

氏 名 濟藤 祐理子

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1871 号

学位授与の日付 平成28年9月28日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Investigation of the Coevolution between Supermassive  
Blackholes and Galaxies at Redshift 3 through Subaru  
Near-Infrared Observations

論文審査委員 主 査 准教授 岩田 生  
教授 本間 希樹  
准教授 兒玉 忠恭  
教授 太田 耕司 京都大学  
准教授 榎 基宏 東京経済大学

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

現在、銀河の spheroid 成分(楕円銀河や銀河のバルジ成分に相当)の中心にはほぼ普遍的に超巨大ブラックホールが存在していると考えられている。さらに近傍宇宙では、銀河の spheroid 成分の質量 ( $M_{\text{spheroid}}$ ) と中心の超巨大ブラックホールの質量 ( $M_{\text{BH}}$ ) に比例関係があることが観測的に明らかになっており ( $M_{\text{BH}}/M_{\text{spheroid}} \sim 0.0015$ )、この関係をマゴリアン関係と呼んでいる。この観測結果は、銀河とブラックホールが互いに何らかの影響を及ぼし合いながら共進化してきたことを示唆している。銀河と中心の超巨大ブラックホールの形成過程を明らかにするためには、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{spheroid}}$  の赤方偏移進化を、現在から遠方宇宙にさかのぼって調べる事が重要であるが、未だ観測的に未解明の課題となっている。一方で、理論分野からはこの関係を説明する理論が複数提唱されており、それぞれのモデルにおいてマゴリアン関係の背後に潜む物理メカニズムが異なっている。その結果、モデルによって異なる  $M_{\text{BH}}/M_{\text{spheroid}}$  比の赤方偏移進化が予想されており、その違いは高赤方偏移ほど顕著になる。そこで本研究では、遠方銀河の  $M_{\text{BH}}$  と  $M_{\text{spheroid}}$  をそれぞれ観測から独立に導出し、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{spheroid}}$  の赤方偏移進化を観測的に明らかにすることで、これらのモデルを区別し、マゴリアン関係の背後に潜む物理に関して強い制限を加えることを目的としている。高赤方偏移ほどモデルを明確に区別しやすくなる一方で、銀河表面輝度の  $(1+z)^4$  dimming により、 $z > 4$  では母銀河の観測が困難となる。したがって、本研究では  $z \sim 3$  のクエーサー(活動銀河核 (AGN) の中でも特に明るい種族) をターゲットとした。

$M_{\text{BH}}$  の導出は、近赤外分光観測でブラックホール周辺から放射される H $\beta$  輝線と AGN の連続光を観測し、輝線幅 (FWHM) と連続光光度  $L_{5100\text{\AA}}$  から  $M_{\text{BH}}$  を導出する。これまでの先行研究では CIV や MgII といった輝線が用いられてきたが、これらはブラックホールの重力以外の運動成分の影響を大きく受けている可能性が指摘されていたり (CIV)、近傍の観測結果で十分較正されていない (MgII) という問題が存在する。それに対し H $\beta$  輝線はこれらの不定性がはるかに小さく、近傍の観測によって十分に較正されているため、最も良い  $M_{\text{BH}}$  の指標となる。我々は日本のすばる望遠鏡や 4m 級のその他の望遠鏡を用いて、 $z \sim 3$  のクエーサー 37 天体の近赤外線分光観測を行い、そのうち 28 天体について  $M_{\text{BH}}$  を導出することに成功した (Saito et al. 2016, PASJ, 68, 1)。

一方、 $M_{\text{spheroid}}$  は、補償光学 (AO) を用いた近赤外の 2 色 (J (1.2 $\mu\text{m}$ ), K' band (2.2 $\mu\text{m}$ )) 撮像観測より銀河の color を求め、color と M/L 比の相関関係を用いて M/L 比を精度良く決定し、spheroid 成分の光度 ( $L_{\text{spheroid}}$ ) から  $M_{\text{spheroid}}$  を見積もる手法をとる。クエーサー母銀河の研究をするためには、中心からの AGN 放射の寄与を十分な精度で差し引かなければならない。そのためには高空間分解能の撮像観測が必要であり、その点で AO が重要な役割を果たす。通常 AO を使わない観測では、seeing size が K' band で 0.4" - 0.5" 程度の像が得られる。 $z \sim 3$  では 1" がおよそ 8kpc に相当するので、大きさが数 kpc の銀河について議論をする際には少なくとも  $< 2\text{kpc} \sim 0.25''$  程度の分解能が必要となり、通常観測では要求される分解能を達成できない。しかし、AO を使うことによって K' band で 0.1" - 0.2" の分解能を達成することが可能となる。また、これまでの先行研究の多くでは、単色の撮像観測から M/L 比を仮定し  $M_{\text{spheroid}}$  を見積もる手法がとられていたが、この方法では M/L の不定性が非常に大きく、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{spheroid}}$  比の赤方偏

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

進化の議論を難しくする要因となっていた。2色撮像は時間がかかるが、M/L比を精度よく導出するため、我々はこの手法を採用した。これまでに、すばる望遠鏡/IRCS+AO188を用いた近赤外撮像観測を行い、我々の分光観測から $M_{BH}$ が求まっている28天体のキューサーのうち、9天体の撮像データを取得した。

さらに、我々のターゲットであるキューサーは、銀河中心核の明るい放射(AGN成分)が周囲の母銀河の放射に重なっているため、キューサー母銀河の質量を精度良く見積もることは非常に難しい課題である。この問題を解決するため、我々は独自の解析手法を確立した。AGN成分と母銀河を二次元のfittingによって分解する際に、AGNをGaussian(AOで補正されるコア成分)+ Moffat(AOで補正しきれない、seeing sizeに広がった成分)の2成分、銀河をSersicの1成分の、合計3成分でfittingする。その際、MoffatとSersicの両者は共に空間的に広がっており、等級の切り分けが困難であった。そこで我々の手法では、まずキューサーと同視野内にあるPSF参照星のfitting結果を用いてPSF参照星のストレール比を見積もり、さらに距離とストレール比の関係からキューサーの位置でのストレール比を見積もった。そのストレール比を用いてキューサーのMoffat成分の等級に制限を与えることができるため、Moffatの等級に制限をつけてfittingを行い、最終的な母銀河の明るさ(Sersic成分)を精度良く決定した。

上記の手法を用いて、 $z\sim 3$ のキューサー28天体について $M_{BH}$ を導出、そのうち9天体について $M_{spheroid}$ を導出し、さらに両者の結果を合わせて $M_{BH}/M_{spheroid}$ を計算した。その結果、近傍宇宙で明らかになっている比例関係 $M_{BH}/M_{spheroid}\sim 0.0015$ に比べ、 $z\sim 3$ では大きい値を得た( $M_{BH}/M_{spheroid}(\text{median})\sim 0.046$ )。この結果は、AGNアウトフローによりブラックホールの成長が抑制されることによって  $M_{BH}/M_{spheroid}$ 比が進化する( $M_{BH}/M_{spheroid}\propto (1+z)^{1.5}$ )というモデルか、もしくは銀河衝突による星形成に加え、diskが破壊されてdiskの星がバルジの星になる効果により、ブラックホールに比べて銀河の成長が後から増進されるため、 $M_{BH}/M_{spheroid}$ 比は緩やかに進化する( $M_{BH}/M_{spheroid}\propto (1+z)^{1.1}$ )というモデルをサポートする結果となった。我々のサンプルの $M_{BH}$ はすべて、近傍の結果でよく較正されているH $\beta$ 輝線から導出されており、また、セレクションバイアスによって生じる $M_{BH}/M_{spheroid}$ の進化を避けるため、サンプルの明るさに制限をかけている。上記のような点から、本研究では、高赤方偏移でより正確な $M_{BH}/M_{spheroid}$ を導出することに成功した。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

近傍宇宙においては、銀河の中心に存在する超巨大ブラックホールの質量 ( $M_{\text{BH}}$ ) と、銀河の丸い成分の質量 ( $M_{\text{Sph}}$ ) との間に強い相関があることが知られている。これは、銀河と超巨大ブラックホールが共進化の関係にあることを示唆しており、この関係の起源を理解することは、銀河形成進化の研究のみならず活動銀河核と超巨大ブラックホールの宇宙論的進化の研究における主要な課題の一つである。遠方宇宙での  $M_{\text{BH}}/M_{\text{Sph}}$  比を測り、この比の時間進化を調べることは、この関係の起源を突き止める上で重要である。本論文は、赤方偏移3付近にあるクェーサーの  $M_{\text{BH}}/M_{\text{Sph}}$  を統計的に調べ、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{Sph}}$  の進化を観測的に明らかにすることを目指したものである。

本論文では、SDSSのクェーサーカタログから、赤方偏移3.11から3.50の範囲であること、 $r'$  等級が18.5等から19等の範囲であること、電波で暗いこと、などの条件を課して約120個のサンプルを抽出した。まずそのうちのランダムに選ばれた37天体について、すばる望遠鏡IRCS、IRTF望遠鏡SpeXなどを用いた近赤外線分光観測を行った。 $H\beta$  輝線幅と近傍のクェーサーで知られている広輝線領域のサイズと連続光光度の関係を用いて、この37天体中28天体について  $M_{\text{BH}}$  を決定することに成功した。本研究によって、赤方偏移3以上のクェーサーのうち  $M_{\text{BH}}$  が測定されているものの数は約3倍にも増加した。 $M_{\text{BH}}$  が測定された天体について、 $M_{\text{BH}}$  を質量降着率で割ることで超巨大ブラックホールの成長時間を見積もると、多くの場合宇宙年齢よりも短くなり、これらのクェーサーが活発に成長する段階であることが示唆された。また、従来の遠方クェーサーの  $M_{\text{BH}}$  は、 $H\beta$  ではなく可視光で観測できるCIVの輝線幅を用いて測定されることが多かったが、CIV輝線は、アウトフローなどにより、非対称なプロファイルを示すことが多く、かつ超巨大ブラックホールの重力に支配されたものの以外のガスの運動による影響が示唆されている。このため本論文ではより信頼性の高い指標として  $H\beta$  輝線幅を用いている。実際、本研究結果でも、CIV輝線幅から推定される  $M_{\text{BH}}$  と  $H\beta$  から推定される  $M_{\text{BH}}$  には強い相関が見られないことが示された。この部分については申請者が主著者の査読論文として既に出版されている (Saito et al. 2016, PASJ 68, 1)。

申請者はさらに、クェーサー母銀河の丸い成分の質量を求めるために、近赤外線撮像観測をサンプルのうち9天体について行った。クェーサーの母銀河を観測するためには、明るく輝く中心核成分を適切に取り除く必要がある。申請者は補償光学(AO)を用いることで、赤方偏移3付近にあるクェーサーの母銀河成分を近赤外線(クェーサー静止系で可視光)で撮像する手法を採用した。また、 $M_{\text{Sph}}$  を撮像観測から求めるためには、質量/光度比(M/L比)を仮定する必要がある。従来のクェーサー母銀河の研究でよく行われた単色での撮像ではM/L比に大きな不定性が生じてしまうが、本論文ではJ-band,  $K'$ -bandというクェーサー静止系で4000オングストロームを挟み込む2つの波長域で撮像を行い、その色を使ってM/L比を推定することで、より精度よく質量を求めるという手法を採った。母銀河成分を抽出する解析においては、中心核をAOで補正された成分と補正されず残っている大気揺らぎ成分の二つの成分に分け、AO参照星からの距離に応じた比で合成することで、銀河成分を含めた最適な輝度分布パラメータを探す独自の手法を開発し、適用した。この詳細な

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

解析によって、 $M_{\text{Sph}}$  を測定し、分光観測による  $M_{\text{BH}}$  とあわせて、赤方偏移 3 付近における  $M_{\text{BH}}/M_{\text{Sph}}$  比を導出した。9 天体の  $M_{\text{BH}}/M_{\text{Sph}}$  の中央値は 0.046 で、近傍宇宙での値 0.0015 に比べ大きな値となっており、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{Sph}}$  が赤方偏移によって進化することを示唆する結果となった。

先行研究によって、 $M_{\text{BH}}/M_{\text{Sph}}$  の測定は、サンプルの選択におけるバイアスの影響を受けることが指摘されている。本論文では複数のバイアスの影響を評価した上で、観測された結果は、これらのバイアスの影響では説明できない程度に  $M_{\text{BH}}/M_{\text{Sph}}$  が大きく、この比の時間進化が実際に起こっていることを示唆していると結論づけている。

本論文は近赤外線分光観測によってこれまで少数の観測しかされていなかった赤方偏移 3 以遠の  $M_{\text{BH}}$  の高い精度での測定を 28 天体について行った上で、A0 を用いた近赤外線撮像観測によって、赤方偏移 3 以遠 ( $z \sim 3.3$ ) での  $M_{\text{BH}}/M_{\text{Sph}}$  の系統的な測定を初めて精度良く行ったものである。上述したように、分光・撮像観測、解析の手法に従来の研究に比べて大いに優れた点があり、導出された  $M_{\text{BH}}$ 、 $M_{\text{Sph}}$  の信頼性が高いという特徴がある。活動銀河核の研究、および銀河形成進化の研究において非常に高い学術的価値をもつ観測的研究である。申請者は観測からデータ解析、考察・議論に至るまで、本研究において主体的な役割を果たしている。よって審査委員会は全員一致で、本論文が博士論文に値するものであることを認め、合格であると判断した。