

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540237

研究課題名（和文） 銀河系中心核「いて座 A\*」への質量供給過程とその進化に関する観測的研究

研究課題名（英文） Observational Study of the Galactic Nuclues Sgr A\*: Mass Accretion and Evolution

研究代表者

岡 朋治 (OKA TOMOHARU)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：10291056

## 研究成果の概要：

本研究の目的は、我々が住むこの「銀河系」の中心領域について多波長観測データを総合する事により、銀河中心核活動性の正に中核である巨大ブラックホールの形成・成長過程と、少なくとも十数桁にも渡る中心核活動性の多様性の起源を解明する事である。その結果、同領域の分子雲中に深く埋もれた巨大星団を多数検出し、これらが中心核巨大ブラックホールの形成・成長を担う「中間質量ブラックホール」の母胎となる可能性を指摘した。また中心核近傍には、直径約 10 パーセクの巨大な回転ガス円盤の存在を初めて確認し、現在不活性な銀河系中心核が数十万年以内に間違いなく「活動的な」銀河系中心核へと変遷する事を示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：電波天文学、光学赤外線天文学、X線γ線天文学

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 銀河系中心核活動性と巨大ブラックホール

クエーサーやセイファート銀河に代表される活動銀河系中心核と呼ばれる天体からの強烈な放射が、中心にある数百万～数百億太陽質量もの巨大ブラックホールへの質量降着に伴う重力エネルギー解放に起因することは、理論・観測双方から十分に確立された描像である。そのような巨大ブラックホールは多くの、おそらく大部分の銀河系中心に存在す

ることが、最近の研究から明らかになってきた。しかしながら中心核の光度は、エディントン限界光度<sup>1</sup>に近いものから極めて暗いものまで、少なくとも十数桁以上に渡り、その多様性の起源は明らかでない。

従来、宇宙には2種類のブラックホールがあることが知られていた。一つは恒星の進化

<sup>1</sup>ある質量を持った天体が、安定に放射する事の出来る最大光度。重力と輻射圧のバランスによって決定され、限界光度は質量に比例する。

の果てに形成される恒星質量ブラックホール、そしてもう一つが銀河中心核の巨大ブラックホールである。この巨大ブラックホールの形成に関して 1990 年代には、銀河形成以前に既に形成されていたとする説と、銀河形成期に形成されたとする説があった。しかしながら 2001 年、スターバースト銀河 M82 内に中間的な質量のブラックホールが発見されたことにより、この分野は新たな局面を迎える事となった。即ち、爆発的な星形成活動によって生まれた星団の中で中質量ブラックホールが誕生し、それらが星団に抱かれつつ銀河中心に落下し、互いに合体することで巨大ブラックホールへと成長するという新説が提案され、俄に脚光を浴びる事になった。

(2) 我々の「銀河系」の中心核「いて座 A\*」  
我々の銀河系の中心核は、コンパクトな電波源「いて座 A\*」として認識される。「いて座 A\*」は中心核星団と呼ばれる巨大な星の集団のほぼ中心に位置し、近傍の星の軌道解析からここにも 370 万太陽質量の巨大ブラックホールがある事が分かっている。しかしながらその活動性は、時折フレア・アップを見せるものの、エディントン限界光度の数億分の一と極めて暗く、低光度 AGN でも極めて暗い部類に属する。中心核星団では 3-7 百万年前に爆発的な星形成が起きた形跡がある。しかしながら、中心核近傍の強力な潮汐力の元で、そのような活発な星形成が行われた事は考えにくく、外側で誕生した星団が中心核近傍に落下してきたとの見方が優勢である。さらに、中心核星団中の副星団 IRS13E 中には、千-3 千太陽質量の中質量ブラックホールの存在が示唆されている。つまり我々の銀河系中心核は、その近隣性のみならず、多様な中心核活動性の理解と、中質量ブラックホールの合体による中心核形成・進化の検証という意味においても、極めて重要なターゲットである。

## 2. 研究の目的

### (1) 本研究代表者らによる発見

銀河系構造の一部として中心部分を見た場合、そこは星の強い集中と大量の星間物質で特徴付けられる、銀河系内で最も特異な領域と見ることができる。中心核から数百パーセクの領域は銀河中心分子層 (Central Molecular Zone; CMZ) と呼ばれ、高温かつ高密度の分子ガス雲が広がっている。本研究代表者のグループでは、CMZ に対する一酸化炭素分子 (CO) 回転遷移輝線の広域サーベイ観測を展開してきた。その結果から、中心核近傍にこれまで知られていなかった直径約 10 パーセクの比較的大きな核周円盤 (Large Nuclear Disk; LND) が発見された。この LND は、既に認識されていた半径 2 パーセクの核

周円盤を内包し、明瞭な落下運動を示していた。つまり、この LND の存在は、将来の銀河系中心核の活動性を予測する上で極めて重要な情報を含んでおり、早急に詳細な物理量の評価が望まれる。それに加えて、空間的にコンパクトで極めて速度幅の広い分子雲「高速度コンパクト雲」を、CMZ 全域に約 60 個発見した。これらの高速度コンパクト雲は一般に莫大な運動エネルギーを有し、短期間に複数の超新星爆発によって加速されたものと考えられる。つまり各々の高速度コンパクト雲には、大質量かつコンパクトな星団が付随している事になり、これらが中間質量ブラックホールの母胎となる可能性が考えられた。

### (2) 本研究課題の目的

このような経緯から、我々の銀河系中心核「いて座 A\*」とそれを含む CMZ 全体に対して、電波から X 線に至る観測データを取得・解析・総合することにより、銀河系中心核の活動性とその進化に関する普遍的描像に迫る事を計画した。研究期間内に明らかにしようとした事は、特に以下の二点に集約される。

#### ① 銀河系中心核「いて座 A\*」への質量降着過程の把握

CMZ 内の分子ガスの分布・運動をその物理状態・化学組成とともに詳細におさえ、銀河系中心核「いて座 A\*」への質量降着過程を 0.1 pc から数百 pc の 3 桁以上に渉る空間ダイナミックレンジで把握する。これによって、銀河円盤から中心核へのガス供給プロセスの妥当性を検討し、銀河系中心核「いて座 A\*」の過去から未来の活動性に関する知見を得る。

#### ② 高速度コンパクト雲に付随する星団と中質量ブラックホールの探査

高速度コンパクト雲に付随する星団の系統的探査を行うとともに、星団内の中質量ブラックホールの探査を行い、それらが将来「いて座 A\*」へと沈降していく可能性を検討する。これから、爆発的な星形成で誕生した中質量ブラックホールが合体することによって巨大ブラックホールが形成されるというシナリオの妥当性を検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 野辺山 45m 望遠鏡によるミリ波分子輝線広域サーベイ観測

現在ミリ波の単一鏡で世界最高の分解能を誇る国立天文台野辺山 (NRO) 45m 望遠鏡を使用して、一酸化炭素 (CO)、シアン化水素 (HCN)、ホルミルイオン ( $\text{HCO}^+$ )、一酸化珪素 ( $\text{SiO}$ )、ジアジニルイオン ( $\text{N}_2\text{H}^+$ ) 等の分子種のミリ波回転輝線 (100GHz 帯) による、Central Molecular Zone (CMZ) のナイキスト・サンプリング大規模サーベイを行う。CO  $J=1-0$  輝線は星間空間における分子ガスの基本的トレーサであり、電気双極子モーメントの大きい

HCN, HCO<sup>+</sup>分子の回転輝線は高密度ガスの代表的トレーサである。従ってHCN/CO, HCO<sup>+</sup>/CO強度比は、一次近似的には密度の良い指標と言える。また、HCN/HCO<sup>+</sup>強度比はその存在量比を反映し、それは分子雲を照らす硬X線放射強度を反映するとの報告がある。後述のX線観測との比較から、HCN/HCO<sup>+</sup>強度比の中質量ブラックホール探査への有効性を検討する。

#### (2) ASTE 望遠鏡を使用したサブミリ波分子輝線広域サーベイ観測

南米チリのアタカマ砂漠に設置された、Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)を使用し、CO  $J=3-2$  輝線、HCN, HCO<sup>+</sup>分子の  $J=4-3$  輝線 (全て 350 GHz 帯) による、CMZ のナイキスト・サンプリングサーベイを行う。これらの輝線は高回転励起状態の遷移であるため、100 GHz 帯のスペクトル輝線より高温の領域をトレースする。

#### (3) すばる望遠鏡を使用した大質量星団の探査

国立天文台ハワイ観測所すばる望遠鏡を使用して、高速度コンパクト雲方向の大質量星団の探査を行う。観測には近赤外線分光撮像装置(MOIRCS)を使用し、撮像観測のみならず分光観測も行う。銀河系中心領域は、所謂銀河系バルジの内部にあるので、そこで特定の星団を分離するのは容易ではない。ただ、ほとんどの高速度コンパクト雲方向にはHII領域がないことから、これらに付随する星団では既に15太陽質量以上のO型星は死滅しており、B型星が光度の大部分を担っていると考えられる。

#### (4) すざく衛星による中質量ブラックホールの探査

X線天文衛星「すざく」による、高速度コンパクト雲方向のブラックホール探査を行う。一般にブラックホール候補天体は強い硬X線放射を行い、その質量に応じた時間変動を示す事が知られている。故に探査は、空間的対応確認(X線源探査)と時間変動探査の二段階を踏む。銀河系中心領域の観測は、京都大学の小山勝二教授のグループが既に着手しているため、当グループと緊密な連携をとりながら研究を進める。

### 4. 研究成果

#### (1) 「大きな」核周円盤の起源と進化

ミリ波帯からサブミリ波帯に渡る複数の分子回転遷移輝線の観測から、本研究代表者の発見した「大きな」核周円盤(LND)の物理状態と化学組成について詳細な情報を得る事が出来た。<sup>13</sup>CO  $J=1-0$  輝線強度から求められたLNDの質量は約10万太陽質量で、オリオ

ン分子雲のような巨大分子雲一個分に相当する。しかしながら、合成にやや時間のかかるN<sub>2</sub>H<sup>+</sup>分子の放射が見られないことから、LNDは巨大分子雲が落下して来たと言うより、落下してきた原子雲が凝集して分子相へと転換する事によって形成された可能性が高い。またその運動は、110 km/sの回転運動とともに30-60 km/sもの落下運動を示す(図1)。つまり、このLNDは定常的構造ではなく、数十万年以内に銀河系中心核へと落下する運命にある。つまり我々の銀河系中心核「いて座A\*」は、数十万年以内に間違いなく「活動的な」中心核へと変遷する事が示された。

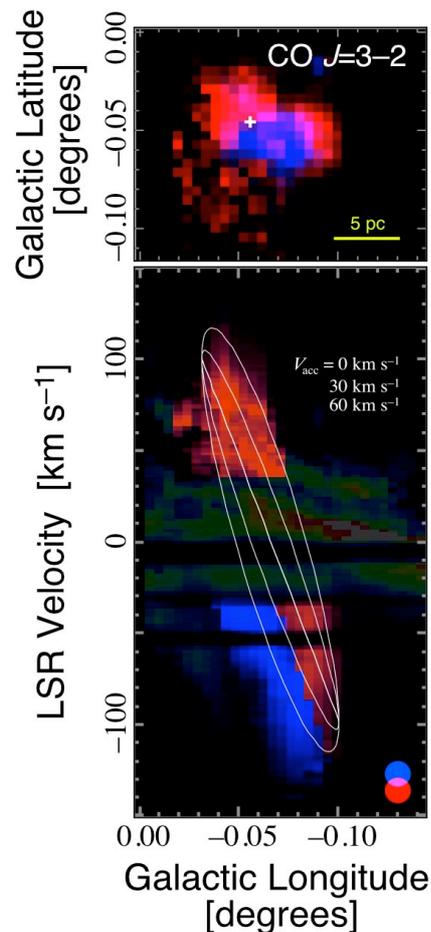


図1) 「大きな」核周円盤のCO  $J=3-2$  輝線銀経-速度図。降着運動を伴う回転リングのモデル曲線(白実線)を重ねた。白十字は「いて座A\*」の位置。

#### (2) 高速度コンパクト雲の起源

分子輝線間の強度比、特に一酸化炭素(CO)の  $J=1-0$  輝線と  $J=3-2$  輝線の強度比の解析から、高速度コンパクト雲の多くは高い励起状態を有する事が示された。この事は、これらが高温・高密度の物理状態を有する事を意味しており、複数の超新星爆発によって加速され

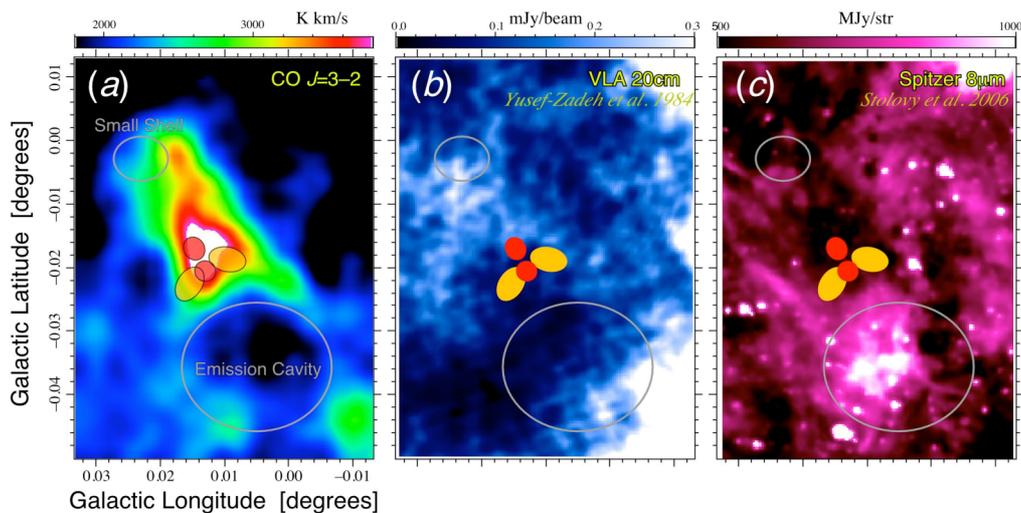


図2) 高速度コンパクト雲 CO 0.02-0.02 の (a) CO  $J=3-2$  輝線積分強度図、(b) 20cm 電波連続波強度図、(c)  $8\mu\text{m}$  赤外線イメージ。

たとする我々の解釈を裏付けるものであった。すばる望遠鏡による金赤外線撮像観測では、観測した5つの高速度コンパクト雲のうち3つについて星団らしき星の集団が付随することを見出した。さらに Spitzer 赤外線望遠鏡の公開データを精査した結果、特にエネルギーの高い高速度コンパクト雲 CO 0.02-0.02 のシェル内部に星団らしき赤外線源の集団が見出された(図2)。これらの事は、高速度コンパクト雲が我々が推測した通り、各々が巨大かつコンパクトな星団に付随するものである事を裏付ける結果である。なお意外な事に、X線天文衛星すざくのイメージにおいては明確な対応天体が見出せておらず、さらなる探査を進めている所である。

### (3) Pigtail 分子雲の詳細観測

ミリ波サブミリ波の一酸化炭素回転輝線サーベイデータを精査する仮定で、CMZの外れに「豚の尻尾(pigtail)」状の奇妙な分子雲を発見した。この分子雲は美しい螺旋構造をしており、CMZの約100パーセク上空に発見された Double Helix Nebula (DHN) に形態が酷似している。Pigtail 分子雲の起源としては、1) 磁場中の捻れた Alfvén 波、2) コンパクト天体からのジェット、等の起源が考えられた。本研究の様々な分子種のミリ波回転遷移輝線によるイメージング観測により、この pigtail 分子雲の詳細な空間構造と運動が明らかにされた。その結果、pigtail 分子雲の分布・運動は、Alfvén 波から期待されるものからは程遠く、むしろコンパクト天体からのジェットによって掃き寄せられたガスで期待されるものに近い事が示された。

### 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5件)

1. "Aperture Synthesis Imaging of a High-Velocity Compact Cloud near the Galactic Center", T. Oka, T. Hasegawa, G. J. White, F. Sato, M. Tsuboi, & A. Miyazaki, Publications of the Astronomical Society of Japan, 60, 429-434 (2008)
2. "Physical and Chemical Properties of Massive Clumps in the AFGL 333 Cloud", T. Sakai, T. Oka, & S. Yamamoto, The Astrophysical Journal, 662, 1043-1051 (2007)
3. "High-Resolution Mappings of the  $l=1^\circ.3$  Complex in Molecular Lines: Discovery of a Proto-Superbubble", K. Tanaka, K. Kamegai, M. Nagai, & T. Oka, Publications of the Astronomical Society of Japan, 59, 323-333 (2007)
4. "Physical Conditions of Molecular Gas in the Galactic Center", M. Nagai, K. Tanaka, K. Kamegai, & T. Oka, Publications of the Astronomical Society of Japan, 59, 25-31 (2007)
5. "A CO  $J=3-2$  Survey of the Galactic Center", T. Oka, M. Nagai, K. Kamegai, K. Tanaka, & N. Kuboi, Publications of the Astronomical Society of Japan, 59, 15-23 (2007)

〔学会発表〕(計4件)

1. 「ASTEによる銀河系中心領域 CO  $J=3-2$  広

- 域観測 (II)」、岡 朋治、性全謙仁、永井誠、  
亀谷和久、田中邦彦、日本天文学会 2008 年  
秋季年会 (2008 年 9 月 11 日、岡山理科大学)
2. 「銀河系中心領域の高速度コンパクト雲の  
物理状態」、永井誠、平畑武文、岡 朋治、  
亀谷和久、田中邦彦、日本天文学会 2008 年秋  
季年会 (2008 年 9 月 11 日、岡山理科大学)
3. 「Sagittarius B1 領域の膨張 CO Expanding  
Arc と X 線中性鉄輝線ソース周辺の SiO シェ  
ル」、田中邦彦、岡 朋治、永井誠、亀谷和久、  
日本天文学会 2008 年秋季年会 (2008 年 9 月  
11 日、岡山理科大学)
4. 「銀河系中心 Central Molecular Zone 内  
の高速度コンパクト雲」、岡 朋治、永井誠、  
亀谷和久、田中邦彦、長谷川哲夫、新井敬明、  
日本天文学会 2007 年秋季年会 (2007 年 9 月  
26 日、岐阜大学)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡 朋治 (OKA TOMOHARU)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：10291056

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし