

銀河系中心領域の磁気雲のダイナミクス

柿内 健佑 (名古屋大学大学院 理論宇宙物理学研究室)

概要

銀河系内の原子や分子といった星間物質の観測から、銀河系中心領域におけるガスの運動は卓越した非円運動を示していることが知られている。銀河系中心領域では磁場が比較的強く、磁気活動によって引き起こされたと考えられるガスの運動や構造が観測でも得られていることから、この非円運動の原因にも磁場が影響を及ぼしていることが推察される。Suzuki et al. (2015) は、軸対称な重力ポテンシャルでの銀河系における大規模 3 次元磁気流体シミュレーションを行った。数値計算によって得られた銀河経度-視線速度 ($l-v$) 図には、観測の $l-v$ 図に見られる非軸対称な平行四辺形構造が描画されており、銀河系中心領域における磁気活動が動径方向の流れを励起させることで、非円周運動になることを示した。しかし、鉛直方向の速度成分についてはまだ十分な解析がなされていない。そこで、本研究では同数値計算の結果を用いて銀河系中心領域の鉛直方向の速度について解析を行った。現在までの解析の結果、数値計算の $l-v$ 図内で高い視線速度が励起されている領域に対応する場所で銀河面の上空から銀河面に向かって急激な下降流が存在していることが判明したので、それについて議論する。

1 はじめに

銀河系中心領域におけるガスの運動は卓越した非円運動を示していることが観測的事実として知られている。この非円運動を説明するシナリオとして、銀河系のパーポテンシャルによる軌道共鳴や中心ブラックホールの過去の活動による膨張活動などが提案されているが、銀河系中心領域の構造は非常に複雑で未だ解明には至っていない。

一方で、銀河系円盤部の平均的な磁場の強さが μG 程度であるのに対し、銀河系中心領域の磁場は mG 程度であるという複数の観測的示唆がある (Morris et al. 1992)。磁場はガスの運動に大きな影響を与えるため、銀河系中心においてその運動や構造に重要な役割を果たしていると考えられる。近年、観測された銀河系中心方向のガスのループ (Fukui et al. 2006) やフィラメント構造 (Torii et al. 2014) が、磁気浮力に起因するパーカー不安定性によって説明可能であることが磁気流体の数値シミュレーションによって明らかにされている (Machida et al. 2009)。シミュレーションによって得られた構造との関連性はまだ不明確ではあるものの、観測によって $l-v$ 図の高速度方向に伸びた成分も複数見つかっている (Oka et al. 1999; Torii et al. 2014)。

これらの結果を踏まえると、銀河系中心のガスの非円運動の原因を探る上でも、磁場の影響を考慮した解析が必要であることが示唆される。先行研究となる Suzuki et al. (2015) では、軸対称な重力ポテンシャルでの銀河系における大規模磁気流体シミュレーションを行った。その結果、パーポテンシャルを考慮しない軸対称の重力ポテンシャルを考慮した場合でも、磁気活動によりガスの非円運動が励起されるとの報告がなされた。本集録では先行研究である Suzuki et al. (2015) についてレビューを行い、先行研究の結果について更なる解析を行った結果を示す。最後に、観測から得られている予想を踏まえて、解析結果の考察を行う。

2 先行研究

2.1 数値モデル

外場として銀河の重力ポテンシャルを考え磁気流体力学の方程式を解くことによって、ガスの進化を取り扱った。外場の重力源として、超巨大ブラックホール (SMBH)・バルジ・ディスクを考え、式 (1) を

	$M_i(10^{10}M_{\odot})$	$a_i(\text{kpc})$	$b_i(\text{kpc})$
SMBH 1	4.4×10^{-4}	0	0
Bulge 2	2.05	0	0.495
Disk 3	25.7	7.258	0.52

表 1: 重力ポテンシャル

用いて軸対称な重力ポテンシャルを計算している。

$$\Phi(R, z) = \sum_{i=1}^3 \frac{-GM_i}{\sqrt{R^2 + (a_i + \sqrt{(b_i^2 + z^2)})^2}} \quad (1)$$

ここで、 R と z はそれぞれ円筒座標系における中心からの動径方向の距離と鉛直方向の高さを表している。計算上で扱うガスは磁場に付随する理想気体を考えており、重力と遠心力とガス圧勾配力が釣り合うような力学平衡状態から計算を開始させている。また、初期磁場として $R > 0.035\text{kpc}$ の領域に

$$B_z = 0.71\mu G \left(\frac{R}{1\text{kpc}} \right)^{-1} \quad (2)$$

を与えている。この数値シミュレーションは極座標系で計算されている。計算には加熱や冷却の効果は入れていない。

2.2 $l - v$ 図

図 1 は局所座標系からシミュレーション結果を疑似観測することで得られた $l - v$ 図である。ここでは、太陽系の位置が銀河中心から 8kpc 離れており、回転速度 240km s^{-1} で回転しているような局所座標系を仮定している (Honma et al. 2012)。ここで柱密度は、ある銀河経度の方向における個数密度を積分し、さらにそれを銀河経度方向に積分した量が描かれている。ただし、高さの上限値として、中心面から高さ $|z| < 0.2\text{kpc}$ 以内を積分範囲としている。図 1 の $l - v$ 図は非軸対称な平行四辺形構造を描画しており、観測の $l - v$ 図の特徴をよく再現できていることが分かった。

2.3 アウトフロー

流れの動径成分に関して詳細に解析を行ったところ、時間平均した正味のガスの流れは外側に向いて

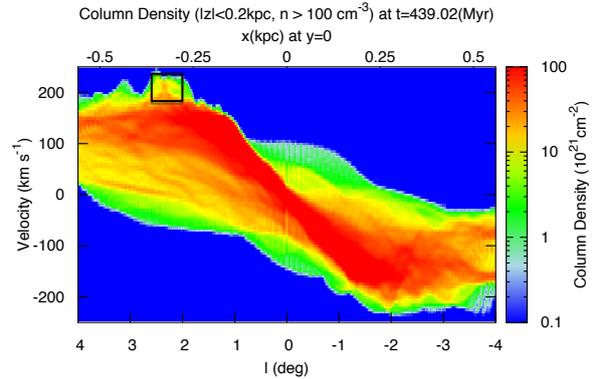


図 1: 銀河経度－視線速度図 (シミュレーション)。カラーは柱密度を表している。

いることが分かった。銀河中心領域では、磁気回転不安定性や磁力線の引き延ばしがより効果的になるため、より強い差動回転領域で磁場の大きく増幅される。増幅される磁場の強さは 0.5mG 以上に達し、空間的に独立な磁場の増幅が起こることで、乱流磁場を介した角運動量の不均一な輸送によって、動径方向のガスの流れが磁場を発生させる。加えて、磁気圧勾配力も同様の理由で動径方向の流れを運ぶ。結果として、シミュレーションの $l - v$ 図は磁気乱流の間欠性に従うような時間とともに変化する左右で非対称な平行四辺形構造を描画している。

3 本研究の目的

先行研究によって、磁気活動によって動径方向の速度成分が励起されることが示され、観測されている銀河中心領域のガスの非円周運動が磁場の増幅現象によって説明可能であることが明らかになった。一方、先行研究では動径方向の速度や磁場の構造について議論がなされているが、銀河面に対して鉛直方向の速度や磁場の構造については詳しい解析がなされていない。そこで本研究では、銀河経度 視線速度図に見られる構造と鉛直方向の速度との関係性について明らかにすることを目的としている。

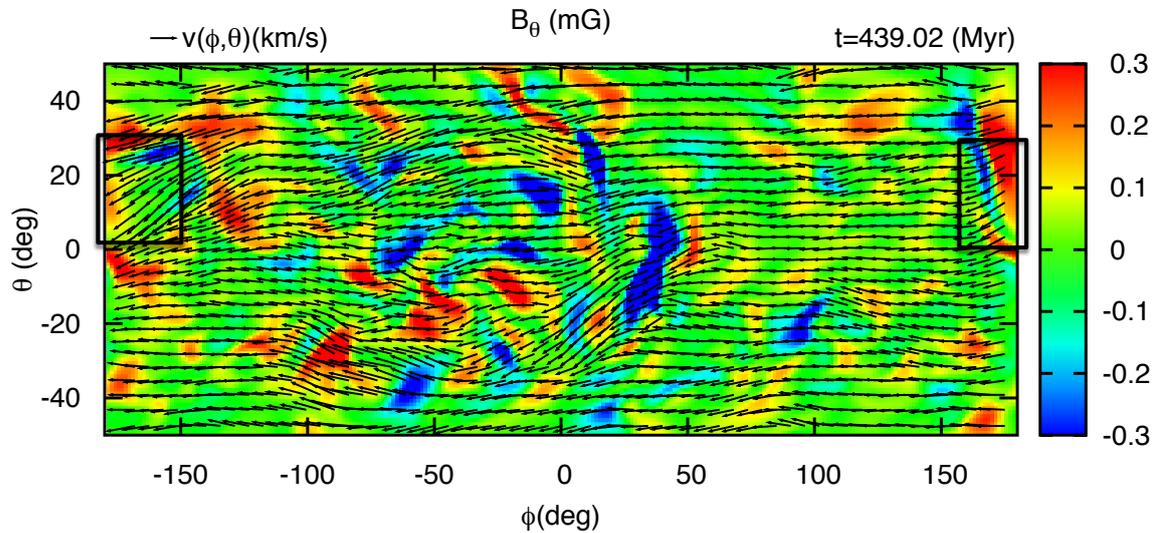


図 2: 銀河中心から距離約 0.35kpc 離れた位置での $\phi - \theta$ 図。銀河面は $\theta = 0^\circ$ の直線上である。カラーは磁場の θ 成分を表しており、赤が正方向、青が負の方向を示している。 θ 方向の磁場は縦磁場と見てよい。矢印はガスの流れの向きを表している。

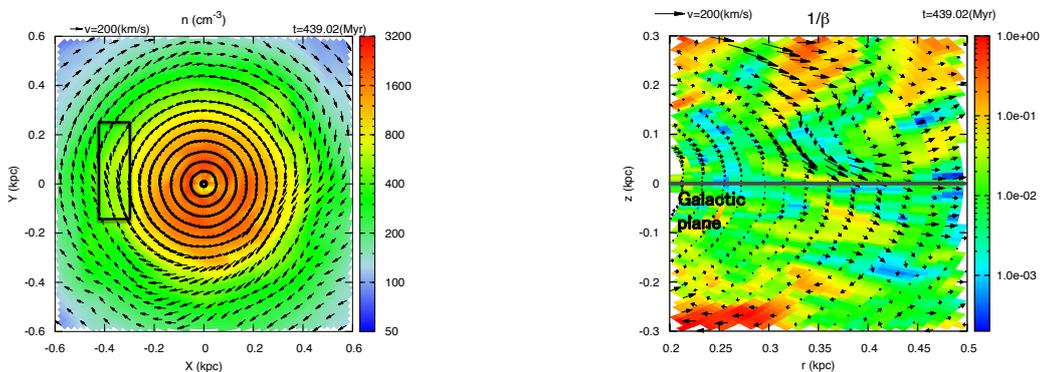


図 3: $\theta \sim 20^\circ$ の面を z 軸方向から見た正面図。カラーは個数密度を表している。矢印はガスの流れの向きを表している。図 4: $\phi \sim 160^\circ$ の断面図: $R-z$ 図。銀河面は、 $z=0$ の面。カラーは β の逆数を表している。矢印はガスの流れの向きを表している。

4 結果

先行研究によって行われた数値計算結果を用いて、銀河面に対して鉛直方向の速度に注目して解析を行った。まず、図 2 は銀河中心から約 0.35kpc 離れた球面を切り出し、横軸を ϕ 、縦軸を θ とする図である。イメージとしては、地球表面を長方形の平面地図で表

すのと似たような作図方法を採用している。カラーマップは θ 方向の磁場を描き、矢印はガスの流れる速度を射影して表している。図 3 は、銀河面からの仰角 θ が約 20° の面を銀河の真上から見たものであるとして作図した図である。カラーと矢印はそれぞれ個数密度とガスの流れる速度を射影して表している。図 4 は、太陽系の位置が $\phi = -90^\circ$ の方向に位置し

r(kpc)	θ (deg)	ϕ (deg)
(0.3, 0.4)	(+7, +28)	(-150, -180), (+180, +160)

表 2: 高い視線速度の範囲

ているとすると、 $\phi \sim -170^\circ$ のラインで銀河面の断面図を取り、横軸を中心からの動径方向の距離、縦軸を銀河面からの高さとする図である。ここで、カラーはプラズマ β 値の逆数を描いている。プラズマ β 値は磁気圧とガス圧の比を表しており、

$$\beta = \frac{P_{gas}}{P_B} = \frac{8\pi P_{gas}}{B^2} \quad (3)$$

で表される。

ここで、図 1 の黒枠で囲まれた領域に注目すると、局所的に視線速度成分が大きくなっていることがわかる。これと同様の特徴が観測でも見つかっていることから、観測結果は磁気活動由来の現象であることが予想される。この領域に対応する場所は表 2 に示した範囲である。図 2、3 において対応する領域を黒枠で囲んだ。図 2 を見ると、領域内で高速下降流が存在することが分かる。

5 考察

本研究の結果として、高い視線速度が疑似観測されることに対応する領域には下降流が存在することが分かった。図 2 や図 4 から分かるように、下降流が起こっている領域付近には、強い縦磁場が反転した特徴が見られる。また、下降流の根元では、磁気圧がガス圧に比べ小さくなっており、一度パーカー不安定性によって浮上したガスが磁気圧による支えを失い下降しているのではないかと推測される。この部分では、この下降流に伴う水平速度成分が視線方向を向いていたために、 $l-v$ 図での高速度構造として見られた。図 2 を見ると、注目した領域に限らず似たような下降流が他の場所でも見られる。これらは別の角度から見ると、また別な高い視線速度構造として観測できると考えられる。

6 結論

- 銀河系中心領域は円盤部とは異なり非常に卓越した非円運動をしている。銀河系磁場を考慮した数値計算によって得られた $l-v$ 図が観測結果を非常によく再現しており、この非円運動を説明することが可能であることが示されている。
- 銀河経度 視線速度 ($l-v$) 図に見られる特徴的な速度領域に注目し、数値計算結果の詳細な解析を行った。結果として、磁場に沿ったガスが銀河面に向かって急降下する流れが特徴的な速度異常をもたらしていることが分かった。
- 今後、さらなる解析を行うことで、非円運動と銀河系磁場の関連性を説明し銀河系中心領域の運動や構造の解明につながることを期待できる。

謝辞

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

研究を行うにあたりご指導くださった鈴木准教に深く感謝いたします。

参考文献

- Fukui Y. et al., 2006, Science, 314, 106
 Honma M. et al., 2012, PASJ, 64, 136
 Machida M. et al., 2009, PASJ, 61, 411
 Morris M., Davidson J. A., Werner M., Dotson J., Figer D. F., Hildebrand R., Nagai R., Novak G., Platt S., 1992, ApJ, 399, L63
 Oka, T., White, G. J., Hasegawa, T., et al. 1999, ApJ, 515, 249
 Suzuki T.K., Fukui Y., Torii K., Machida M., Matsumoto R., 2015, submitted ApJ, (ArXiv:1504.08065)
 Torii K., Enokiya R., Morris M. R., Hasegawa K., Kubo N., Fukui Y., 2014, ApJS, 213, 8