

銀河系中心部における磁気浮上ループ

鳥居 和史, 藤下 基線
 工藤 奈都子, 福井 康雄

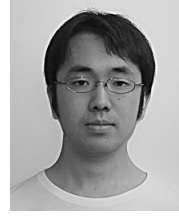
〈名古屋大学理学研究科 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉

torii@phys.nagoya-u.ac.jp

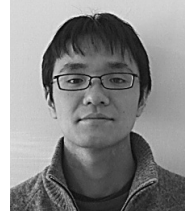
motosuji@phys.nagoya-u.ac.jp

kudo@phys.nagoya-u.ac.jp

fukui@phys.nagoya-u.ac.jp



鳥居



藤下

銀河系中心部は、その中心に巨大ブラックホールが存在し、また大量の星間ガスも集中しているという、銀河系で最も特異な領域である。この領域に対し、われわれの研究チームは、「なんてん」望遠鏡を用いた CO ($J=1-0$) の広域サーベイを実施し、これまでにない広範かつ詳細な分子雲分布を明らかにした。われわれは銀河系中心部から約 500 pc の距離に、高さ 300 pc にも及ぶ巨大なループ状の分子雲を発見した^{1), 2)}。その形状と速度構造の解析から、太陽表面で観測されるループ現象と同様の磁気浮上ループが 12 桁大きな銀河規模で起きていることを指摘した。このことは長年の懸案であった銀河系中心部の「分子ガスの激しい運動と加熱機構」と「磁場の大局的構造」の解明につながる画期的な成果であると言える。

1. はじめに

宇宙にはいまだ多くの謎が残されており、銀河進化の解明は、その最も重要な課題の一つである。特に星間分子雲中の星形成過程は銀河進化に決定的な影響を与える。電波、赤外線、可視光を中心とする近年の観測によって、銀河系円盤部における星形成の研究は、近傍の小質量星形成を中心に大きく進展した。その一方で、星の密度が高い銀河系中心部の数百 pc については、太陽の数 100 万倍の質量をもつ巨大ブラックホールや分子雲、高温ガスの存在は知られているが、その非常に複雑な構造のため、星形成を含めた物理学的理解は進んでいない³⁾。銀河全体の進化を解明するうえで、中心部の物理状態を解き明かすことは重要な研究課題である。われわれは星形成に直結す

る分子雲の広範な観測を「なんてん」4 m 望遠鏡を用いて行い、この課題に取り組んできた。

銀河系中心部には、分子雲が強く集中している。特に SgrA と SgrB を含む CMZ=Central Molecular Zone は総質量 5×10^7 太陽質量の分子ガスからなり、中心から 300 pc 以内に集中的に分布する。この領域の分子雲の大きな特徴は、速度分散が大きく (30–50 km/s) かつ、分子ガスの温度が 30–600 K と異様に高いことである。通常の銀河系内分子雲の速度分散が 10 km/s 以下であり、温度が 10 K 程度であることを考えると、銀河系中心部の特異性は明らかと言える。この速度分散と高温の起源は、諸説あるものの、まだ決着はついておらず、謎とされてきた。また、これらの分子ガスは、通常の分子雲の 100–1,000 倍の内圧をもつ。この領域の恒星密度は、太陽近傍の 100–1,000

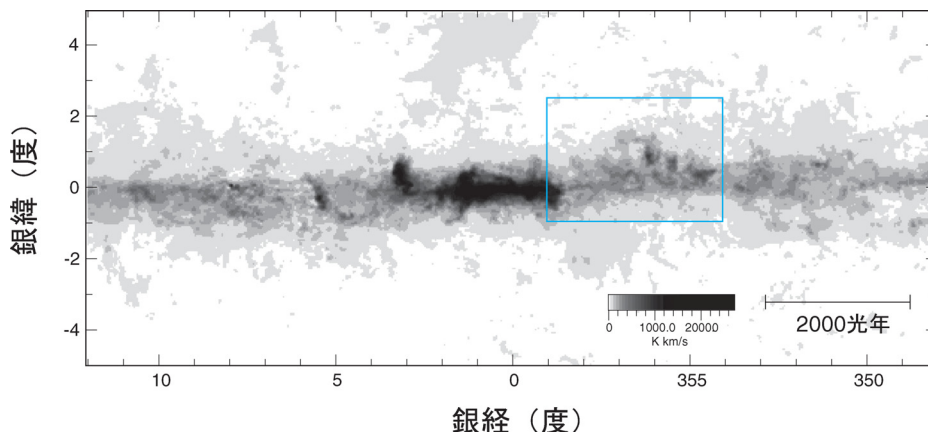


図1 「なんてん」望遠鏡で得られた銀河系中心部の分子ガスの強度分布. 特に色の黒い領域がCMZ. 今回二つのループが発見されたのは青枠の領域.

倍であり、ガス全体が強い重力場で銀河面に垂直な方向に押さえつけられ、ガスの内圧と釣り合っていると考えられる。その自然な帰結として、分子雲内部の圧力は高く、乱流あるいは磁気圧が通常の分子雲よりも数百倍高いと考えられる。実際、CMZの磁場の強さは、議論はあるものの最大でmGの大きさになるとされている。

2. 「なんてん」による銀河系中心部の分子雲観測

従来の銀河系中心方向の分子雲観測はおおむね銀緯 ±2 度以内に限られていた。これに対し、われわれは2001–2003年に南米チリに設置された、名古屋大学の4 m電波望遠鏡「なんてん」を用いて、銀河系中心部の24度×10度(銀経×銀緯)の領域を一酸化炭素分子の波長2.6 mm回転輝線を用い、4分角間隔(銀河系中心部において約10 pc)で合計約5万点を観測し、これまででない広範かつ詳細な分子ガス分布を明らかにした(図1)。

3. 分子雲ループの発見: ループ1とループ2

われわれは「なんてん」で得られたデータを解

析し、銀河面から顕著に立ち上がる2個のループ状の分子雲を発見した(図2)。2個のループは、50–100 km/sという極めて大きな速度の広がりを持ち、距離8.5 kpcにおいて、高さ220–300 pc、全長300–600 pc以上である。強度分布の特徴は、根元部分の強度が高いことである。また、この根元は非常に大きな速度分散を持ち、ループ全体は大きな速度勾配をもつことがわかる(図3)。2個のループの総質量の下限は 3×10^5 太陽質量と求められ、速度分散30 km/sとして運動エネルギーは 4×10^{51} ergと推定され、これらのエネルギー、速度構造を考慮すると、このループの成因は単一の超新星爆発での理解は難しい。

4. 磁気浮上ループ

では、このループはどのようにして形成されたのだろうか? その可能性としてわれわれはパーカー不安定性によるモデルを指摘した^{4)–6)}。パーカー不安定性とは、重力とガスの圧力勾配とが釣り合っている静水圧平衡状態にあり重力方向とは垂直に分布している磁場に働く不安定性である。太陽表面で形成されるループ現象の成因として知られている。図4にあるように、微分回転する銀河系中心部ガス円盤(半径1.3 kpc程度)は、磁場

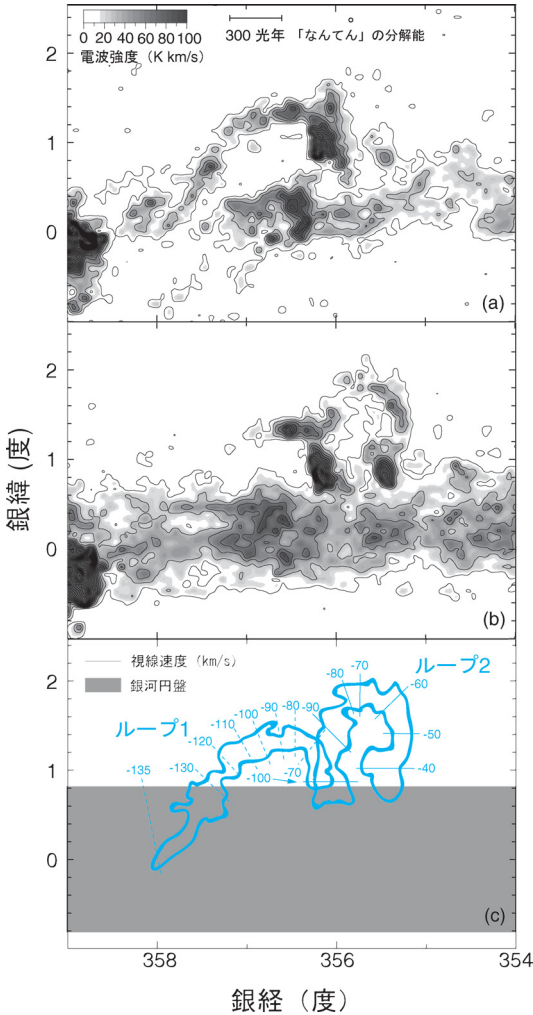


図2 二つのループのCO積分強度図。(a)~(c)とも同じ領域を示す。(a): ループ1積分強度図。速度範囲は-190~80 km/s (b): ループ2積分強度図。速度範囲は-90~-40 km/s (c): 二つのループの輪郭を重ねた図。引いてある線はループの速度の流れを描いたもの。ループ1の左側からループ2の右側へと速度がシフトしていることがわかる。

がおおむね円盤の大周方向に分布すると考えられ、静水圧平衡にある磁場は、パーカー不安定によって、ある波長(スケールハイトの数倍)を単位として銀河面外に持ち上がる(この時の高さはスケールハイトの数倍となる)。このときの上昇

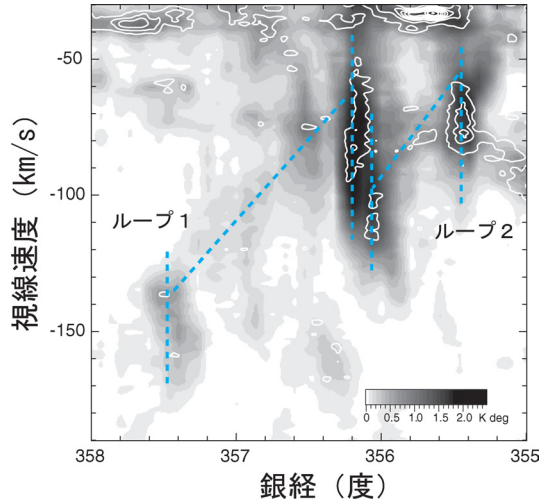


図3 二つのループの銀経-速度図。グレースケールが ^{12}CO 、コンタウが ^{13}CO を示す。点線で示したように、ループの根元で速度幅が広がっていることがわかる。また根元同士を結ぶ斜めの点線からも速度勾配の様子がうかがえる。

速度は分子ガスの密度と磁場の強さで表されるアルフベン速度($V_a = B / \sqrt{4\pi\rho}$, B : 磁場の強さ, ρ : 分子ガスの密度)である。銀河円盤の分子ガスは宇宙線陽子によって弱く電離しており、分子ガスは磁場に閉じ込められた状態で、磁場とともに浮上する。その後、分子ガスは銀河面の重力を受け磁場に沿って落下し、加速されたガスは円盤表面に衝突する。この時の落下速度が超音速であれば衝撃波が発生する⁵⁾。この速度はほぼアルフベン速度であり、 $150 \mu\text{G}$ の磁場と分子雲の密度 10^{2-3} 個/ccを仮定すると 30 km/s 程度になる⁷⁾。以上の描像によると、ループの形状とサイズ、速度幅は観測と一致する。また、ループ内にはガスの落下運動による速度勾配が観測されるはずであり、これもまた観測とよく一致する(図3)。そして銀河系中心のガス密度、磁場強度を用いてMHD数値シミュレーションを行ったところ、今回発見された2本のループが実際に銀河系中心の磁場強度とガス密度の条件下で形成されることを確認した(理論側記事を参照)。

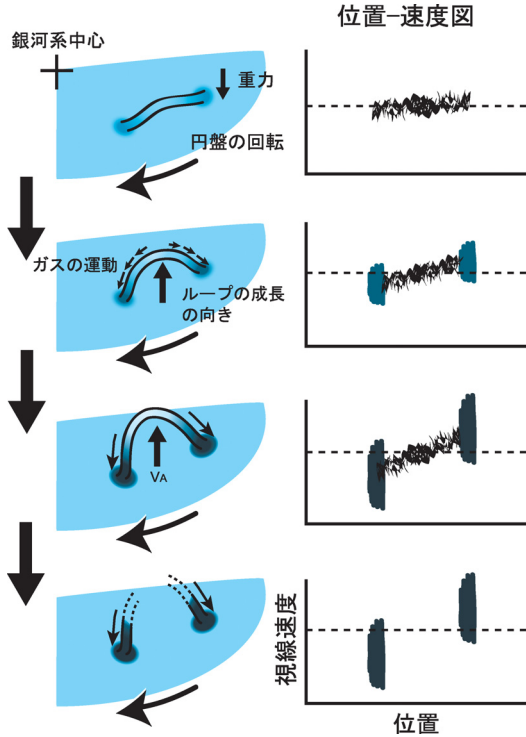


図4 左の一連の絵が、ループが形成される様子を模式的に示したもの。右にその段階ごとの位置-速度図の模式図を描いた。

5. まとめと今後の展望

今回の分子雲ループ（ループ 1, 2）の発見は銀河系中心から 500 pc ほど離れた分子雲が比較的少ない領域において、銀緯方向に高く存在していたため可能であった。これは分子雲が多量に存在する中心部 300 pc 以内では視線上に分子雲が多く重なっており、個々の分子雲を分離することが困難であったためである。しかし、パーカー不安定性は磁場と重力に支えられたガス層では普遍的に起こる現象であり、ループ 1, 2 以外にもまだ多数のループが埋もれている可能性は高い。

では、この磁気ループが銀河系中心に広く存在していたとして、それが周辺環境に及ぼす影響はどのようなものが考えられるだろうか？ まず上でも述べたようにガスの落下により円盤部でガス

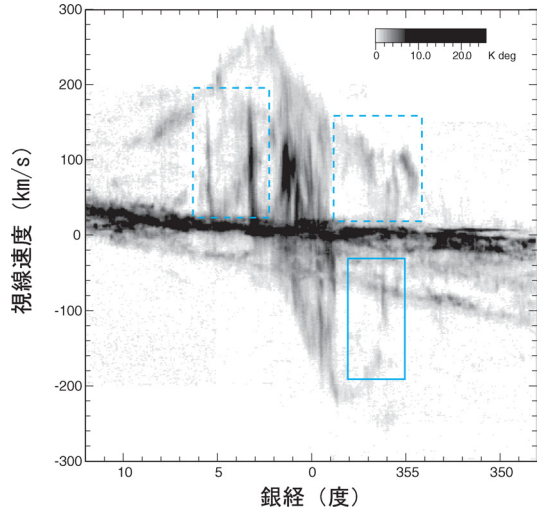


図5 図1を銀経-速度図で描いたもの。実線の青枠が図4と同じ領域を示した。点線で囲んだ領域に、今回発見されたループ同様の特徴的な速度幅の広い成分があることがわかる。

の加熱と激しい運動を起こすことから、銀河系中心部で長く謎であった、ガスの大きな速度分散と高い温度を説明できる可能性がある。また、銀河系中心でのガスの運動の全体像を提示することも考えられる。これは銀河系中心の星形成、ひいては銀河全体の進化にも直結する重要な課題である。特にループの根元では衝撃波により分子雲の効率の良い圧縮が示唆される。 10^5 太陽質量程度の高密度ガス塊が形成されることにより、銀河系中心特有のスーパースタークラスター形成につながる候補と考えられる。ここでの星形成の研究が、新たな星団形成研究の糸口を与えうる。さらに、太陽表面現象との比較により、磁気再結合などの現象を銀河規模でも特定する可能性があり、銀河系中心部を磁気流体力学の貴重な実験室として活用することができる。

これらを踏まえ、われわれは引き続き「なんてん」の銀河系中心のデータ解析を進めた結果、図5に示した領域に、いくつかの広い速度幅をもち、銀河面から浮き上がったループ状構造をしている分子雲があることを確認した。現在、それらに対

し今回のモデルが適応できるかの調査を進めている。また、ASTE 望遠鏡, NANTEN2 望遠鏡を用いた CO の高励起線観測を実施した。これらの解析作業も現在は進行中であり, 分子ガスの温度・密度を詳細に決定することが期待される。また, ループの全体像を解明するためには, 分子雲観測だけでなく, 理論との密な比較検討が必須である。同時に, 「ひので」ほかによる太陽観測との交流が重要である。この新たな研究分野は既存の多岐の分野へとわたっており, そのため全貌解明の道は困難かと思われるが, その分, 各分野への波及効果は高く, 銀河進化の解明への大きな手がかかりとなることが期待される。

参考文献

- 1) Fukui Y., et al., 2006, Science 314, 106F
- 2) Morris M., 2006, Science 314, 70F
- 3) Morris M., 1988, IAUS 184, 331
- 4) Parker E. N., 1966, ApJ 145, 811P
- 5) Matsumoto R., et al., 1988, PASJ 40, 171
- 6) Horiuchi T., et al., 1988, PASJ 40, 147
- 7) Bally J., et al., 1988, ApJ 324, 223

Magnetically Floated Loops in the Galactic Center

Kazufumi TORII, Motosuji FUJISHITA, Natsuko KUDO, and Yasuo FUKUI

Department of Astrophysics, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Abstract: The galactic center is a scene of many remarkable phenomena, such as massive black hole and strong concentration of molecular gas. Wide filed imaging of CO ($J=1-0$) with NANTEN has revealed huge loops of dense molecular gas. We present a magnetic flotation model to explain the origin of these loops. This model shares the common physics of solar loops, but size scale is ~ 12 orders of magnitude bigger. The model can offer clues for understanding of longstanding puzzle in the Galactic Center.