

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：16301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654068

研究課題名(和文)宇宙の「生きた化石」：現在の宇宙に潜む進化最初期の銀河と巨大ブラックホールの探査

研究課題名(英文) Exploring galaxies and supermassive black holes in the earliest phase of their chemical evolution

研究代表者

長尾 透 (Nagao, Tohru)

愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授

研究者番号：00508450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：現在の宇宙に潜む進化初期段階にある銀河を探索するため、重元素量が低く化学進化の進んでいない銀河だと思われる天体を広視野狭帯域撮像観測および分光追求観測により探査した。その結果、重元素量の低い銀河に特有の[OIII]4363輝線を放射する銀河を20天体発見した。

一方、現在の宇宙における巨大ブラックホール天体の化学進化について知見を得るため、PGクェーサーの紫外線スペクトルを系統的に調査した。その結果、初期宇宙とは統計的性質が異なり、巨大ブラックホール成長の物理が初期宇宙と現在で異なる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：For exploring extremely metal-poor galaxies at the initial phase of their chemical evolution in nearby (i.e., current) universe, we performed wide-field narrow-band imaging observations and follow-up deep spectroscopic observations. Accordingly we found 20 galaxies emitting [OIII]4363 emission, that is expected for such metal-poor galaxies.

On the other hand, we investigated also the chemical properties of galaxies hosting supermassive black holes in nearby (i.e., current) universe, through the analysis of UV spectra of PG quasars. As a result, the inferred statistical dependences of their chemical properties on the mass accretion rate onto their supermassive black holes are systematically different between the nearby and distant universe. This infers a systematically different physics behind the mass fueling onto supermassive black holes at the nucleus of galaxies.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：銀河進化 光学赤外線天文学 巨大ブラックホール 化学進化 電離ガス スペクトル解析

## 1. 研究開始当初の背景

ここ 10 年間のすばる望遠鏡の活躍により、100 億光年以上遠方にある銀河、すなわち今から 100 億年以上昔の宇宙(宇宙開闢後 30 億年程度か、それよりも若い宇宙に相当)に存在する銀河が大量に発見されてきている。しかし驚くべきことに、銀河進化について、とりわけその最初期の物理については依然として謎に包まれたままとなっている。その理由は、主として次の 3 つである。(1) 観測対象となる遠方銀河は見かけの明るさが極めて暗く、見つけたとしても詳細観測が不可能なため、その物理化学状態を定量的に調べることがほぼ不可能。(2) 極めて暗いということから、遠方宇宙で見つかった銀河のうちどの天体が進化最初期にあるのかを識別する方法がなく、そもそもどの天体を詳細観測すればよいかも分からない。(3) 銀河進化の最初期は厚い塵に覆われている場合があり、その場合は可視光・近赤外線観測による調査が極端に困難になる。さらに近年、銀河中心部に存在する巨大ブラックホール(太陽質量の百万倍以上)の存在が銀河進化に甚大な影響を及ぼしていること(銀河と巨大ブラックホールの共進化)が分かってきた。この物理を解明するには、進化の初期段階にある銀河および巨大ブラックホールを調査する必要があるが、非常に距離の離れた天体は見かけの大きさが極めて小さく、銀河と巨大ブラックホールを区別して観測することが極めて困難である。以上の事情により、銀河および巨大ブラックホールの進化最初期の描像については理解が進んでおらず、このことが銀河進化の全体像の把握を阻んでいた。

## 2. 研究の目的

上記の情勢を踏まえ、我々は遠方宇宙において進化最初期にある銀河を探索するのではなく、比較的近傍の宇宙にある銀河にも実は進化途上期にある銀河が含まれているのではないかという観点で進化最初期にある銀河を探索するという可能性について着想を得た。こうした銀河は仮に存在していたとしても、これまでの調査では見逃されてきた可能性がある。その理由は以下の 2 点である。(1) 近年考えられている銀河進化シナリオである「ダウンサイジング現象」(大質量の銀河ほど宇宙の初期に成長したという描像)に従うと、現在形成途上の銀河があるとすれば極めて小質量の銀河であるはずで、そのような暗い銀河は大口径望遠鏡で丹念に探索しないと見つからない。(2) 銀河の進化最初期には系に含まれる物質の大部分がまだ星になっておらず、ほとんどがガスとして存在するため、星からの連続波を主に捉える通常の観測(広帯域撮像観測)では見落とされてしまう。そこで本研究では、このガス成分が放射する輝線スペクトルに注目し、可視光・赤外線・

サブミリ波といった様々な波長帯域における撮像観測(特にガス成分を効率よく捉えるための狭帯域撮像観測)および分光観測を駆使し、特に化学進化の観点から進化の最初期にある銀河を探索することを目的とした。また、銀河の化学組成を診断する方法についても従来の手法に捕らわれずに検討を行い、特に厚い塵に覆われた天体であってもその化学組成を精度よく診断できる方法を新たに開発することを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 前述した通り、星から放射される連続波放射に比べガス(具体的には電離ガス)から放射される輝線放射が圧倒的に卓越している銀河に注目することで、進化の最初期にある銀河を探ることが可能になると考えられる。そこで、効率的に輝線放射天体を探索することができる広視野狭帯域撮像観測の手法を用いて非常に暗い輝線天体を系統的に調査し、選択した輝線天体に対して大口径望遠鏡を用いて系統的な可視分光観測を遂行する。そうして得られた可視光スペクトルの輝線強度比から、重元素量を測定する。重元素量が非常に少ない銀河を見つけることができれば、化学的な観点で進化の最初期にある銀河を特定したことになる。

(2) 銀河と巨大ブラックホールの共進化に対して化学進化の観点から新たな知見を得るために、活動的な巨大ブラックホールにより激しいエネルギー放射を示す活動銀河核に着目し、いくつかの種類の活動銀河核に対して系統的に静止系紫外スペクトルの調査を行うことで重元素量測定を進める。特に、現在の宇宙における活動銀河核の重元素量測定は、紫外スペクトルを地上望遠鏡により観測することが不可能であるためにこれまでほとんど行われていなかった。そこで本研究では、ハッブル宇宙望遠鏡などいくつかの宇宙望遠鏡による紫外線分光観測で得られた紫外スペクトルを使用し、現在の宇宙における活動銀河核(すなわち、近傍宇宙における活動銀河核)の重元素量測定を系統的に進める。また比較のため、遠方宇宙における活動銀河核の重元素量測定も平行して行い、活動銀河核の宇宙論的・化学進化についても新たな知見を得る。

(3) 可視光では観測が困難な、厚い塵に覆われた銀河についても化学進化を調査するため、赤外線やサブミリ波といった塵の影響を受けにくい波長帯での分光観測を行う。この波長帯で強い輝線を放射する天体のサンプルを構築し、それらの性質を調査すると共に、赤外線・サブミリ波領域での化学組成診断方法について新たな方法を開発する。

## 4. 研究成果

(1) すばるディープフィールドと呼ばれる新

宇宙探査領域に着目し、輝線を強く放射する銀河に対して系統的な分光観測を実施した結果、3シグマ以上の信頼度で[OIII]4363(2階電離酸素が波長4363オングストロームで放射する輝線)を示す天体を20天体見つけることができた。これら20天体の赤方偏移は0.07から0.88であり、これは宇宙年齢にすると64億歳から128億歳(現在から10億年から74億年前の宇宙)という概ね現在に近い宇宙に相当する。可視光スペクトルを更に詳細に調査することで、これら20天体のうちいくつかは活動銀河核であることが分かったが、大部分は重元素量が $12+\log(\text{O}/\text{H}) < 7.65$ という重元素量が非常に少ない銀河であることが分かった。特に、発見された銀河の中で最も重元素量の低い天体は $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 7.24$ と、これまで知られている最も重元素量が低い銀河に匹敵し得るほどに重元素量が低いことが分かった。この発見の確からしさを調査するため、電離ガスの重元素量と電離源である星の重元素量をコンシステントに連動させた光電離モデル計算を行ってスペクトル中の輝線強度比について解析を進めたが、見つかった天体の重元素量が非常に低いという結論はゆるがないことが分かり、化学進化の非常に若い段階にある銀河が現在の宇宙にも散見されることを示すことができた。

(2) 現在の宇宙における巨大ブラックホール天体がどのような化学進化段階にあるかを系統的に調査するために適切なサンプルと思われるPGキューサーと呼ばれる活動銀河核に注目し、ソウル国立大学のJonghak Woo氏らと協力してハッブル宇宙望遠鏡などにより取得された紫外線スペクトルの解析を進めた。この解析から、過去の宇宙と現在の宇宙ではキューサーの化学組成の巨大ブラックホール質量および質量降着率への依存性が系統的に異なることが明らかになり、その解釈として過去の宇宙と現在の宇宙では巨大ブラックホールの活動性の発現メカニズムが違っているのではないかというシナリオが示唆された。具体的には、遠方宇宙におけるキューサーでは母銀河におけるガス質量の星質量に対する割合が近傍宇宙における低光度活動銀河核における値よりも顕著に高いため、銀河合体に伴う星形成と巨大ブラックホールへの質量流入が同時かつ大規模に起きる一方、近傍宇宙では銀河合体が生じても大規模な星形成や巨大ブラックホールへの質量流入の効率が低く、この差異が化学組成の統計的性質にも反映しているというシナリオで観測事実が整合的に説明できることを明らかにした。

(3) サブミリ波領域で最も強い輝線放射である[CII]158(1階電離炭素が波長158ミクロンで放射する輝線)に注目し、この[CII]を強く放射する天体を系統的に探査した。APEX望

遠鏡などによる観測により、遠方宇宙において[CII]を強く放射する天体を数天体発見することができた。これらの天体の中から特に[CII]を強く放射する一つの銀河(赤方偏移 $z=4.76$ )に対し、アルマ望遠鏡により他のイオンが放射する輝線を観測することで複数の輝線の強度比を測定し、光電離モデル計算の結果と比較することで、遠方宇宙における大質量銀河が既に化学進化の観点では初期ではない段階に到達していることを明らかにした。この銀河のある赤方偏移 $z=4.76$ は宇宙年齢に換算すると12億歳程度と、現在の宇宙年齢の10%未満という初期宇宙に相当するにも関わらず、このように化学進化の進んだ銀河が既に存在していたことが明らかになったのは特筆すべきことである。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計20件)

C. De Breuck, R. Williams, M. Swinbank, P. Caselli, K. Coppin, T. Davis, R. Maiolino, T. Nagao, I. Smail, F. Walter, A. Weiss, and M. Zwaan; "ALMA resolves turbulent, rotating [CII] emission in a young starburst galaxy at  $z=4.8$ ", *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 565, 2014, id.A59

DOI: 10.1051/0004-6361/201323331

P. Troncoso, R. Maiolino, V. Sommariva, G. Cresci, F. Mannucci, A. Marconi, M. Meneghetti, A. Grazian, A. Cimatti, A. Fontana, T. Nagao, and L. Pentericci; "Metallicity evolution, metallicity gradients, and gas fraction at  $z\sim 3.4$ ", *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 563, 2014, id.A58

DOI: 10.1051/0004-6361/201322099

C. Ly, M. Malkan, T. Nagao, N. Kashikawa, K. Shimasaku, and M. Hayashi; "Direct gas-phase metallicities, stellar properties, and local environments of emission-line galaxies at redshifts below 0.90", *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 780, 2014, id.122

DOI: 10.1088/0004-637X/780/2/122

S. Carniani, A. Marconi, A. Biggs, G. Cresci, V. D'Odorico, E. Humphreys, R. Maiolino, P. Molaro, T. Nagao, L. Testi, and M. Zwaan; "Strongly star-forming rotating disks in a complex merging system at  $z=4.7$  as revealed by ALMA", *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 559, 2013, id.A29

DOI: 10.1051/0004-6361/201322320

J. Shin, J. Woo, T. Nagao, and S. Kim;

“The chemical properties of low-redshift QSOs”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 763, 2013, id.58  
DOI: 10.1088/0004-637X/763/1/58  
T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, B. Hatsukade, and K. Saigo; “FIR-Submm metallicity diagnostics for high- $z$  galaxies”, *ASP Conference Series*, 査読無, Volume 476, 2013, 29  
<http://ads.nao.ac.jp/abs/2013ASPC..476...29N>  
D. Son, J. Woo, S. Kim, H. Fu, N. Kawakatu, V. Bennert, T. Nagao, and D. Park; “Accretion properties of high- and low-excitation young radio galaxies”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 757, 2012, id.140  
DOI: 10.1088/0004-637X/757/2/140  
C. Ly, M. Malkan, N. Kashikawa, M. Hayashi, T. Nagao, K. Shimasaku, K. Ohta, and N. Ross; “The stellar population and star-formation rates of  $z=1.5-1.6$  [OII]-emitting galaxies selected from narrow-band emission-line surveys”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 757, 2012, id.63  
DOI: 10.1088/0004-637X/757/1/63  
N. Araki, T. Nagao, K. Matsuoka, A. Marconi, R. Maiolino, H. Ikeda, T. Hashimoto, Y. Taniguchi, and T. Murayama; “Near-infrared spectroscopy of a nitrogen-loud quasar SDSS J1707+6443”, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 543, 2012, id.A143  
DOI: 10.1051/0004-6361/201118477  
S. Gallerani, R. Neri, R. Maiolino, S. Martin, C. De Breuck, F. Walter, P. Caselli, M. Krips, M. Meneghetti, T. Nagao, J. Wagg, and M. Walmsley; “Resolved [CII] emission in a lensed quasar at  $z=4.44$ ”, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 543, 2012, id.A114  
DOI: 10.1051/0004-6361/201118705  
T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, B. Hatsukade, and K. Saigo; “ALMA reveals a chemically evolved submillimeter galaxy at  $z=4.76$ ”, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 542, 2012, id.L34  
DOI: 10.1051/0004-6361/201219518  
Y. Ideue, Y. Taniguchi, T. Nagao, Y. Shioya, M. Kajisawa, J. Trump, D. Vergani, A. Iovino, A. Koekemoer, O. Le Fevre, O. Ilbert, and N. Scoville; “The role of galaxy interaction in environmental dependence of the star-formation activity at  $z=1.2$ ”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume

747, 2012, id.42  
DOI: 10.1088/0004-637X/747/1/42  
V. Sommariva, F. Mannucci, G. Cresci, R. Maiolino, A. Marconi, T. Nagao, A. Baroni, and A. Grazian; “Stellar metallicity of star-forming galaxies at  $z\sim 3$ ”, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 539, 2012, id.A136  
DOI: 10.1051/0004-6361/201118134  
T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, B. Hatsukade, and K. Saigo; “Chemical properties of a high- $z$  dusty star-forming galaxy from ALMA cycle 0 observations”, *ESO Messenger*, 査読無, Volume 149, 2012, 44  
<http://ads.nao.ac.jp/abs/2012Msngr.149...44N>  
L. Jiang, E. Egami, N. Kashikawa, G. Walth, Y. Matsuda, K. Shimasaku, T. Nagao, K. Ota, and M. Ouchi; “Keck spectroscopy of Lyman-break galaxies and its implications for the UV-continuum and Ly luminosity functions at  $z>6$ ”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 743, 2011, id.65  
DOI: 10.1088/0004-637X/743/1/65  
K. Matsuoka, T. Nagao, R. Maiolino, A. Marconi, and Y. Taniguchi; “Chemical properties of the most distant radio galaxy”, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 532, 2011, id.L10  
DOI: 10.1051/0004-6361/201117641  
C. Ly, M. Malkan, M. Hayashi, K. Motohara, N. Kashikawa, K. Shimasaku, T. Nagao, and C. Grady; “A census of star-forming galaxies at  $z=1-3$  in the Subaru Deep Field”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 735, 2011, id.91  
DOI: 10.1088/0004-637X/735/2/91  
N. Kashikawa, K. Shimasaku, Y. Matsuda, E. Egami, K. Jiang, T. Nagao, M. Ouchi, M. Malkan, T. Hattori, K. Ota, Y. Taniguchi, S. Okamura, C. Ly, M. Iye, H. Furusawa, Y. Shioya, T. Shibuya, Y. Ishizaki, and J. Toshikawa; “Completing the census of Ly emitters at the reionization epoch”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 734, 2011, id.119  
DOI: 10.1088/0004-637X/734/2/119  
C. De Breuck, R. Maiolino, P. Caselli, K. Coppin, S. Halley-Dunsheath, and T. Nagao; “Enhanced [CII] emission in a  $z=4.76$  sub-millimeter galaxy”, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 530, 2011, id.L8  
DOI: 10.1051/0004-6361/201116868  
A. Gnerucci, A. Marconi, G. Cresci, R. Maiolino, F. Mannucci, F. Calura, A.

Cimatti, F. Cocchaia, A. Grazian, F. Matteucci, T. Nagao, L. Pozzetti, and P. Troncoso; “Dynamical properties of AMAZE and LSD galaxies from gas kinematics and the Tully-Fisher relation at  $z \sim 3$ ”, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Volume 528, 2011, id.A88  
DOI: 10.1051/0004-6361/201015465

[学会発表](計20件)

T. Nagao; “Extragalactic studies with ALMA archival data [INVITED]”, 日本天文学会 2014 年春期年会 ALMA 特別セッション, 2014 年 3 月 19 日, 国際基督教大学

T. Nagao; “Observational studies on super-massive black holes: Recent hot topics and the next steps [INVITED]”, 初代星初代銀河研究会, 2014 年 1 月 24 日, 鹿児島大学

T. Nagao; “Synergy between Subaru and large surveys in 2020’s: The case for high- $z$  AGN/SMBH [INVITED]”, 研究会“2020 年代の銀河サーベイ計画とすばる望遠鏡のシナジー”, 2014 年 1 月 11 日, 国立天文台三鷹

T. Nagao; “Chemical evolution of AGNs: from optical/NIR to FIR/Submm”, 研究会“SMBH-REC kick-off meeting 2013”, 2013 年 9 月 16 日, 愛媛大学

T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, A. Marconi, K. Matsuoka, B. Hatsukade, and P. Caselli; “Sub-mm view of high- $z$  AGN hosts: their chemical evolution”, 国際研究会“East-Asia AGN Workshop 2013”, 2013 年 8 月 21 日, 北海道札幌市

T. Nagao; “高赤方偏移活動銀河核の広帯域近赤外分光観測 [INVITED]”, 研究会“TAO/SWIMS Science Workshop 2013”, 2013 年 8 月 5 日, 東京大学

T. Nagao; “AGN Sciences: from Subaru to TMT [INVITED]”, 国際研究会“Thirty Meter Telescope Science Forum”, 2013 年 7 月 22 日, Waikoloa, Hawaii (USA)

T. Nagao, R. Maiolino, A. Marconi, and K. Matsuoka; “Chemical properties of active galactic nuclei [INVITED]”, 国際研究会“Seeking the leading actor on the cosmic stage”, 2013 年 6 月 24 日, Castellammare del Golfo, Sicily (Italy)

T. Nagao, S. Oyabu, H. Inami, and T. Wada; “Probing the evolution of the physical and chemical properties of star-forming galaxies using SPICA/MCS”, 国際研究会“From exoplanets to distant galaxies: SPICA’s new window on the cool Universe”, 2013 年 6 月 18 日, 東京大学

T. Nagao; “銀河の遠赤外線スペクトルに

おける微細構造輝線 [INVITED]”, 研究会“ALMA ミリ波サブミリ波観測で押さえる銀河の基本観測量とその理解”, 2013 年 2 月 25 日, 国立天文台三鷹

T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, B. Hatsukade, and K. Saigo; “ALMA studies on the galaxy chemical evolution in the high- $z$  universe [INVITED]”, 研究会“ALMA 時代の宇宙の構造形成理論: 第 1 世代から第  $n$  世代へ”, 2013 年 1 月 26 日, 北海道大学

T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, B. Hatsukade, and K. Saigo; “ALMA reveals a chemically evolved sub-millimeter galaxy at  $z=4.76$ ”, 国際研究会“First year of ALMA sciences”, 2012 年 12 月 12 日, Puerto Varas (Chile)

T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, B. Hatsukade, and K. Saigo; “FIR-Submm metallicity diagnostics for high- $z$  galaxies”, 国際研究会“New trends in radio astronomy in the ALMA era: The 30th anniversary of Nobeyama Radio Observatory”, 2012 年 12 月 3 日, 神奈川県箱根町

T. Nagao; “すばる望遠鏡による活動銀河核探査の現状と今後 [INVITED]”, 研究会“銀河中心超巨大ブラックホールの起源”, 2012 年 7 月 26 日, 筑波大学

T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, A. Marconi, B. Hatsukade, K. Saigo, and H. Matsuhara; “FIR-Submm metallicity diagnostics for high- $z$  galaxies”, 国際研究会“European week of astronomy and space science: Symposium 1: Molecular gas in high- $z$  galaxies”, 2012 年 7 月 2 日, Pontificia Universita Lateranense, Rome (Italy)

T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, A. Marconi, B. Hatsukade, K. Saigo, and H. Matsuhara; “Metallicity diagnostics with fine-structure emission lines [INVITED]”, 国際研究会“Metals in Tuscany 2012”, 2012 年 6 月 18 日, Abbazia di Spineto, Sarteano (Italy)

T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, B. Hatsukade, and K. Saigo; “ALMA reveals a chemically enriched submillimeter galaxy at  $z=4.76$  [INVITED]”, 研究会“ALMA high- $z$  workshop”, 2012 年 6 月 12 日, 国立天文台三鷹

T. Nagao, and N. Tominaga; “Gas-phase Ne and Ar abundance ratio in star-forming galaxies”, 日本天文学会 2011 年秋期年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学

T. Nagao, R. Maiolino, A. Marconi, K. Matsuoka, and N. Araki; “Metallicity evolution of active galactic nuclei”, 国際

研究会 “Starburst-AGN connection under the multiwavelength limelight”, 2011 年 9 月 16 日, European Space Agency, Madrid (Spain)  
T. Nagao; “AO sciences on active galactic nuclei [INVITED]”, 研究会 “Subaru next-generation AO workshop”, 2011 年 9 月 9 日, 大阪大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長尾 透 (NAGAO, Tohru)  
愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授  
研究者番号: 00508450

### (2) 研究分担者

川勝 望 (KAWAKATSU, Nozomu)  
呉工業高等専門学校・自然科学系分野・准教授  
研究者番号: 30450183