

銀河系中心領域における中間質量ブラックホール候補の発見

竹川 俊也

Discovery of Intermediate-mass Black Hole Candidates in the Galactic Center

Shunya TAKEKAWA*

1. はじめに

宇宙には少なくとも 1000 億個以上の銀河が存在し、そのほとんどの中心には質量が太陽の 100 万倍から 100 億倍以上にも及ぶ超大質量ブラックホール(supermassive black hole; SMBH)が潜んでいると考えられている。私たち人類の住む天の川銀河(銀河系)も例外ではなく、銀河系の中心核「いて座 A*」も、その周囲を公転する恒星の軌道運動の長年にわたる解析から、太陽の 400 万倍程度の質量を有する SMBH であることがわかっている^[1]。

一般に銀河の中心核は、そこにある SMBH に物質が供給されることで様々な活動性を示す。しかし、どのような物理過程で銀河中心核に物質が供給されるのかは未だあまり理解されていない。また、中心核 SMBH がどのように形成されたのかも未解明である。宇宙初期の特殊な環境下で生まれた、太陽の 1000 から 10 万倍程度の質量を持つ中間質量ブラックホール(intermediate-mass black hole; IMBH)が種となり、種ブラックホールへの質量降着やブラックホール同士の合体を繰り返すことで、SMBH が形成されたとするシナリオが提唱されているものの、現状 IMBH の存在を示す決定的な証拠は得られていない^[2]。

銀河中心核への物質供給過程や SMBH の起源を探る上で、最も詳細な観測が可能な銀河系中心領域は極めて重要な研究対象である。銀河系中心核いて座 A* から半径 200 pc (1 pc は 3.26 光年) 以内の領域は Central Molecular Zone (CMZ) と呼ばれ、銀河円盤部に比べ高温・高密度かつ乱流が卓越した分子ガスが密集した特異な領域である(図 1)。筆者は、銀河系中心核への質量供給過程や中心核の起源解明を目指し、また、CMZ 内の分子ガスの物理状態や運動を調べる目的で、野辺山 45m 望遠鏡(図 2)や Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)をはじめとした国内外の大型共同利用装置を用いた観測的研究を行なっている。本稿では、CMZ に点在する「高速度コンパクト雲」と呼ばれる特異な分子雲の運動を手がかりに、“見えないブラックホール”を探し出す研究について紹介する。

2. 高速度コンパクト雲

星間分子が雲状に密にまとまったものを分子雲という。分子雲の

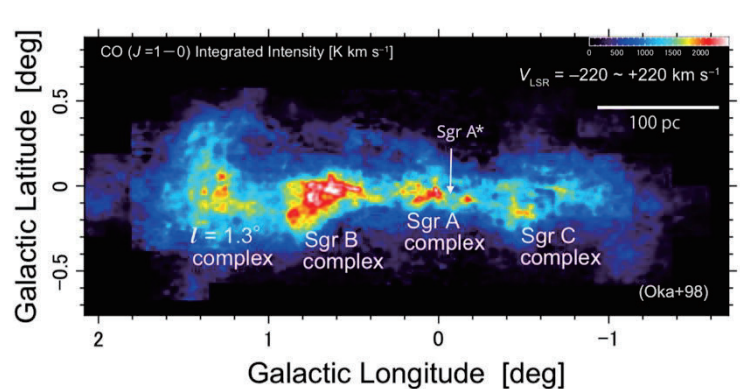


図 1 野辺山 45 m 鏡を用いて一酸化炭素分子スペクトル線(CO $J=1-0$)で観測された Central Molecular Zone



図 2 野辺山 45 m 電波望遠鏡

典型的な大きさは 1–10 pc 程度であり、主にミリ波やサブミリ波帯の分子スペクトル線により観測される。一般にそのスペクトル線幅(速度幅)は、分子雲のサイズが小さいほど狭くなることが知られている^[3]。一方で CMZ 内には、空間的にコンパクト(直径 $d < 5$ pc)であるにもかかわらず、速度幅が異常に広い($\Delta V > 50$ km s⁻¹)分子雲

*助教 物理学教室
Assistant Professor, Institute of Physics

が多数発見されている^[4,5]。これら特異分子雲は「高速度コンパクト雲」と呼ばれ、主に筆者らの研究グループによりその起源が議論されている。図3に、代表的な高速度コンパクト雲 CO-0.40-0.22 について、分子スペクトル線強度の空間分布図(積分強度図)および位置-速度図(横軸に位置座標、縦軸に視線速度をとりスペクトル線強度を図示したもの)を示す。このように、高速度コンパクト雲は空間的には(それほど高くない分解能で観測する限り)シンプルな見かけである一方で(図3a)、位置-速度図上では速度方向に伸びた細長い特徴的な構造として現れる(図3b)。高速度コンパクト雲の起源については、未だ統一的な理解が得られていないが、超新星爆発による影響^[6]や、分子雲同士の衝突^[7]、見えない重力源との重力相互作用^[8-12]などが考えられている。

3. 中間質量ブラックホール候補の発見

筆者らは、2016年に実施した東アジア天文台の James Clerk Maxwell Telescope (JCMT)を用いた銀河系中心核周りの分子スペクトル線観測で、新たに2つの高速度コンパクト雲(HCN-0.009-0.044 および HCN-0.085-0.094)を発見した^[13]。これら2つの高速度コンパクト雲は、大きさが1 pc 程度とそれまでに発見されていた高速度コンパクト雲の中では最小級であり、JCMTの空間分解能(15 秒角程度)

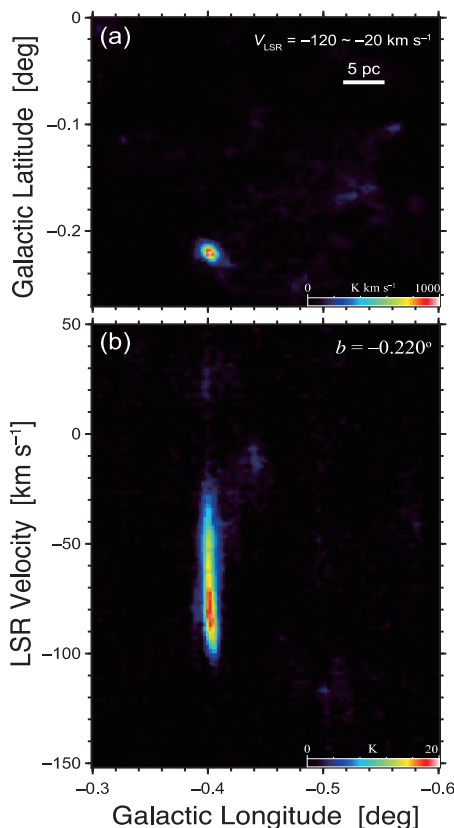


図3 分子スペクトル線(HCN $J=4-3$)で観測された高速度コンパクト雲 CO-0.40-0.22 の空間分布図(a)と銀緯-0.220°における位置-速度図(b)

では内部構造や詳細な運動は把握することができない。そこで2018年にALMAを用いて、2つの小型高速度コンパクト雲に対して、空間分解能が約1秒角の詳細な分子スペクトル線観測を行った。

その結果、それまで不明瞭であった空間構造と内部運動が明らかになった。図4(a)に、ALMAで観測された HCN-0.009-0.044 の平均速度図(各位置での分子ガスの視線速度を色付けしたもの)を示す。この速度図には、点状重力源周りを軌道回転運動している天体に典型的な速度の変化パターンが見られる。詳しい運動解析の結果、観測された速度場は、共通の点状重力源(図中の星印)を中心とした2つの異なったケプラー軌道(図中の2つの楕円)上の運動で再現できることがわかった(図4b)。モデルフィットの結果得られた重力源の質量は $(3.2 \pm 0.6) \times 10^4$ 太陽質量であった。すなわち、ここには太陽の3万倍にも及ぶ莫大な質量が集中していると考えられる。

このように莫大な質量密度を有する天体としては、ブラックホールもしくは超高密度な星団が可能性として挙げられるが、同方向には明るい天体は検出されず、星団を重力源として考えるのは困難である。以上から、HCN-0.009-0.044 の中には3万太陽質量のIMBHが潜んでいると結論できる^[10]。

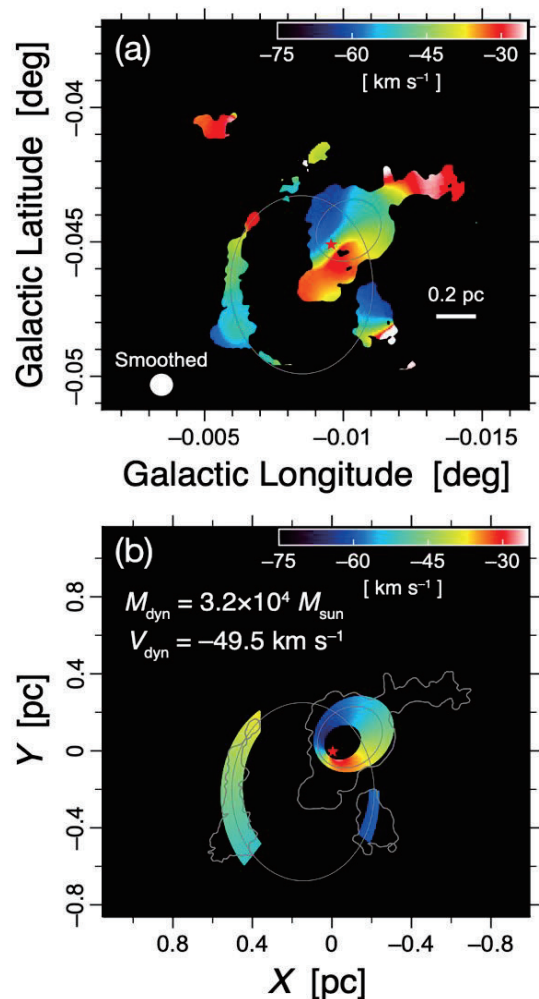


図4 HCN-0.009-0.044 の平均視線速度分布図(a)と観測データを元にモデル化された視線速度分布図

本稿では詳細は割愛するが、HCN-0.009-0.044と同様に、ALMA観測によりHCN-0.085-0.094にも点状重力源周りの軌道回転運動を強く示唆する速度構造が発見され、運動解析からここにも1万太陽質量のIMBHが潜んでいる可能性があることがわかった^[12]。筆者らは、高速度コンパクト雲の運動に着目することで、現在までに4つのIMBH候補を銀河系中心領域に発見している。

まとめと今後の展望

高速度コンパクト雲の詳細な観測により、それらの中に潜む“見えない質量”の存在を示唆し、未だ確たる存在証拠が得られていないIMBHの候補天体を新たに銀河系中心核近傍に発見することができた。これらIMBHは将来的には中心核SMBHと合体し、その成長に寄与すると考えられる。また、今回存在が示唆されたような重いIMBHは、SMBHの起源解明や銀河進化の理解の鍵であり、理論的に考えられているSMBH形成シナリオを支持する重要な成果である。

ブラックホールは、ブラックホールに落ち込む物質により形成される降着円盤からの明るい放射を検出することで従来発見されてきた。一方で、筆者らが行っているような分子ガスの特徴的な運動を検出する試みは、十分な質量降着のない暗いブラックホールに対しても有効な新しいブラックホール探索手法である。同様の手法により、銀河系中心領域のみならず銀河系円盤部や系外銀河中にも、今後続々とブラックホール候補天体が発見できることを期待している。

参考文献

- [1] A. M. Ghez, B. L. Klein, M. Morris, and E. E. Becklin, "High Proper-Motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center of Our Galaxy", *Astrophys. J.*, 509, 678-686 (1998)
- [2] M. Mezcuca, "Observational evidence for intermediate-mass black holes", *International Journal of Modern Physics D*, 26, 1730021 (2017)
- [3] R. B. Larson, "Turbulence and star formation in molecular clouds", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 194, 809-826 (1981)
- [4] T. Oka, T. Hasegawa, F. Sato, M. Tsuboi, and, A. Miyazaki, "A Large-Scale CO Survey of the Galactic Center", *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 118, 455-515 (1998)
- [5] S. Tokuyama, T. Oka, S. Takekawa, Y. Iwata, S. Tsujimoto, M. Yamada, M. Furusawa, and M. Nomura, "High-resolution CO imagings of the Galactic central molecular zone", *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 71, 19 (2019)
- [6] S. Tsujimoto, T. Oka, S. Takekawa, M. Yamada, S. Tokuyama, Y. Iwata, and J. A. Roll, "Detection of Another Molecular Bubble in the Galactic Center", *Astrophys. J.*, 856, 91 (2018)
- [7] K. Tanaka, "ALMA Images of the Host Cloud of the Intermediate-mass Black Hole Candidate CO-0.40-0.22*: No Evidence for Cloud-Black Hole Interaction, but Evidence for a Cloud-Cloud Collision", *Astrophys. J.*, 859, 86 (2018)
- [8] T. Oka, R. Mizuno, K. Miura, and S. Takekawa, "SIGNATURE OF AN INTERMEDIATE-MASS BLACK HOLE IN THE CENTRAL

MOLECULAR ZONE OF OUR GALAXY", *Astrophys. J. Lett.*, 816, L7 (2016)

[9] T. Oka, S. Tsujimoto, Y. Iwata, M. Nomura, and S. Takekawa, "Millimetre-wave emission from an intermediate- mass black hole candidate in the Milky Way", *Nat. Astron.*, 1, 709 (2017)

[10] S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tsujimoto, and M. Nomura, "Indication of Another Intermediate-mass Black Hole in the Galactic Center", *Astrophys. J. Lett.*, 871, L1 (2019)

[11] S. Takekawa, T. Oka, S. Tokuyama, K. Tanabe, Y. Iwata, S. Tsujimoto, M. Nomura, and Y. Shibuya, "An energetic high-velocity compact cloud: CO-0.31+0.11", *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 71, 21 (2019)

[12] S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tsujimoto, and M. Nomura, "The Fifth Candidate for an Intermediate-mass Black Hoke in the Galactic Center", *Astrophys. J.*, 890, 167 (2020)

[13] S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tokuyama, and M. Nomura, "Discovery of Two Small High-Velocity Compact Clouds in the Central 10 pc of Our Galaxy", *Astrophys. J. Lett.*, 843, L11 (2017)