

HLLD 法による 3 次元磁気流体ジェットの計算 -ジェットと HI ガス、分子ガスの相互作用-

朝比奈 雄太

千葉大学宇宙物理学研究室 M1

概要

1918 年に巨大楕円銀河 M87 から噴出する宇宙ジェットが発見された。その後の観測により、活動銀河だけでなく、系内ブラックホールや原始星からも宇宙ジェットが噴出され、宇宙ジェットは様々な天体で発生する普遍的な現象であることが明らかになった。宇宙ジェットは星間ガスを圧縮し、星形成を促す事が近年観測的に示唆されており、宇宙ジェットの伝播メカニズムの解明は、宇宙物理学の最重要課題の 1 つである。宇宙ジェットは磁場と強く相互作用していることが理論的、観測的に示唆されており、磁気流体シミュレーションを行う必要がある。Miyoshi&Kusano(2005) によって提案された HLLD 法に基づく磁気流体コードを用いて磁気流体ジェットの伝播を調べた。

まず、三次元計算の前段階として二次元軸対称計算を円筒座標系で行った。鉛直方向にジェットを伝播させ、磁場によりどのように構造や伝播速度が変化するかを流体と磁気流体で計算し Roe 法に基づく Todo et al.(1992) の結果を再現することができた。MPI を用いて並列化されたコードを用いてジェットと高密度な星間ガスの相互作用のシミュレーションを実施した。

1 イントロダクション

Yamamoto et al. (2008) により SS433 から噴出するジェットの延長上の銀緯の高い位置に分子雲が発見された (図 1)。その周囲には密度の高い HI ガスが分布している。今回はジェットと HI ガスの相互作用が分子雲の形成を促すのではないかと考え、磁気流体ジェットと HI ガスの相互作用を調べた。

ジェットと星間雲との相互作用を調べたシミュレーションは多くない。Todo et al.(1993) は磁気流体ジェットが高密度領域を通過すると磁気捻れが蓄積し、キンク不安定性が成長してジェットが屈曲することを 3 次元磁気流体シミュレーションによって示した。

2 モデル

初期状態として $T=10^4\text{K}$ の温かい星間ガスと $T=10^{2-3}\text{K}$ の高密度な HI ガスの 2 つの領域が圧力平衡で接しているとし、温かいガスの 10%の密度のジェットを注入する。ジェットはジェットの軸に垂直なトロイダル磁場を持つものとした。計算スキームは、近似リーマン解法の一つである HLLD 法 (Miyoshi & Kusano 2005) に基づく、円筒座標系 2 次元の磁気流体コードを用いた。ジェット半径は 1pc を仮定し、動径方向に 25pc、ジェットの伝播方向に 80pc の領域を 250×1600 メッシュで断熱変化を仮定して計算を行った。速度は温かい星間ガスの音速、密度は温かい星間ガスの初期密度で規格化している。

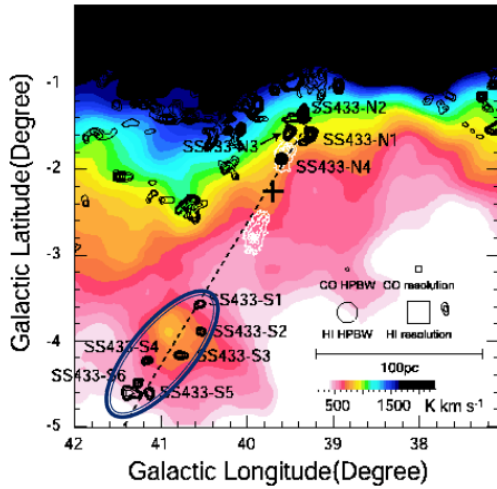


図 1: SS433 のジェットの見張りに分布する分子雲と高密度 HI ガス。黒いコンターが分子雲、カラーコンターが HI ガスを表している。(Yamamoto et al. 2008)

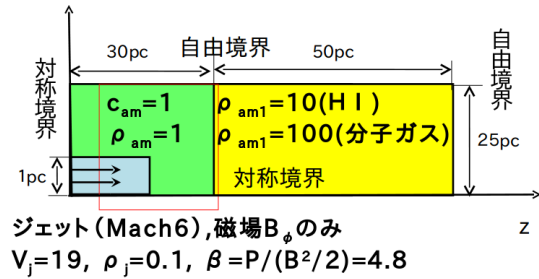


図 2: モデルの模式図.

3 結果

図 3、図 4 から HI ガスはジェットのバウショックにより加熱・圧縮されていることがわかる。その圧縮は強い衝撃波の極限である 4 倍程度であった。HI ガスとの衝突によりジェットは太くなり、ジェット先端からのバックフローがジェットの速度の約 55% から約 70% に強くなった。今回考えた条件ではバックフローの強さは衝突する領域の密度に依らなかった。また、ジェット内部の最高温度は衝突しても約 10^6 K とほとんど変わらなかった。今回のシミュレーションではジェットにのみ磁場を与えているので、磁場の分布している領域からジェットの領域を見ることができる。図 6 からジェットが衝突しないときのジェット半径が 5 pc 程度であるのに対して、HI ガスと衝突した場合は HI ガスがある右の領域では約 8-10 pc、HI ガスがない左の領域では 15 pc 以上と太くなっていることがわかる。また、トロイダル磁場がジェット先端で強くなっており、コクーンの表面に分布していることもわかる。

HI ガス($\rho = 10$)との相互作用

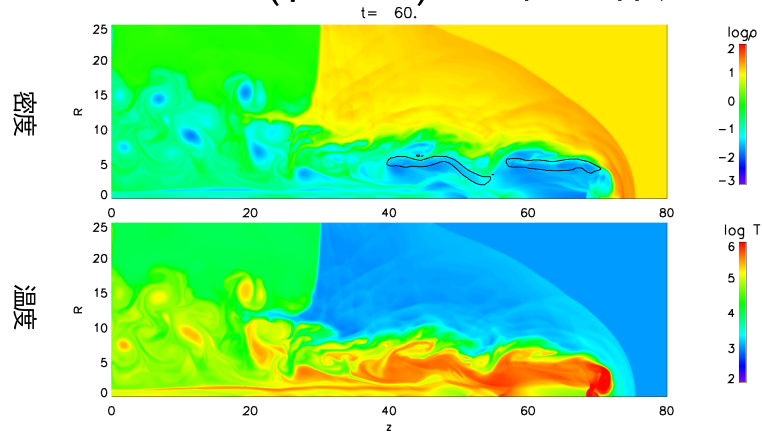


図 3: HI ガスとジェットとの相互作用。上が密度分布、下が温度分布。黒線で囲まれた領域はバックフローの速度がジェットの速度の 25%以上になる領域

分子ガス($\rho = 100$)との相互作用

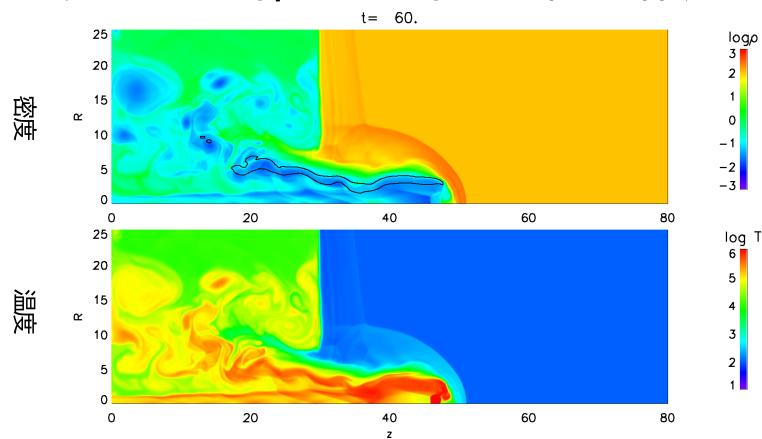


図 4: 分子ガスとジェットとの相互作用。上が密度分布、下が温度分布。黒線で囲まれた領域はバックフローの速度がジェットの速度の 25%以上になる領域

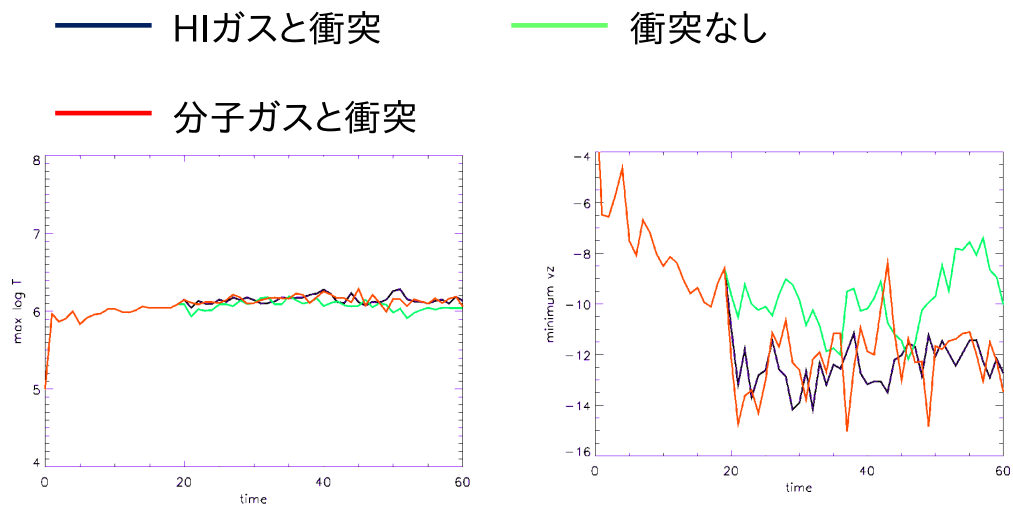


図 5: 左がジェット内部の最高温度の時間変化のグラフ。右がバックフローの速度の時間変化。バックフローの速度は負になっているので下の方が強くなる。両方とも横軸に時間をとっている。

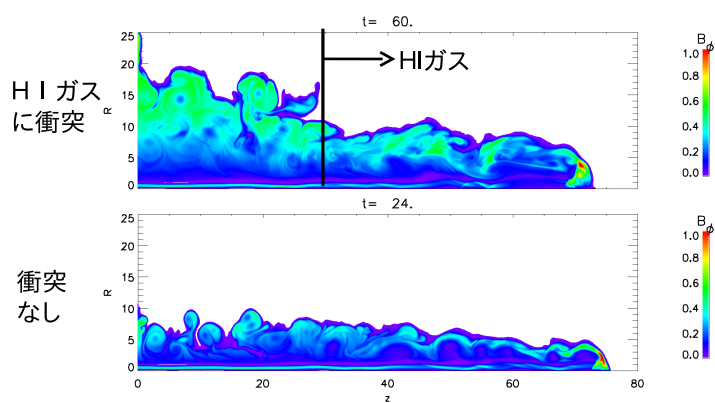


図 6: トロイダル磁場の分布。

最後に冷却効果について考える。冷却関数は Inoue et al. (2006) のものを用いた。図 7 の黒線が熱平衡にある状態になっており、黒線より上の領域が冷却優勢な領域、下の領域が加熱優勢な領域となっている。ジェットにより加熱・圧縮された HI ガスは図のように熱的に不安定な状態になり、その後暴走冷却を起こし低温・高密度な状態へと遷移するであろう。このように分子雲の形成には冷却効果が重要であると考えられる。

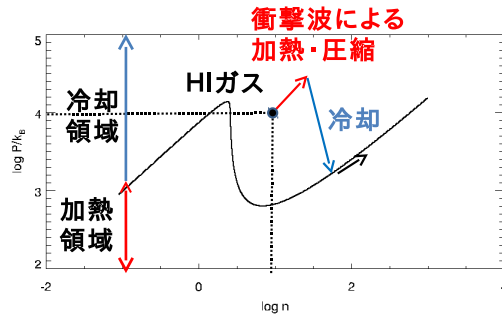


図 7: 冷却関数。

4 まとめ

HI ガスはジェットにより加熱・圧縮されるが、断熱変化では劇的な圧縮は起きず分子雲は形成されない。分子雲の形成には冷却効果が大きな役割を果たしていると考えられる。

参考文献

- [1] Inoue, T., Inutsuka, S., & Koyama, H. 2006, ApJ, 652, 1331
- [2] Miyoshi, T., & Kusano, K. 2005, J. Comput. Phys., 208, 315
- [3] Todo, Y., Uchida, Y., Sato, T., & Rosner, R. 1992, PASJ, 44, 245
- [4] Todo, Y., Uchida, Y., Sato, T., & Rosner, R. 1993, ApJ, 403, 164
- [5] Yamamoto, H., et al. 2008, PASJ, 60, 715