z 依存性(サーベイ全体の傾向)

図12から、下記の密度進化の傾向を読み取れる。

傾向 (1) 「SFGは低 z に、AGNは高 z に分布 ($z < 6.5$)」

傾向 (2) 「SFGとAGNの個数密度は、 $z=1 \sim 3$ で逆転」最初に述べたように、銀河の光度進化と密度進化を引き起こすメカニズムには、

要因 (A) 「SFGが合体してAGNに変化」

要因 (B) 「AGNの活動性が減少」

があると考えられている。要因 (B) のメカニズムには、ガスの枯渇、ADAFなどが考えられるが、本研究ではガスの枯渇に着目して、ガスの質量降着の速度とAGNの光度の関係について、簡単な計算で確認した。

銀河中心付近に存在する質量 M のガスが、SMBHの重力により降着円盤に質量降着して、そのエネルギーを電磁波(光度 L_Q)として放出するとした場合、質量降着の時定数を τ 、質量の電磁波への変換効率を η (0.1程度)、光速を c 、時間を t とすると、 A を定数として、

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{M}{\tau} \text{ より, } M = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \text{ であるから,}$$

$$L_Q = \eta \left(-\frac{dM}{dt}\right) c^2 = \frac{\eta c^2 A}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\therefore \log(L_Q) = \log(e) \ln\left(\frac{\eta c^2 A}{\tau}\right) - \frac{t}{\tau \log(e)} \quad \text{式3}$$

となる。Kartaltepe et al. 2015のFigure 1から z に対する光度の中央値を読み、横軸を z から宇宙年齢に変換したグラ

フを図13に示す。図13では、銀河の光度は宇宙年齢の増加とともに単調減少していて、16億歳～138億歳での光度減少の平均時定数 τ_m は式3より、 $\tau_m \sim 15$ 億年となった。ビッグバン後のある時点で銀河が一斉に生まれたとした場合、138億年後の現在において様々な赤方偏移 z で観測される銀河はすべて誕生からの経過時間は同じであるが、電磁波の伝搬速度が有限であるために z が大きいほど宇宙初期での姿を現すことになる。すなわち、

傾向 (3) 「生まれたばかりの銀河は明るく、時間の経過とともに暗くなっていく」

という光度進化の傾向を示している。

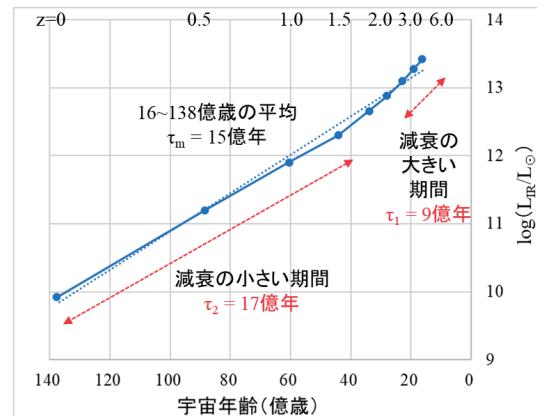


図13 銀河のIR光度と宇宙年齢
式3に従って質量降着の時定数 τ を導出

また、図13は2つの傾きの異なる減衰直線から構成されていて、宇宙年齢が16億歳～28億歳の「減衰の大きい期間 ($\tau_1=9$ 億年)」、及び44億歳～現在の「減衰の小さい期間 ($\tau_2=17$ 億年)」に分けることができる。AGNがSFGに変化してSFGが増えると、メジャー・マージャーやマイナー・マージャーにより銀河どうしの合体が起こり、要因 (A) が一定の割合を占めるようになる。「減衰の大きい期間」も「減衰の小さい期間」も銀河の光度が単調減少していることから要因 (A) より要因 (B) の方が優勢であるが、「減衰の大きい期間」は要因 (A) が少ないため τ が小さく、「減衰の小さい期間」になるとSFGが増加して要因 (A) 増えてくるために τ が大きくなると考えることができる。

傾向 (1) と傾向 (3) を同時に満たし、初期宇宙で要因 (A) によりSFGからクエーサーが形成される過程や、AGNの活動性が減少する過程、近傍宇宙でSFGからセイファート銀河などのAGNが再形成される過程を加えると、図14のモデルになる。このモデルについて、縦軸を個数密度、横軸を z で模式的にグラフ化すると図15のようになる。

5.1 ①AGN急増期 (要因 (A) >>要因 (B))

図15の①AGN急増期は、宇宙が誕生 ($z=\infty$, 0歳) してから最初にSMBHや巨大クエーサーが形成される ($z=7$,

星形成銀河と活動銀河核の進化 及び
死んだクエーサー問題とダウンサイジングに関する研究

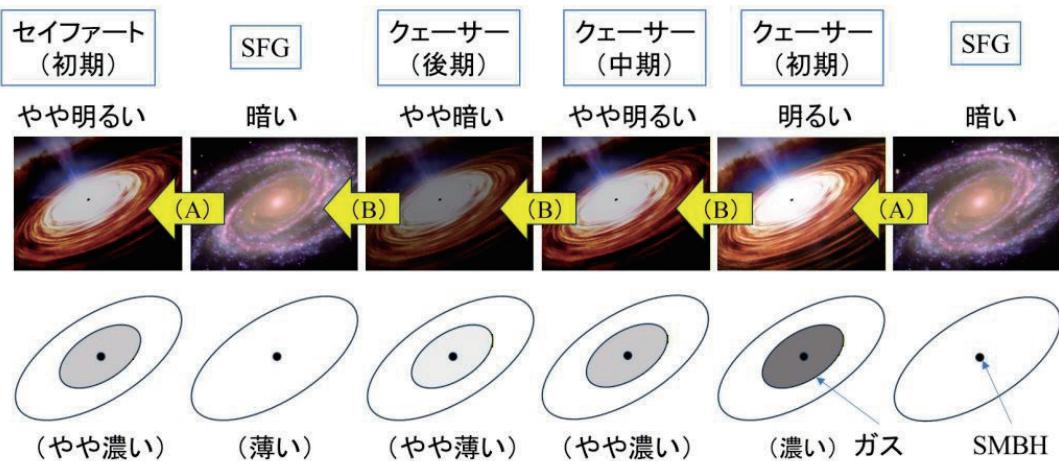


図14 SFGとクエーサー・セイファート銀河・ライナーの変化

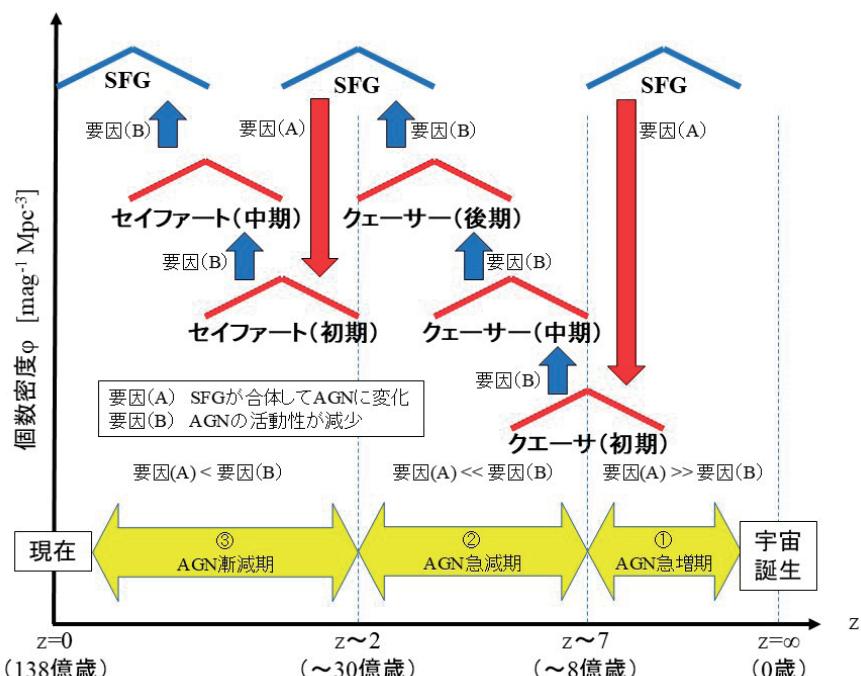


図15 AGNの密度進化と光度進化のメカニズム

宇宙誕生後8億年)までの初期宇宙である。この時期は、 $1000M_{\odot}$ 程度の大質量星が誕生しやすく、大質量星は星団を形成してより個数密度の高い場所で連鎖的に合体を繰り返す「暴走合体」が起きる。「暴走合体」により超大質量星ができ、これらは短期間の内に超新星爆発を起こして $100M_{\odot}$ 程度の中質量ブラックホール (Intermediate Mass Black Hole: IMBH) を残す。IMBHを種にしてガス降着と銀河の合体でどのように質量を増やせるかを調べたシミュレーションによると、宇宙年齢9億年の頃までに 10^9M_{\odot} のSMBHができる、母銀河の質量は $10^{12}M_{\odot}$ (銀河系と同程度)となることが確認されている (Li et al. 2007)。

5.2 ②AGN急減期 (要因 (A) <<要因 (B))

②AGN急減期は、①AGN急増期で形成されたAGNが活動性を失っていく時期と想定した (図15の減衰の大きい期

間に対応)。降着円盤はガス粒子どうしの摩擦により熱せられ、数十万Kもの高温になるため、円盤中央部から強力なX線や紫外線が放射される。円盤の外側では温度は数千Kまで下がるため、可視光が放出される。また、電波銀河と呼ばれる銀河からは、電子と陽電子のペア・プラズマの流れである電波ジェットが噴出する。このようにして、母銀河中心部のガスは電磁波のエネルギーに置き換わるとともに、SMBHに飲み込まれてその質量を増加させることで消失していく。時間の経過とともにガスが消失していくと、式3に従って質量降着率 (dM/dt) と光度 L_Q が小さくなり、AGNの活動性が低下していくと考えられる。

傾向 (2) 「SFGとAGNの個数密度は $z=1 \sim 3$ で逆転」は、図15の $z \sim 2$ の頃にSFGが増えたことで生じる。同様に、図1では暗い銀河が増えた $z \sim 2$ の頃に相当する。

5.3 ③AGN漸減期（要因（A）<要因（B））

③AGN漸減期では、②AGN急減期と同様にAGNが活動性を失って低光度の銀河に変化する過程は継続するが、②で再び形成されたSFGが合体してAGNに変化することによりAGNの減少は②より穏やかになり、銀河の光度減衰の速度は小さくなると考えた（図13の減衰の小さい期間に対応）。

地球から数億光年しか離れていない近傍宇宙で、波長 $1\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ の赤外線での光度が太陽1兆個分（ 10^{12}L_\odot ）とクエーサーに匹敵する異常に明るい超高光度赤外線銀河ULIRGが多く見つかっている。それらは銀河本体から尾（腕）が出ている構造を持つものが多い。これらの尾は、複数の銀河が合体している、あるいは合体しつつある銀河に特徴的であることから、ULIRGは合体銀河であると結論づけられている（谷口他 2012）。

大量にガスを含む渦巻銀河が合体すると、お互いの銀河に含まれていたガスが激しく衝突する。合体が進行するにつれてガスはさらに中心部に落ち込んでいき、ウルトラ・スターバーストを起こし、形成された若い大質量星からは強い紫外線や可視光が放射される。エネルギーを吸収して温まったダストからは強い赤外線が再放射され、外部から赤外線光度の異常に強い銀河として観察される。この状態がULIRGと解釈されている。一方、若い大質量星は、どんどん超新星爆発を起こして死んでいく（超新星バースト）。この時に発生した銀河風（スーパーウィンド）の影響で、合体銀河にあったガスやダストは銀河の外に吹き払われ、X線・紫外線・可視光で明るく光る中心核が見えてくる。これがクエーサーなどのAGNとして説明されている（カリテクモデル：Sanders et al. 1988）。また、渦巻銀河と衛星銀河の衝突で、セイファート銀河も形成される（谷口他 2012）。

AGNの再形成の時定数を τ_x とすると、式4と図13の $\tau_1 = 9$ 億年、 $\tau_2 = 17$ 億年を用いて、 $\tau_x = -19$ 億年となる。 τ_x はSFGがAGNに変化するタイムラグであり、得られた19億年は、NASA Hubble Mission Team, 2012の銀河合体の時間（約30億年）とオーダーは一致した。

$$\frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_x} \quad \text{式 4}$$

5.4 死んだクエーサー問題とダウンサイ징への示唆

クエーサーのエネルギー源であるSMBHは、現在の宇宙年齢である138億歳程度では死なないのに、クエーサーが近傍宇宙には見当たらないのは、「クエーサーの中にSMBHは今でも存在するが、銀河中心部のガスが欠乏して降着現象が収まつたことで普通銀河（SFG）として観測されているため」と理解することができる。

図1に示したように、光度の大きな（絶対等級の小さな）銀河ほど個数密度のピークは高z（初期宇宙）にあるため、明るい大きな銀河ほど先に形成されたように見え、それは

合体による銀河の進化と矛盾するように感じられるが、「クエーサーが形成された後、ガス降着率が低下することにより暗くなつていき、暗いAGNの個数が増加する際に明るいAGNの個数が減少してそれぞれがピークを持つ」と考えると説明できる（図15）。明るい銀河ほど個数密度が小さいのは、明るいほどサーベイ体積が大きく換算されるためである。図1と、図15の②AGN急減期（～③AGN漸減期）が良く似ていることも、注目に値する。

6. まとめ

銀河の中心領域から強い電磁波を放射して活動性を示すAGN（活動銀河核）と、そのような活動性を示さないSFG（星形成銀河）を、固定境界法を用いたBPT図により分類したところ、SFGは低zに、AGNは高zに分布し、SFGとAGNの個数密度は $z=1 \sim 3$ で逆転するという結果が得られた。また、銀河の光度は宇宙年齢の増加と共に単調減少し、生まれたばかりの銀河は明るかったが、時間の経過と共に暗くなつていくことがわかった。

上記より、初期宇宙でSFGが合体してクエーサーを形成、その後中心付近のガスが減って活動性が弱まってSFGに変化し、近傍の宇宙では再びSFGが合体してAGNを形成するというモデルを提案した。このモデルを用いると、「死んだクエーサー問題」や「ダウンサイ징」を説明できた。

謝辞

本研究をご指導いただいた放送大学教授の谷口義明様に深く感謝いたします。また、適格なアドバイスと数々のデータベースや論文を紹介いただいた東北大学准教授の村山卓様に心より感謝申し上げます。なお、谷口教授は2026年1月9日に逝去されました。衷心より谷口教授のご冥福をお祈り申し上げます。

参考文献

- Baldwin et al. 1981, Publication of the Astronomical Society of the Pacific, 93, 5
 Brinchmann et al. 2004, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 351, 1151
 Fan et al. 2001, AJ, 122, 2833
 Hasinger et al. 2005, A&A, 441, 417
 Hawking 1975, Communication in Mathematical Physics 43, 199-220
 Ichimaru 1977, The Astrophysical Journal, 214, 840
 Ikeda et al. 2011, The Astrophysical Journal Letters, 728, L25
 Ikeda et al. 2012, The Astrophysical Journal, 756, 160
 Kartaltepe et al. 2015, The Astrophysical Journal Letters,

- 806, L35
 Kashino et al. 2019, The Astrophysical Journal, 241, 10
 Kauffmann et al. 2003, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 346, 1055
 Kewley et al. 2001, The Astrophysical Journal, 556, 121
 Kewley et al. 2006, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 372, 961
 Kewley et al. 2013a The Astrophysical Journal, 774, 100 (September 10)
 Kewley et al. 2013b The Astrophysical Journal Letters, 774, L10 (September 1)
 Kriek et al. 2007, The Astrophysical Journal, 669, 776
 Kriek et al. 2015, The Astrophysical Journal, 218, 15
 Li et al. 2007, ApJ, 665, 187
 Lynden-Bell 1969, Nature, 223, 690
 Magorrian et al. 1998, Astron. J, 115, 2285
 NASA Hubble Mission Team, 2012, <https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasas-hubble-shows-milky-way-is-destined-for-head-on-collision>
 Sanders et al. 1988, The Astrophysical Journal, 325, 74
 Sanders et al. 2023, Draft version January 18, “Excitation and Ionization Properties of Star-forming Galaxies at $z=2.0-9.3$ with JWST/NIRSpec”
 Shapley et al. 2015, The Astrophysical Journal, 801, 88
 Shapley et al. 2019, The Astrophysical Journal Letter, 881, L35
 Steidel et al. 2014, The Astrophysical Journal, 795, 165
 Ueda et al. 2003, The Astrophysical Journal, 598, 886
 Wang et al. 2021, Astrophysical Journal Letters, 907, L1
 Yang et al. 2023, Submitted on 21 Mar. 2023 (v1), last revised 15 May 2023 (this version, v2) “CEERS Key Paper VI: JWST/MIRI Uncovers a Large Population of Obscured AGN at High Redshifts”
 Zhang et al. 2021, The Astrophysical Journal, 922, 167
 柏野 2017, 天文月報, 6月号, 406
 川勝 他 2011, 日本物理学会誌, 66, 285
 二間瀬敏史 2002, 「なっとくする宇宙論」, 講談社
 ピーターソン 2010, 「活動銀河核」, 和田桂一ら訳, 丸善
 谷口 2004, 「クエーサーの謎」, 講談社ブルーバックス
 谷口 他 2012, 「巨大ブラックホールと宇宙」, 丸善出版
 谷口 2014, 日本物理学会誌 69, 744
 谷口 他 2018, 「銀河I 銀河と宇宙の階層構造」, 日本評論社, シリーズ現代の天文学4