

磁気駆動ジェットとambient gasとの相互作用

出口真輔(熊本大学)

Cooling flow問題を解決するモデルの一つとしてAGNジェットによるものがある。M.Ruszkowskiら(2004)はAGNによる加熱とそれによる音波でCooling flow問題の解決を試みている。一方、我々はAGNジェットが直接ambient gasを加熱するモデルを検討している。

特に、磁場により駆動されるジェットを考えている。具体的には、境界条件で印加したトロイダル磁場の磁気圧によりプラズマを加速、収束させることでジェットを駆動する。今回は同時に、境界からガスを注入することでもジェットを作り、両者の違いを調べることに重点を置く。

1. 数値シミュレーションの設定

CANSを用いて、2次元平面内(軸対称 $r-z$ 平面内)で以下の条件で計算を行った。

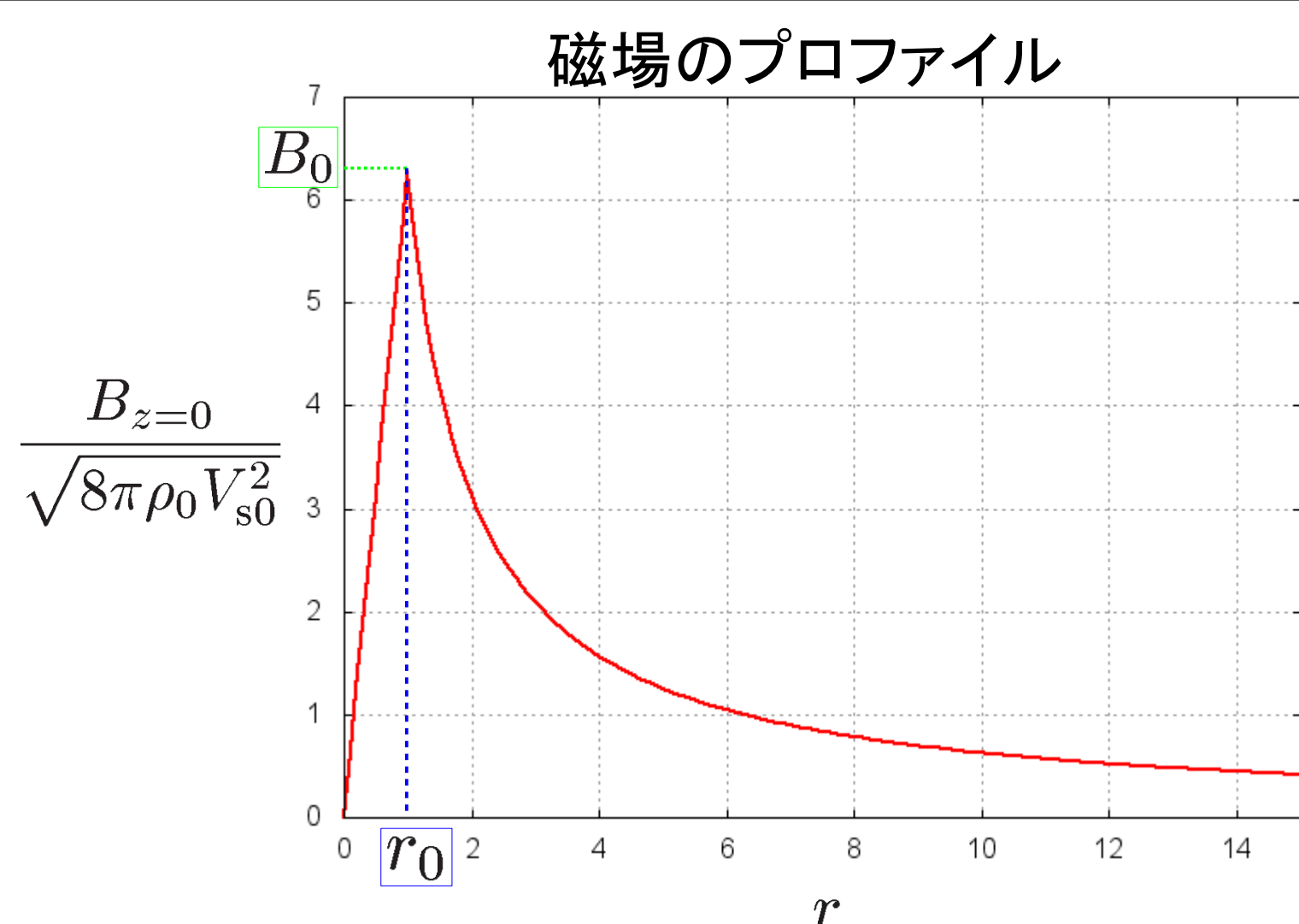
初期条件($t = 0, z > 0$)

磁場: $B = 0$ 密度: $\rho = 10 \rho_0$ 圧力: $p = 1.0 \rho_0 V_{s0}^2$

境界条件($t \geq 0, z = 0$)

$$B_{z=0} = \begin{cases} B_0 \frac{r}{r_0} & (r < r_0) \\ B_0 \frac{r_0}{r} & (r > r_0) \end{cases}$$

密度: $\rho = \rho_0$



基礎方程式(2次元円筒座標系)

質量保存: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$

運動量保存: $\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p - \nabla \left(\frac{B^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$

エネルギー保存: $\frac{\partial}{\partial t} \left(e + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \nabla \cdot [(e+p)\mathbf{v} + \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})] = 0$

誘導方程式: $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ (理想MHD)

ρ : 密度
 \mathbf{v} : 速度
 p : 圧力
 t : 時間
 \mathbf{B} : 磁場
 $\gamma = 5/3$: 比熱比
 $e = p/(\gamma - 1) + \rho v^2/2$

3. まとめ

- 境界条件としてトロイダル磁場を置くだけで、ジェットが形成された。
- ガスを注入したジェットとほぼ同じ形状であった。
- 双極ジェットを考える際に、境界からガスを注入する計算だと、ジェットの根元で問題が起こるが、この機構だと問題は起こらない。そういった意味で、この設定はjetとambient gasの相互作用を考える上で重要になると思われる。

4. 今後の課題

- 磁気エネルギーほとんどが境界を離れた直後に解放されているが、この距離を何が決めるのか？
- トロイダル磁場を置いただけでうまくコリメートされたジェットを作ることができた。コリメートされたジェットの半径は何で決まるか？
- Cooling flow問題に関してジェットによるambient gasの直接的な加熱について考える。

(※) ジェットの速度の見積もり

ジェットの根元付近のプラズマの速度 境界の磁気エネルギー全てがその領域のプラズマの運動エネルギーに変わると仮定したときのジェットの速度は

$$V = \left(\frac{\int_0^{r_1} r B^2 dr}{\int_0^{r_1} r \rho dr} \right)^{1/2} \quad (\text{今回の計算では, } r_1 = 15)$$

今回の磁場を使って計算すると $V \simeq 1.5$ なので、この速度でガスを注入することでもジェットを作り、比較する。

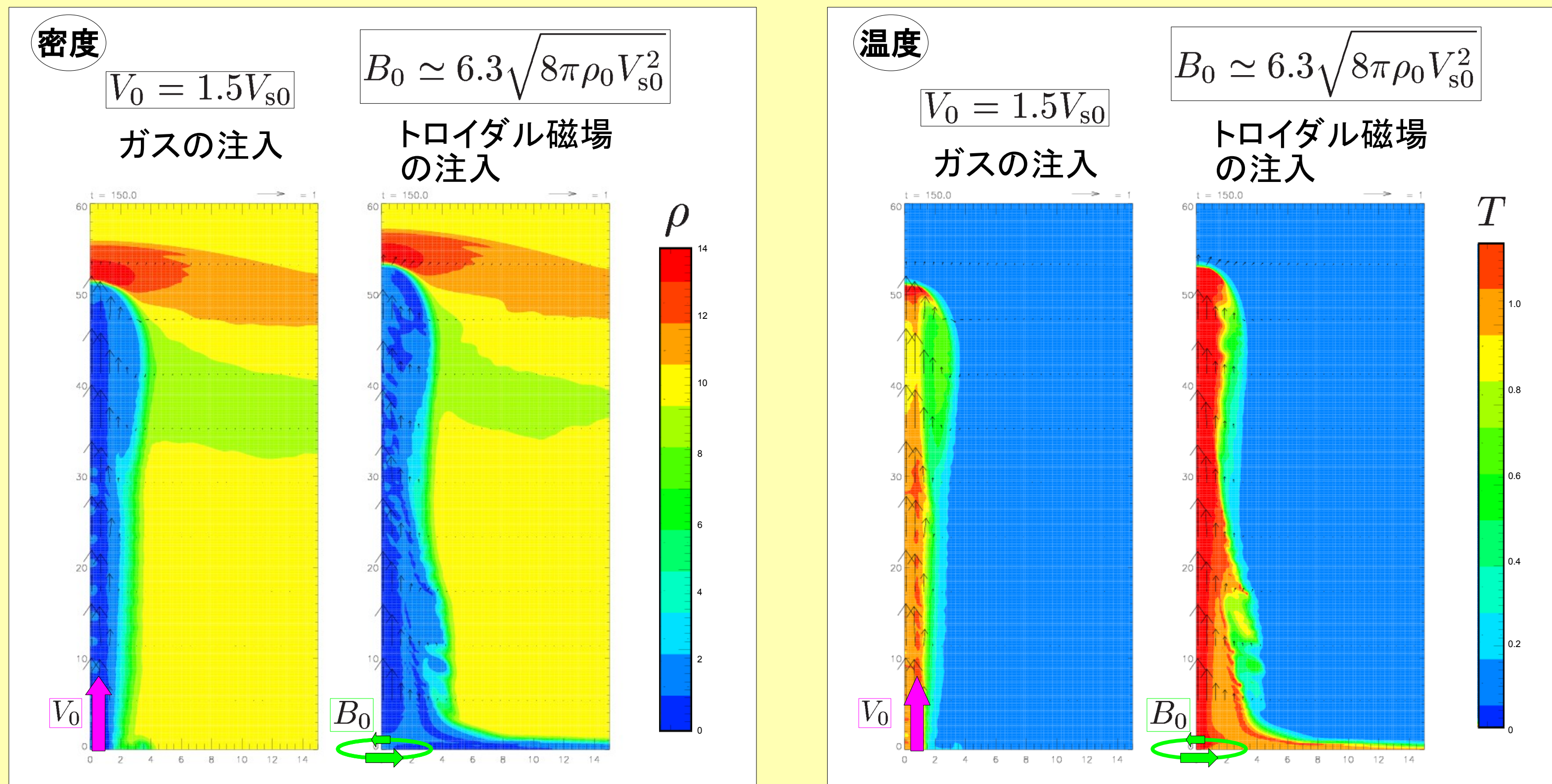
ジェットの先端速度 Wiita et al.(1990)によると、ジェットヘッドの速度とジェット自体の速度の関係は

$$V_{\text{head}} = \frac{\eta^{1/2}}{1 + \eta^{1/2}} V_{\text{jet}} \quad \left(\eta = \frac{\rho_{\text{jet}}}{\rho_{\text{amb}}} \right)$$

ρ_{jet} : ジェットの密度
 ρ_{amb} : ambient gasの密度

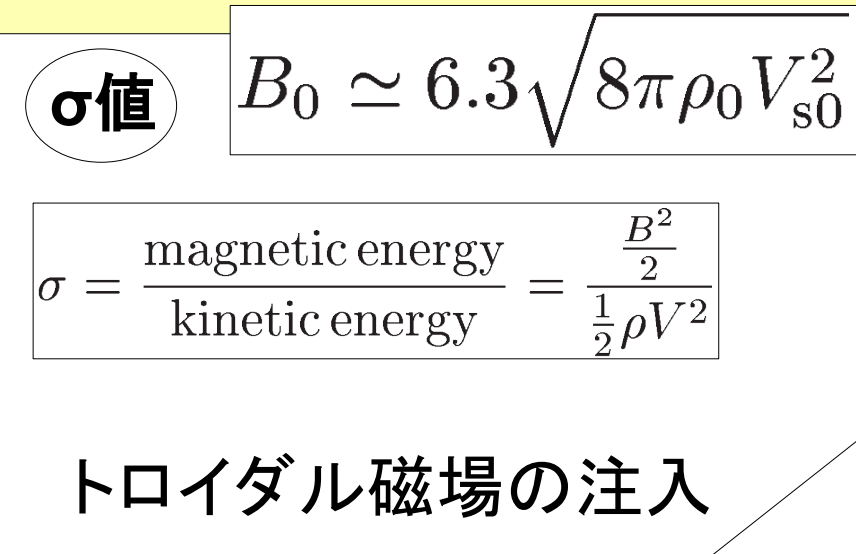
この式が今回の磁気駆動ジェットについても成り立つかも調べる。

2. 結果



ほぼ同じ形。ジェットヘッドの速度が音速を越えているため、両方でBow shockが見える。右図において、 $z=10$ 付近でケルビン・ヘルムホルツ不安定性も見える。

磁気駆動によるジェットのほうがジェット中心の温度が高い。トロイダル磁場のピンチ力により、ガスが圧縮されていると思われる。

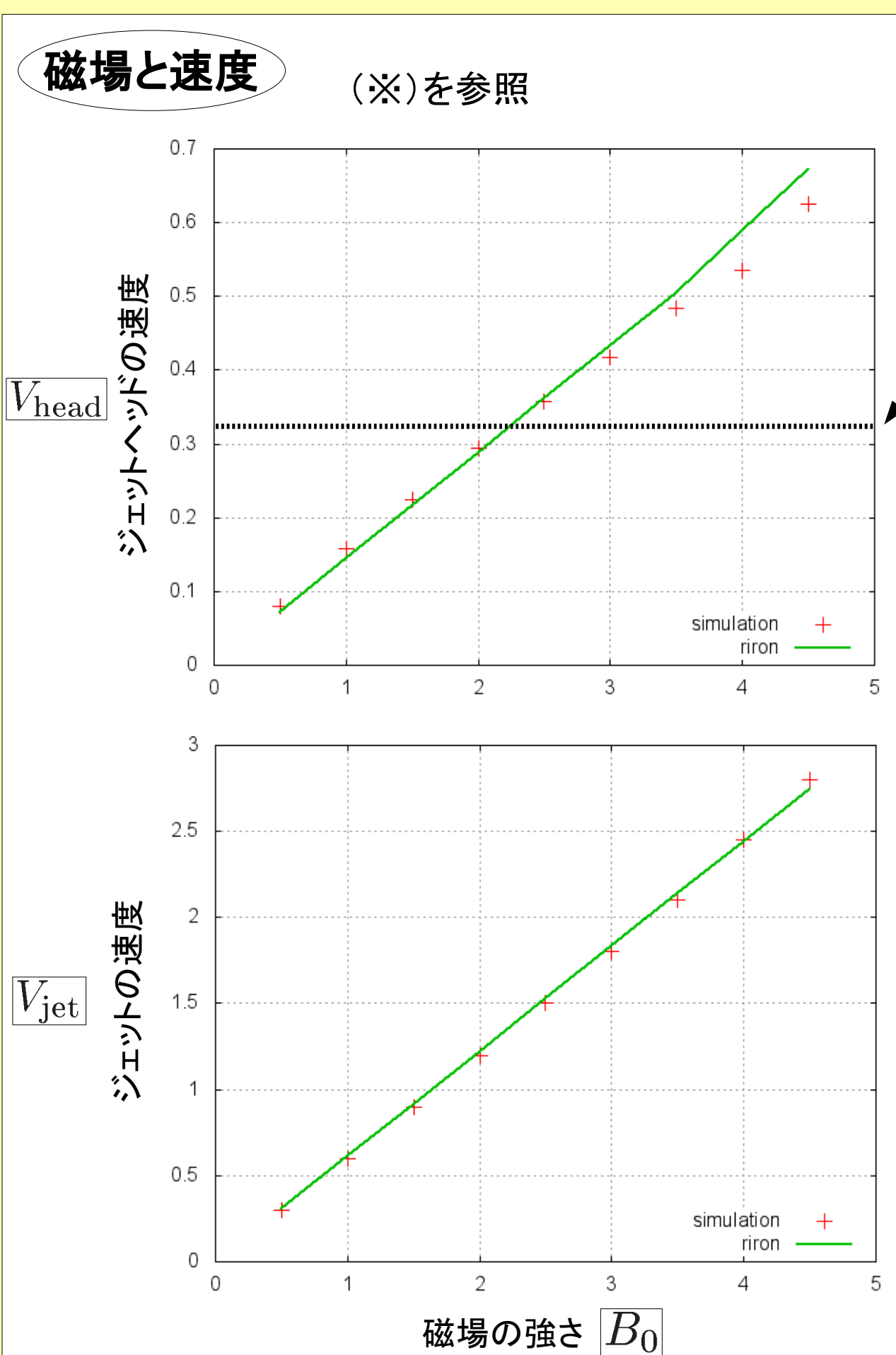


磁場優勢の(赤い)部分[上]は単に、バックフローにより平均速度が小さくなったために相対的に磁場が大きくなり、 σ 値が大きくなったと考えられる。

磁場優勢の(赤い)部分[下]は、密度の図からも見られるようにケルビン・ヘルムホルツ不安定性による渦が発生したことにより平均速度が小さくなり、 σ 値が大きくなったと考えられる。

磁気エネルギーのほとんどが $z \sim 2$ で解放されている。この値を決めているのは何か？

ジェットの軸付近では、境界($z=0$)を離れすぐに磁気エネルギーが運動エネルギーに変わっている。



計算結果で得られた V_{jet} から求めた V_{head} (riron) と、計算結果から直接測った V_{head} (simulation) 速度が大きいところで少しずれが見られる。

磁場 B から求めたジェットの速度 V の解析解 (riron) と、磁気駆動ジェットの計算で得られたジェットの速度 (simulation)。

かなり一致している。ただ、磁気エネルギーが全て運動エネルギーに変換されると仮定しているのに、計算結果のほうが大きい所があるのはなぜか。

References

- Ruszkowski, M., et al. 2004, ApJ, 611, 158
- Wiita, Rosen, & Norman, 1990, ApJ, 350, 545