

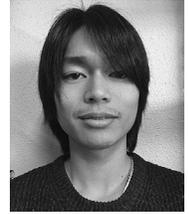
ALMA で見た 銀河系中心の新しい姿

坪井 昌人

〈JAXA 宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1〉
e-mail: tsuboi@vsop.isas.jaxa.jp



坪井



上原

上原 顕太

〈東京大学大学院 〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1〉

銀河系中心領域の今までの描像は80-90年代に建設された大望遠鏡群が作ったものであるが、ALMAは次々にそれに当てはまらない新しい構造や現象を発見している。ここでは銀河系中心分子雲の統計的性質を明らかにし、その原因として分子雲-分子雲衝突の関係を論じる。そして中心星団の起源として分子雲-分子雲衝突による大質量星形成中の分子雲が銀河系中心自体に落下するという仮説を立て、その状況証拠のいくつかを紹介する。最後にこの領域にある2個目のブラックホールの可能性も紹介する。

1. はじめに

銀河系中心領域はわれわれの住んでいる渦巻銀河である天の川銀河の中心である。たった8 kpcという近距離にあるため現在の望遠鏡でも詳細な観測が可能である。ここには銀河の力学中心近くに太陽の400万倍の質量をもつ巨大ブラックホールが存在すると考えられている。その対応天体はX線から電波までコンパクトな天体として観測される銀河系中心核、射手座A* (Sgr A*)である。そこを中心に恒星が集中して分布しているのに加え、多くの渦巻銀河がそうであるように分子ガスも集中していて、銀河面方向に±200 pcにわたって伸びる『銀河系中心分子雲帯 (CMZ)』と呼ばれる構造が存在する。CMZの体積は銀河系全体の0.01%程度にしか過ぎないが、分子ガスの質量では実に10%もある。CMZの分子雲には銀河系円盤部の分子雲とは違う特徴がある。観測される

分子ガスの密度、温度、速度幅が銀河円盤部のそれらに比べそれぞれ約10倍で $10^4\text{--}10^6\text{ cm}^{-3}$ 、10-100 K、15-50 km/sに達する。これらは分子雲内部に激しい乱流が存在していることを示す。また過去30年の赤外線観測により、ここにはO型星やWR星を数十-100個以上も含む、銀河系円盤部ではあまり見ることのできない若い大質量星団が発見されている。さらに数多くの単独の大質量星も発見されている。これら太陽質量の数十倍以上の星の寿命はたかだか $10^6\text{--}10^7$ 年であるので、CMZでは 10^6 年以内に大質量星形成が起こったことを意味する。ただ前述のように大量の分子ガスが集中する領域のため星形成効率は特別に高いわけではない。ここではアタカマミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) で分子ガスや電離ガスの分布と運動、ダスト分布などを観測することにより、大質量星団の形成過程を観測的に明らかにしようとするわれわれの試みを紹介したいと思う。もし

大質量星団の形成過程の詳細が明らかになれば、系外銀河で観測されるより明るい『Super Star Cluster (超星団)』の形成過程の解明にもつながるであろうと期待できる。また同時に得られた Sgr A* の新しい観測についても簡単に紹介する。

ALMAの観測はすべて公募であり、レフェリーの国際委員会で天文学的な価値と観測実現性を根拠に採否が厳密に判断される。われわれはこの競争に勝ち抜きサイクル1 (Cy. 1) で銀河系中心 (Sgr A) 分子雲の 100 GHz 分子輝線の大規模分子輝線撮像観測 (CS $J=2-1$, $H^{13}CO^+ J=1-0$, SiO $J=2-1$ など) を行った。Cy. 3 では 350 GHz 連続波による $0.1''$ を切る高分解能観測を獲得できた。Cy. 1 観測は Sgr A* 周囲の電離ガスであるミニスパイラルや 50 km/s 分子雲を含む $330'' \times 330''$ の広域の高空間分解能 ($1.5'' = 0.06$ pc) 観測であった。Cy. 3 の観測も難しい観測ではあったが 16 年夏に観測された。

2. 銀河系中心の大質量星団は分子雲-分子雲衝突で生成されるのか？

前述の銀河系中心の若い大質量星団は中心周囲の 10 pc 以遠に分布する Arches (アーチ星団), Quintuplets (五つ子星団) などの星団と Sgr A* の周囲 (0.5 pc 以内) にある Central Cluster (または Nuclear Cluster, 中心星団) に大別される。前者の年齢は $(2-4) \times 10^6$ 年と推定されていて星団形成の母体となった分子雲はすでに散逸している。そのため形成過程を観測的に明らかにすることはできない。前者の類似物はないかと探すと Sgr A* から角度で $3'$ (射影距離で 9 pc) 離れたところには銀河系中心 50 km/s 分子雲がある。この巨大分子雲には 10^5 太陽質量の分子ガスが含まれるとともに複数のコンパクト H II 領域が付随し、星団を形成中であると考えられる^{1), 2)}。図1が野辺山45 m 鏡を使ったこの巨大分子雲の観測結果である³⁾。この分子雲の中に輝線強度比 $T(\text{SiO})/T(\text{H}^{13}\text{CO}^+)$ が5以上と極めて高い比をもつ馬蹄形の構造が発

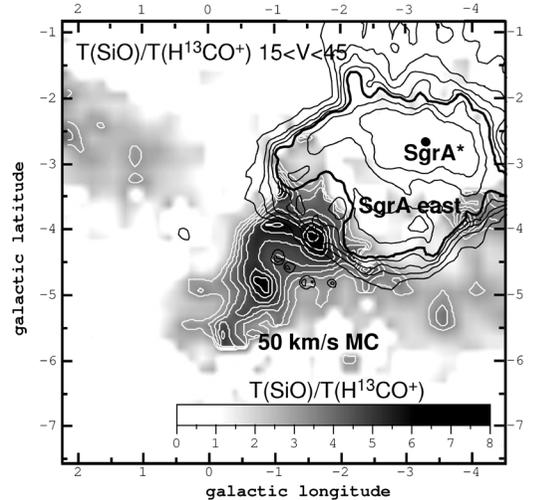


図1 野辺山45 m 鏡を使った 50 km/s 分子雲の観測分子雲の中に輝線強度比 $T(\text{SiO})/T(\text{H}^{13}\text{CO}^+)$ が高い馬蹄形の構造がある。

見された。強い衝撃波でダストが加熱されて Si が蒸発し、星間空間で酸化されて SiO 分子が生成される。一方 $H^{13}CO^+$ 分子にはそのようなことは起こらない。なので、この分子輝線比は衝撃波の良いトレーサーになる。また SiO 分子は 10^5 年程度で星間塵に再び吸着されると考えられるので、この高い分子輝線比は強い衝撃波が分子雲の中に 10^5 年以内に存在したことを示している。この高い比の構造は位置速度図上でも馬蹄形をしており、その起源は南西からの分子雲-分子雲衝突で起きた衝撃波で形成されたと解釈できる⁴⁾。

図2は野辺山ミリ波干渉計 (NMA) の CS $J=1-0$ 輝線観測⁵⁾ によるコア質量関数 (CMF) である⁴⁾。CMF は横軸が検出されたコアの質量、縦軸はその質量以上に何個検出されたかを表したグラフである。NMA のデータから clumpfind アルゴリズム⁶⁾ で検出された分子雲コアを用いて描かれた。50 km/s 分子雲の CMF は太陽近傍の大質量星形成領域である Ori A 分子雲の CMF に比べるとトップヘビーな兆候 (大質量なコアが多い) を示している。この兆候は分子雲-分子雲衝突が磁場を圧縮してアルベン速度を増加させ、結果的に Jeans 質

量を増加させて大質量コアができるという大質量星形成のシミュレーション結果と合致している⁷⁾。しかしながら、このCMFはたった37個のコアしか含んでいない。感度と角度分解能に限界があり十分に検証された結論でないことは明らかである。そこでわれわれはALMAを使いCS, C³⁴S, H¹³CO⁺, SiOなど多数の分子輝線でこの分子雲全体を10倍の高分解能で撮像観測することにした。

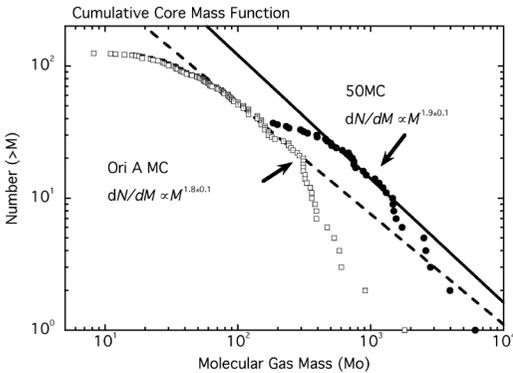


図2 野辺山ミリ波干渉計の観測による50 km/s分子雲のコア質量関数(比較: OriA分子雲)。

図3はALMAで描いた50 km/s分子雲のH¹³CO⁺J=1-0輝線での積分強度図である。ALMAの12 mアレイ, 7 mアレイ, そして単一鏡のデータを加えたものである, 明らかになった50 km/s分子雲はまさに分子雲が『雲』と言われるゆえんがここにあるというような姿をしている。銀河系中心はOriA分子雲に比べて20倍遠距離にあるので, このALMAによる観測の1.5"の角度分解能と野辺山45 m鏡での角度分解能(30")は, OriA分子雲を観測した場合は物理スケールに直すとほぼ同じになり, 直接比較することができる。OriA分子雲はご存じのように最も近距離にあり最も詳細に観測されている大質量星形成領域である。50 km/s分子雲は何本もの枝に分かれた複雑な構造をしているが, その1本がOriA分子雲程度のものに相当する。

このデータよりclumpfindアルゴリズムを用いて検出された分子雲コアの数は前述の先行研究の7倍の数にあたる270個程度であり, 検出したコアの下限質量も1/10程度になっている。得られ

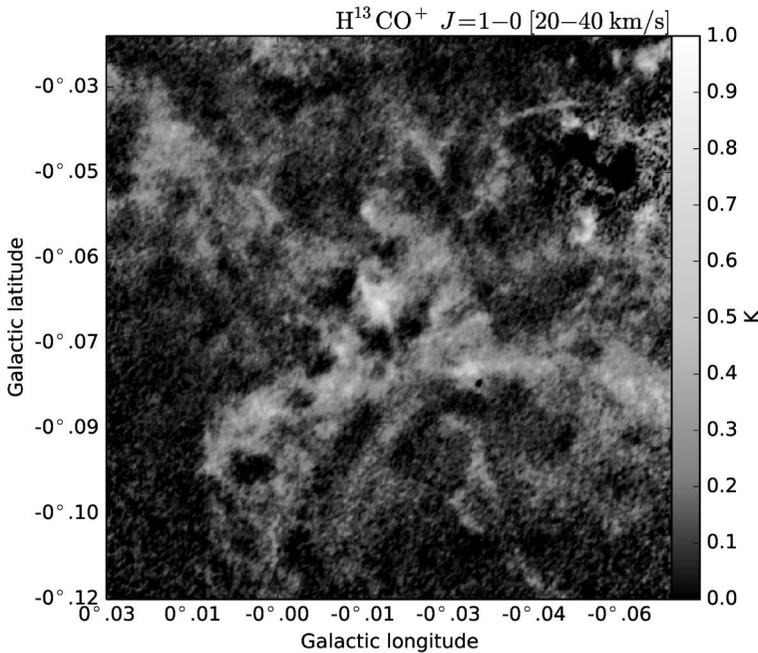


図3 ALMAの観測による50 km/s分子雲のH¹³CO⁺J=1-0輝線の積分強度図(20-40 km/s)。

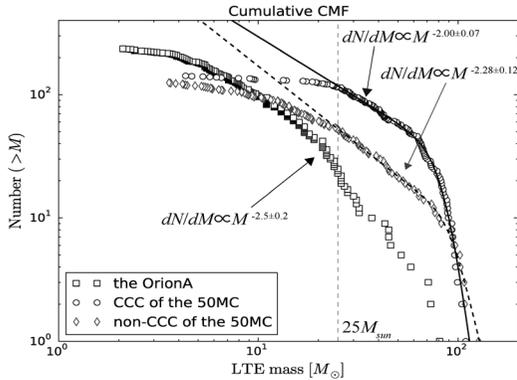


図4 ALMAの観測による50 km/s分子雲のコア質量関数(比較: OriA分子雲⁸⁾).

たCMFを図4に示すが、分子雲-分子雲衝突が起こっている領域(ALMAの観測でも45 m望遠鏡で見つけた $T(\text{SiO})/T(\text{H}^{13}\text{CO}^+)$ が5以上と極めて高い比をもつ馬蹄形の構造を確認することができた)とそうでない領域とに分けて描くとその差は歴然である。分子雲-分子雲衝突が起こっている領域のCMFには強いトップヘビーの兆候が表れているに対して、それ以外の領域はそうではなかった。すなわち、観測されたCMFは分子雲-分子雲衝突が大質量分子雲コアを作り、大質量星形成を誘発しているというシナリオを支持するものである。さらに分子雲-分子雲衝突の仕方によっては分子雲間で角運動量をやり取りしてそれまでの銀河系中心を公転する軌道とは別の軌道に移る可能性がある。将来アーチ星団や五つ子星団などの中心から10 pc以遠に存在する星団に成長するものもあるかもしれないが、ヘッドオンで衝突した場合はこの大質量星形成を開始している分子雲がより内側の軌道に移っていくことも考えられる。

一方、銀河系の銀河系円盤部の分子雲では、Herschel衛星の遠赤外線ダスト放射のサーベイ観測によって多くのフィラメント構造が発見され、分子雲が遍在的にフィラメントの状態で存在することが明らかになった⁹⁾。これらの分子雲フィラメントは、柱密度が1桁以上($\sim 10^{20-23} \text{ cm}^{-2}$)変

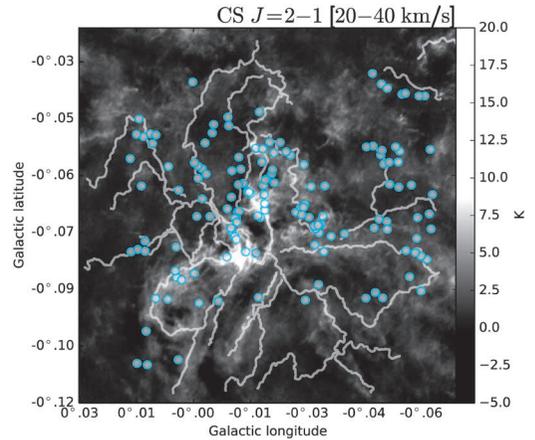


図5 ALMAの観測による50 km/s分子雲のCS $J=2-1$ 輝線の積分強度図(20-40 km/s).

白線: DisPerSEアルゴリズムにより同定したフィラメント, 青丸: clumpfindアルゴリズムより同定した分子雲コア。

化するにもかかわらず、幅は常に $\sim 0.1 \text{ pc}$ という特徴的な幅をもっていることが指摘されている¹⁰⁾。そして、フィラメントの柱密度が 10^{22} cm^{-2} より大きい領域に原始星や高密度分子雲コアが存在していることが明らかになり、銀河系円盤部ではフィラメントの密度と星形成には密接な関係があることがわかってきている¹¹⁾。一方でCMZは前述のように円盤部とは環境が大きく異なっているし星形成過程も異なると考えられている。

分子雲は円盤部と同様に分子雲フィラメントとして存在しているのであろうか? CMZは遠方にあるため、ALMAができるまでは観測が困難であった。ALMAによるCMZの分子輝線観測はG0.253+0.016という分子雲について1例であるが先行研究があり、分子雲フィラメント状の構造が発見されている¹²⁾。今回はよりSgr A*近傍の分子雲でもフィラメント状構造が存在することを確かめ、CMZでも分子雲がフィラメント状構造で普遍的に存在することを確かめようとした。

図5は50 km/s分子雲の速度方向20-40 km/sで積分したCS輝線の強度図である。そして、DisPerSEアルゴリズム¹³⁾用いて0-100 km/sで同定した27

本のフィラメントを白線で示している。解析途中だがフィラメントの幅は 0.268 ± 0.059 pcで、円盤領域に比べ3倍程度太いかもしれない。さらに、前述の H^{13}CO^+ 輝線で同定された高密度分子雲コアのうち50%以上がフィラメント上に位置していた(図5青丸)。今後、フィラメントや分子雲コアの分布と分子雲衝突との関係を明らかにし、銀河系中心領域での新たな大質量星形成のシナリオの構築を目指していく予定である。

3. 銀河系中心星団の起源

銀河系中心の中心星団には後述の比較的若い星だけではなく実はいろいろな年齢の星が存在しているようである。これらの星の起源はまさに研究の途上であるが、筆者らはアーチ星団や五つ子星団などの星団とは別の星団形成シナリオが必要であると考えている。Sgr A*周囲0.5 pc以内では中心星団中のOB型星からのライマン連続光により分子ガスは急速に電離され、さらに個数密度で 10^8 cm^{-3} に達していないガス塊はSgr A*の潮汐力で破壊されてしまう。したがって円盤部同様の星団形成シナリオでは、そして前述の銀河系中心近傍の星団形成シナリオでも困難である。われわれはALMAアーカイブを用いて、Sgr A*の近傍へのガスの流れである『ミニスパイラル』(力学的タイムスケールは 10^4 年程度である)のダスト分布を340 GHz連続波データで明らかにした¹⁴。この観測データはもともとSgr A*の時間変動モニターのために取得された長時間のもので、撮像の見地からはUVカバレッジが極めて良いものであった。セルフキャリブ法などを駆使することにより解析し、ダイナミックレンジが20,000以上、角度分解能 $0.4''$ とサブミリ波観測としてはこれまで達成されたことのない結果を得た。これをもとにダストピークと中心星団のOB型星の位置の相関を調べた。もし、落下した分子ガスから新たにその場での星生成が起きているならば、OB型星の生成には少なくとも 10^5 年かかるので、その

間にガスはSgr A*の周囲を何公転もする。Sgr A*の潮汐力でガスはしだいに生成したOB型星から散逸して相互の位置に相関はないはずである。一方、周辺部ですでに星生成が開始している分子雲が落下している瞬間を見ているのであれば、ダストピークとOB型星の位置は相関するはずである。

図6は340 GHz連続波によるダスト分布とOB型星の分布の比較である。シェル状ダスト分布が付随する星は黒丸で表している。これらの星の多くはダストピークと位置的に相関しているように見える。Sgr A* (中心の大黒丸)の極近傍には相関しないOB型星も分布するが、少なくともミニスパイラルのダストピークにはOB型星の位置との相関があるようである。この分解能までは周辺部ですでに星生成が開始している分子雲が落下しているというシナリオとは矛盾がない。また同時にガスはまだ遠くから落下してSgr A*の周りを公転し始めたばかりでもあることを示している。

『そんな落下する分子雲は本当にあるのだろうか』という観点でミニスパイラルの周辺の分子雲を前述のCy. 1の観測のデータキューブでCS $J=2-1$ 輝線で探してみた¹⁵。図7(左)がその結果の一例であり、速度方向90–110 km/sで積分した

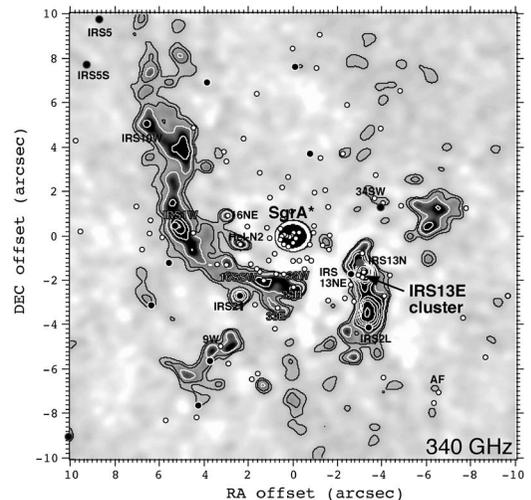


図6 ALMAの340 GHz連続波観測によるダスト分布とOB型星の分布(中心星団)の比較。

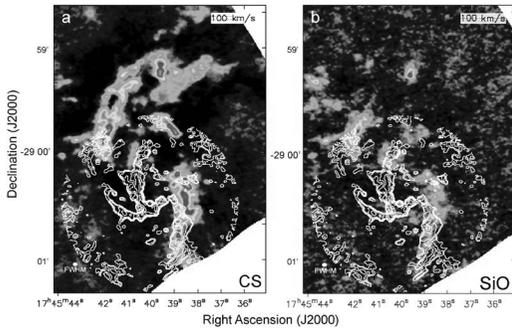


図7 ALMAによるミニスパイラルに落下する分子雲(左: CS輝線)と衝撃波(右: SiO輝線)。

CS輝線強度図である。等高線はALMAで見た100 GHzの連続波でミニスパイラル全体を表している。同じ領域、速度をショックトレーサのSiO輝線で見たのが右図である。ミニスパイラルから大きく北側に広がったフィラメント状の分子雲が確認できる。そしてミニスパイラルとの境界付近にSiO輝線が分布している。ミニスパイラルのどの腕に接続しているかはそれほど明らかではないが、強いて言えば北アームと東アームの間にある淡いアーム(コントラストではよく見える)につながっているようである。このアームの中心側の先端にはVLA(Very Large Array, 超大型電波干渉計)により彗星状天体が多数発見されている¹⁶⁾。これらは中小質量の原始星でありそのディスクが中心星団の紫外線により電離されて彗星状に電離ガスがたなびいていると想像されている。このミニスパイラルに落ち込む分子雲の中には前述の生成したてのOB型星に加えて、中小質量の原始星も含まれているようである。中小質量星の方が生成に時間がかかるので原始星のまま落下してきたのであろう。

中心星団からのライマン連続光による電離やSgr A*の潮汐力による破壊を受けたガスがミニスパイラルであると考えられる。その軌道はどうであろうか? この観点をもって電離ガスの運動の様子がVLA(水素再結合線)や赤外線望遠鏡(電離ネオンの禁制線)を使って調べられてきた。

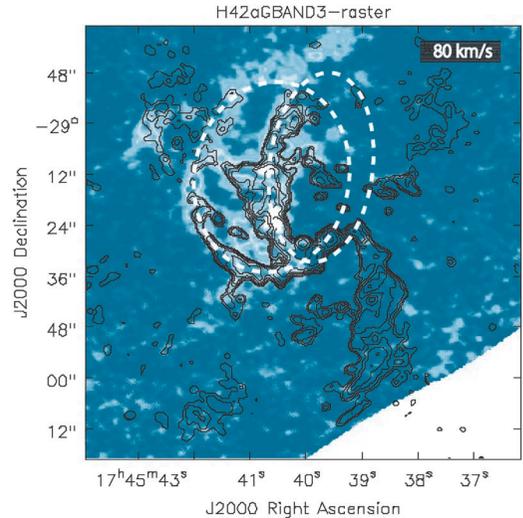


図8 ALMAによるH42 α 水素再結合線の積分強度図(70-90 km/s)。赤線: 提案されているケプラー軌道。

ただ分解能と感度の制限のために複雑な構造であるミニスパイラルを完全に解明できたとは言えなかった。

われわれは前述の50 km/s分子雲の高分解の観測の視野端に映り込んだミニスパイラルのH42水素再結合線データを解析した¹⁷⁾。図8がその結果の一例であり、速度方向70-90 km/sで積分した輝線強度図である。これまでに比べて高感度(7倍)の観測ができた。今までミニスパイラルはケプラー運動で表されてきた。ただその遠心点は電波連続波や再結合線が弱くなる核周円盤(Circumnuclear Disk; CND, 半径は2 pc程度)の内側にあるとされていたが、感度の上昇に伴い遠方まで伸びていることがわかった。またSgr A*の近傍にも旧来のミニスパイラルの間にも新たなケプラー運動する成分が発見されている。

4. 銀河系中心に2個目のブラックホールはあるのか?

銀河系中心核Sgr A*は1974年にセンチ波帯の干渉計観測から非常にコンパクトな天体として発

見された。その後赤外線観測で周囲を公転する恒星が発見され、それらの運動から 4×10^6 太陽質量をもつ巨大ブラックホールであることが明らかになっている。この領域にはもうほかにブラックホールはないのであろうか？ それに疑問を投げかける発見が赤外線観測でなされた。IRS13Eは銀河系中心核Sgr A*から $3.5''$ (0.13 pc)離れたところにある赤外線天体である。この天体はいくつものO型星やWR星を含んでいて、それらは同じ方向に運動しているように見えた(西側に向かって 280 km/s)。つまりIRS13Eは重力的束縛された星団であると考えられた。ところが見かけどおりのSgr A*からの距離にこの星団があれば、巨大ブラックホールの強力な潮汐力によってすぐにばらばらにされてしまうはずであるが、そうはなっていない。そうならないためにはこの星団の質量が大きくその重力で星々を束縛していれば良い。しかし星の質量を全部足してもとても足りないようであった。そこで考えられたのがこのIRS13E星団の中心に中間質量ブラックホールがあるという仮説である。その後、赤外線分光観測が進み、O型星やWR星だと思われていた天体が単なるガスの塊であることが分かったり、最初の重力的束縛された大質量星の星団と言う最初の仮定が危うくなり、中間質量ブラックホールの必要性も疑問もたれるようになってしまった。加えてVLBA (Very Long Baseline Array, 超長基線電波干渉計)を用いた位置天文観測から2個目のブラックホールの上限質量は 10^4 太陽質量であることもわかった。それでも銀河系中心に2個目のブラックホールはあるのか？ という疑問は相変わらず存在する。このようなブラックホールの有無の判定はやはりガス運動がキーとなる情報になる。

前述のようにこの領域では中心星団からの強い紫外線のため分子ガスは生き残れず電離ガスになっている。したがってガスの運動を調べるには再結合線を観測するしかない。赤外線観測では

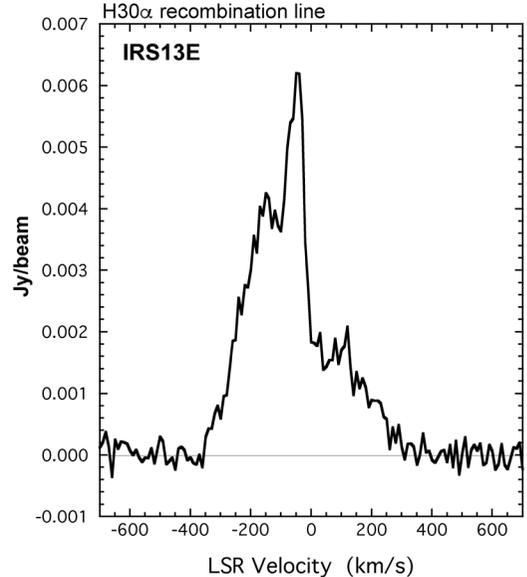


図9 ALMAによるIRS13E方向のH30 α 水素再結合線のプロファイル。

[Ne II] 輝線の観測が有名であるが、ALMAを使えば水素再結合線を観測できて $1''$ を大きく下回る角度分解能のマップを得ることも可能である。われわれはDDTというALMA観測所の所長時間で観測された観測データを利用することにした。実はこの目的の観測提案を前の観測募集に応募していたが、残念ながら不採択であったのである。このデータの本来の目的はX線衛星との同時観測であり、十分長時間観測している素晴らしい観測データであった。

図9はIRS13E方向で観測されたH30 α 水素再結合線のプロファイルである。ビームサイズは $0.4''$ である。細いピークと広い裾野がある形をしている。裾野は -350 km/s から $+300 \text{ km/s}$ まで確認できる。この領域は高性能化されたVLAによりミリ波連続波(電離ガスからの放射)で $0.1''$ 以下の角度分解能で観測されて、IRS13Eの広がり半径で $0.04''$ 以下という極めてコンパクトな天体であることが明らかになった。この広がり半径は 400 天文単位に相当する。この速度幅は熱温度ではなくてIRS13Eの周囲のガスの運動により広

がっていると考えられる。このようにして求めた IRS13Eの質量は極めて大きく太陽質量の(1-2)×10⁴倍に達するが、前述のVLBAによる質量上限値とは矛盾がない。また、チャンドラ衛星によるX線観測ではこの位置にX線天体が写っているようである¹⁸⁾。やはりこれは中間質量ブラックホールかもしれない。

ALMAは今までの電波望遠鏡に比べ、10-100倍の感度かつ高分解能なミリ波サブミリ波望遠鏡であるため、ここ数年は“見ることすべてが新しい”。これまでは80-90年代に建設された望遠鏡群が作ったパラダイムのうえでの研究であったが、パラダイムシフトの時代を迎えるのであろうか？ とても楽しみである。なお、ここに紹介した成果は北村良実、宮脇亮介、宮崎敦史、三好真、堤貴弘各氏との共同研究により得られたものである。

参考文献

- 1) Ekers et al., 1983, AAP 122, 143
- 2) Goss et al., 1985, MN 215, 69
- 3) Tsuboi et al., 2011, PASJ 63, 763
- 4) Tsuboi et al., 2015, PASJ 67, 109
- 5) Tsuboi et al., 2009, PASJ 61, 29
- 6) Williams et al., 1994, APJ 428, 693
- 7) Inoue & Fukui, 2013, APJ 774, L31

- 8) Ikeda et al., 2007, APJ 665,1194
- 9) Pilbratt et al., 2010, AAP 518, L1
- 10) Arzoumanian et al., 2011, AAP 529, L5
- 11) André et al., 2010, AAP 518, L102
- 12) Rathborne et al., 2015, APJ 802, 125
- 13) Sousbie, 2011, MN 414, 350
- 14) Tsuboi et al., 2016, PASJ 68, L7
- 15) Tsuboi et al., 2016, IAU322 115
- 16) Yusef-Zadeh et al., 2015, APJ 808, 97
- 17) Tsuboi et al., 2016, APJ, submitted.
- 18) Baganoff et al., 2003, APJ, 591, 891

ALMA View of the Galactic Center Region Masato Tsuboi¹ and Kenta Uehara²

¹ ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara 252-5210, Japan;

² The University of Tokyo, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara 252-5210, Japan

Abstract: We present new observations of the Galactic center region using ALMA. First, we discuss the statistical properties of molecular cloud cores in the 50 km/s molecular cloud adjacent to Sgr A*. Next, we introduce a hypothesis about the origin of the Central cluster. Finally, we discuss the possibility of the second galactic center black hole.