

# 3次元MHDジェットの伝播による 物理量の変化

大石(京大基研)、廣島(宇宙線研)、松尾(京大)、村田(筑波大)、結城(筑波大)、和田(筑波技術大)

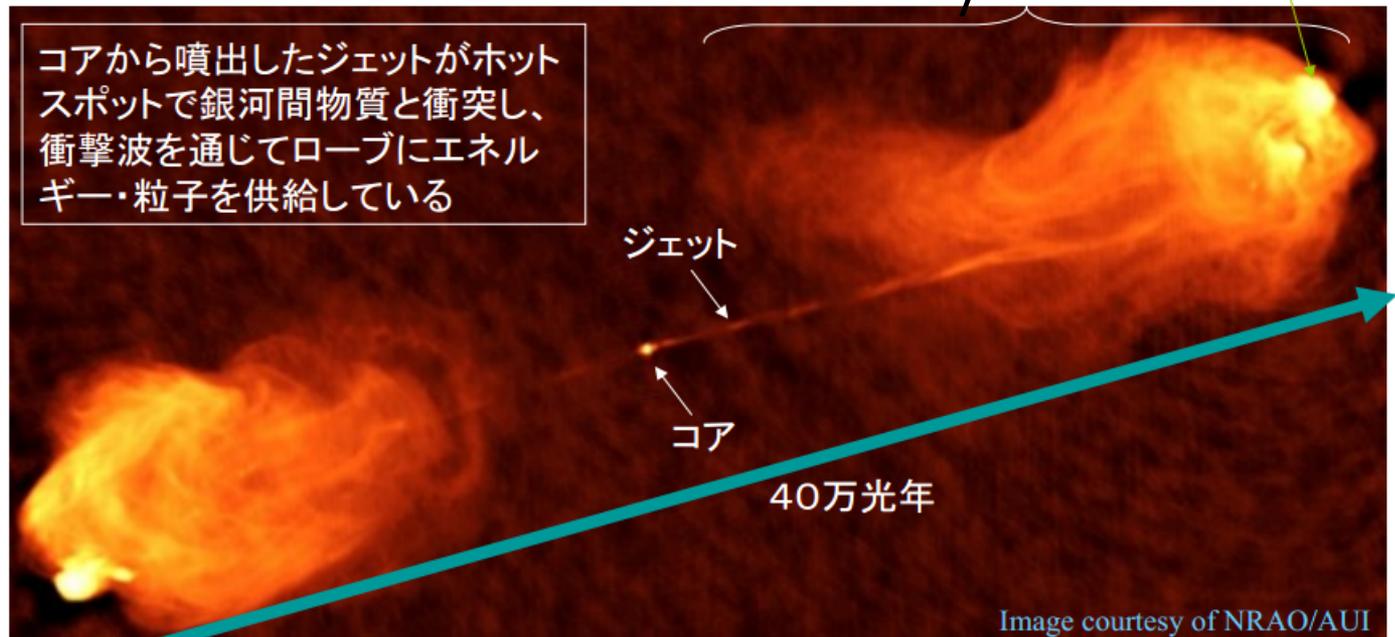
# 内容

- ・MHDジェットとは
- ・パラメータを変えた実験
- ・結果と考察

# MHDジェットとは

- 原始星ジェット
- AGN
- マイクロクェーサー
- GRB

- AGNの例(CygA)



<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/~kenta/radioastro/radioastro-10.pdf>より

# ジェット形態学の重要性

- ・電波による構造の観測  
ジェット伝播を数値計算



各パラメータ

- ・磁場
- ・密度
- ・比熱比 etc...

のジェット構造への影響を理解

- ・ジェット構造  
超音速



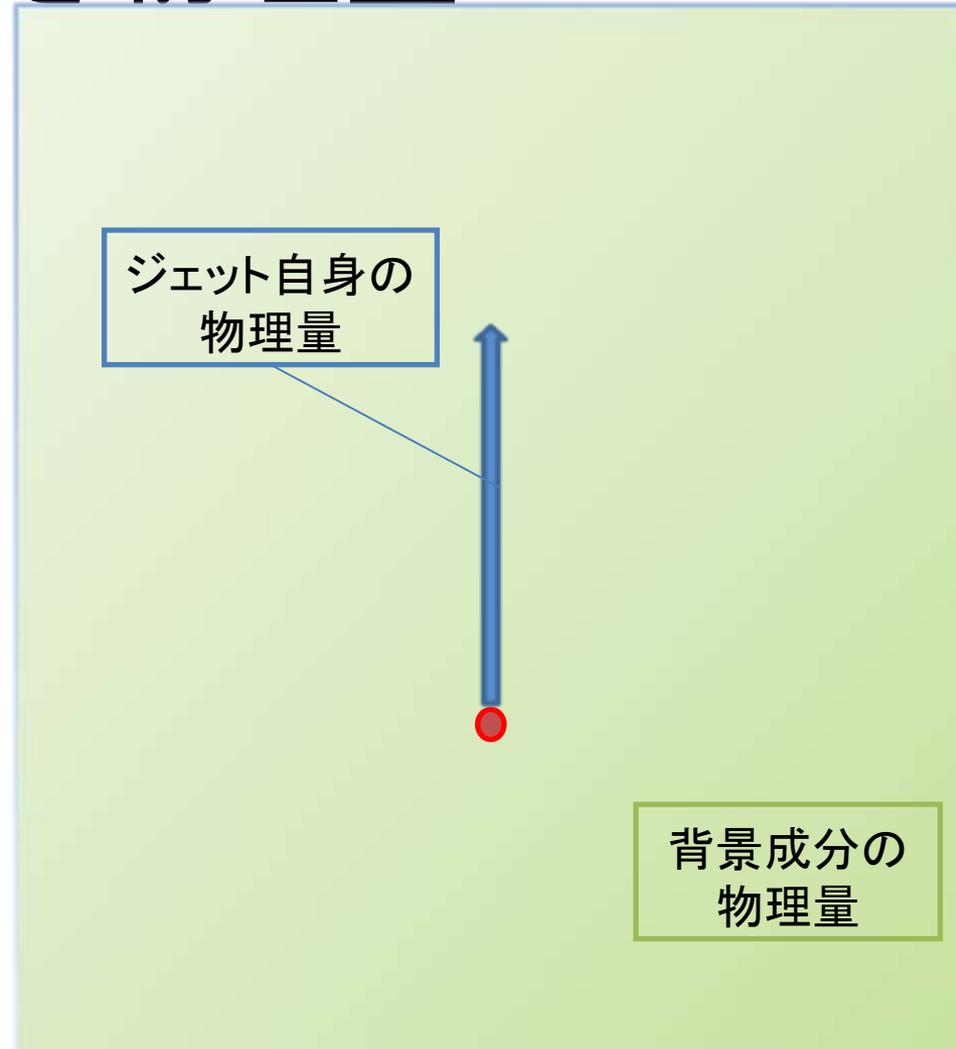
ショック形成

・粒子加速  
・宇宙線起源

の定量的理解

# 考えるべき物理量

- ・密度  $\rho$
- ・圧力  $P$
- ・温度  $T = P / \rho$
- ・比熱比  $\gamma$
- ・速度場
- ・磁場 (強度、形状)
- ・エネルギー
  - プラズマ  $\beta = P / (B^2 / 2)$

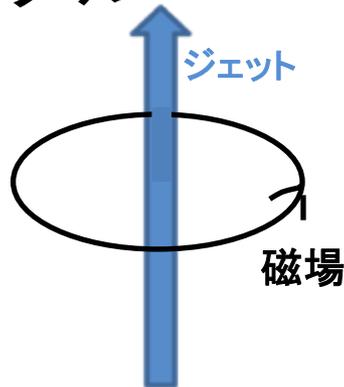


# パラメータを変えて実験

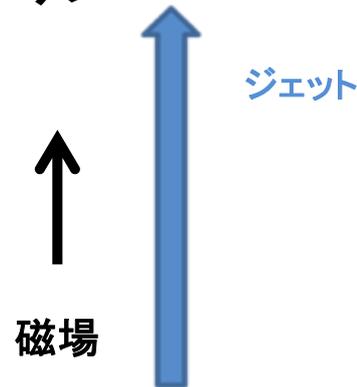
- 比熱比  
 $\gamma = 4/3, 7/5, 5/3, 2$

- 磁場形状

トロイダル



ポロイダル



その他

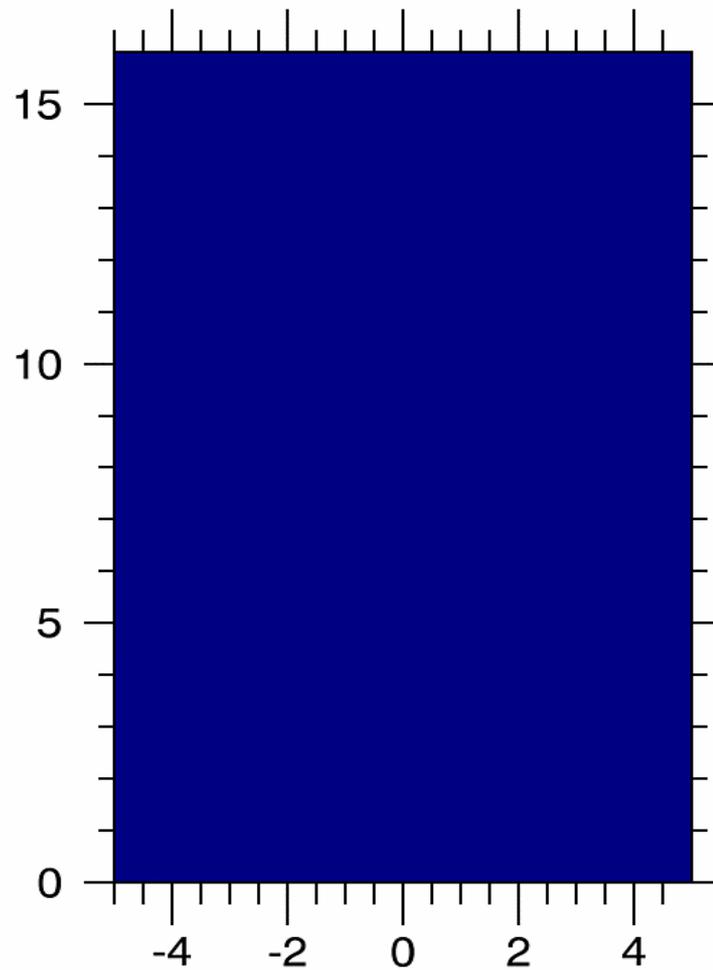
- 密度比



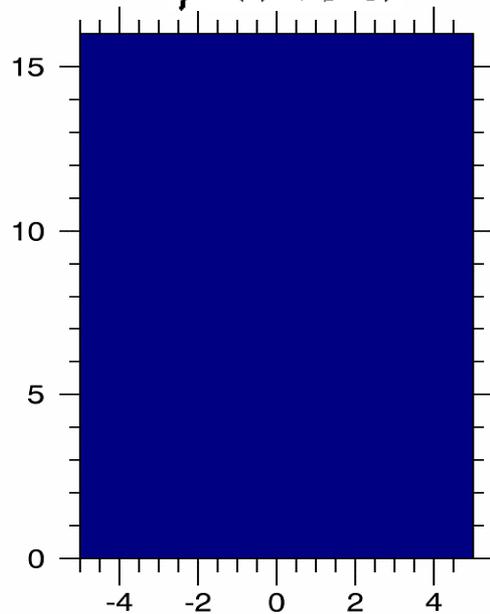
磁場強度

# Jetの構造

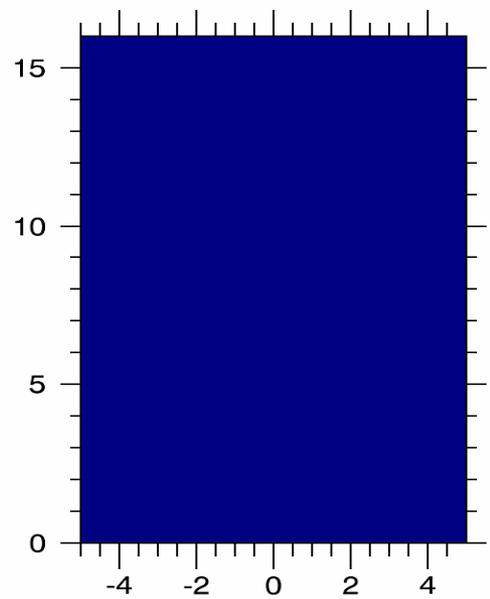
$\rho$  (密度)



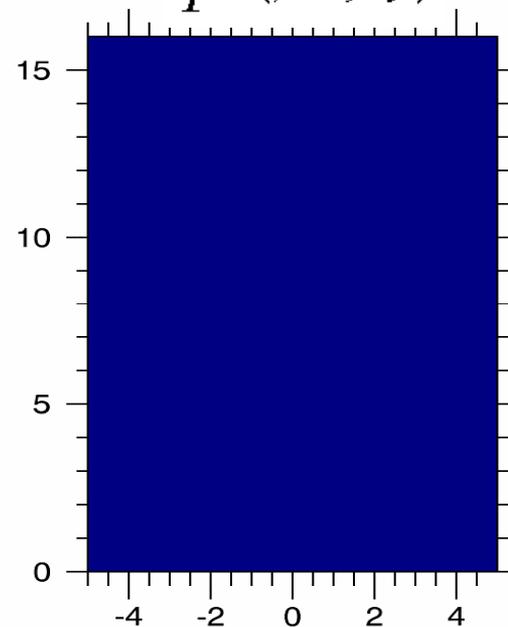
$\rho$  (密度)



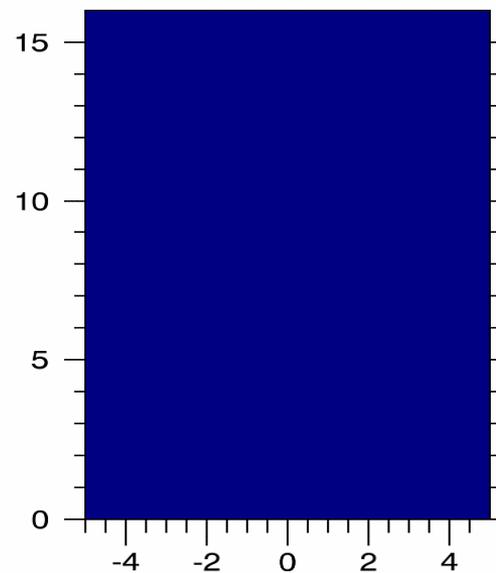
$T$  (温度)



$p$  (圧力)

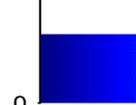


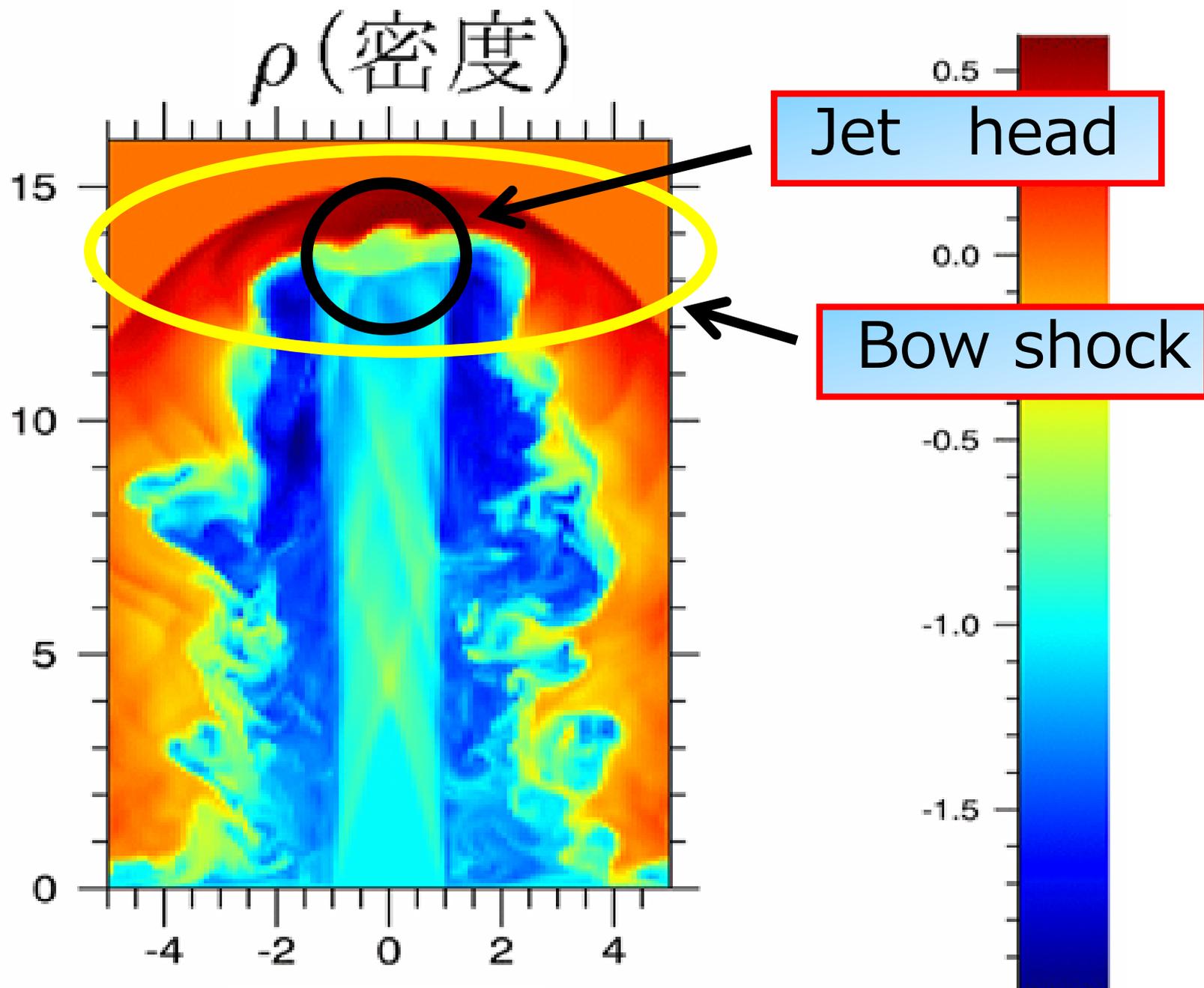
$\beta$  (ガス圧と磁気エネルギーの比)

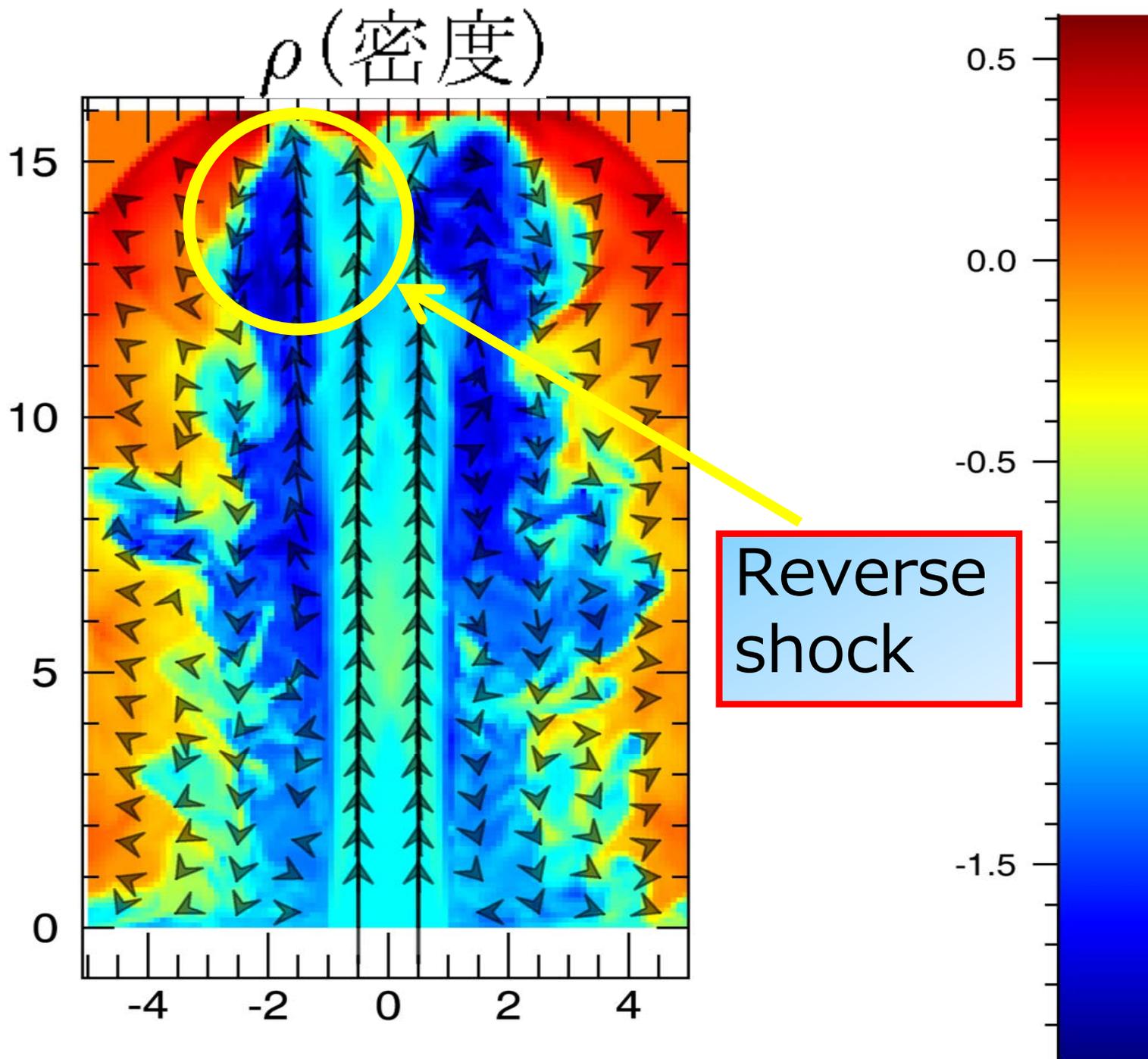


0

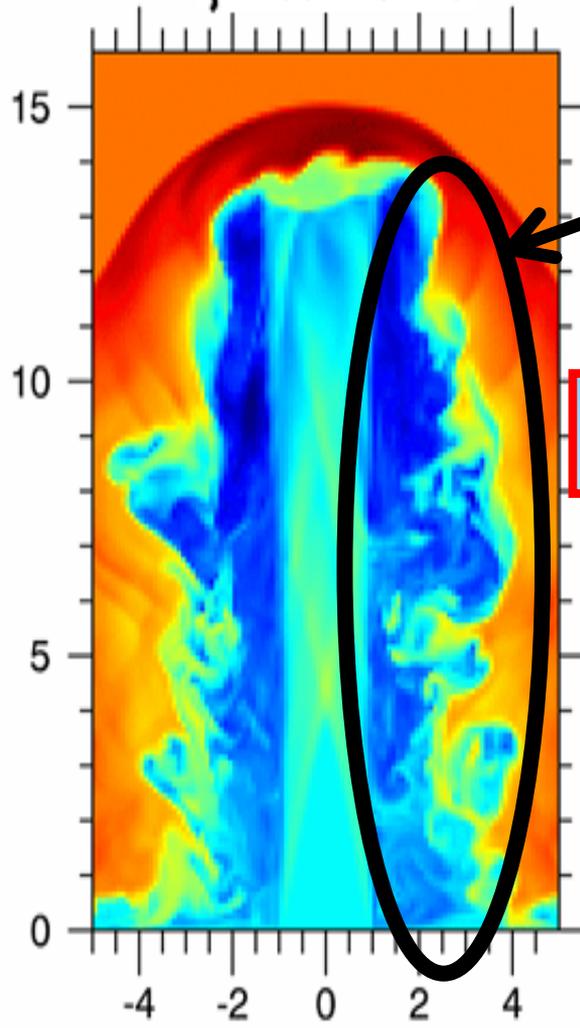
0



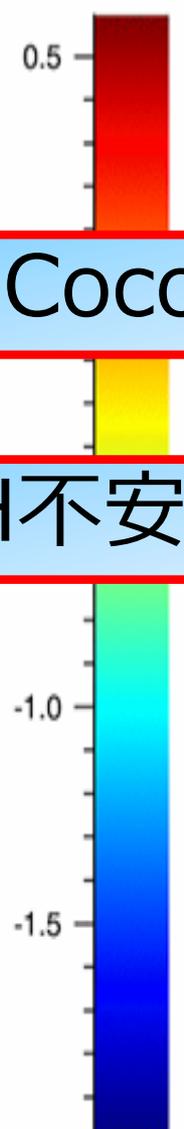




$\rho$  (密度)

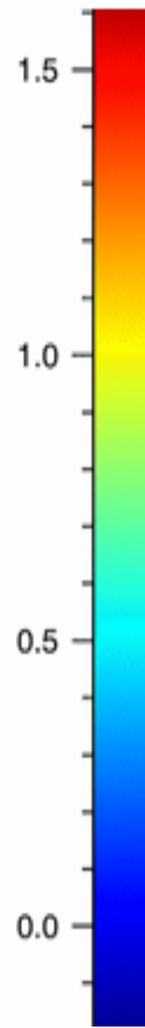
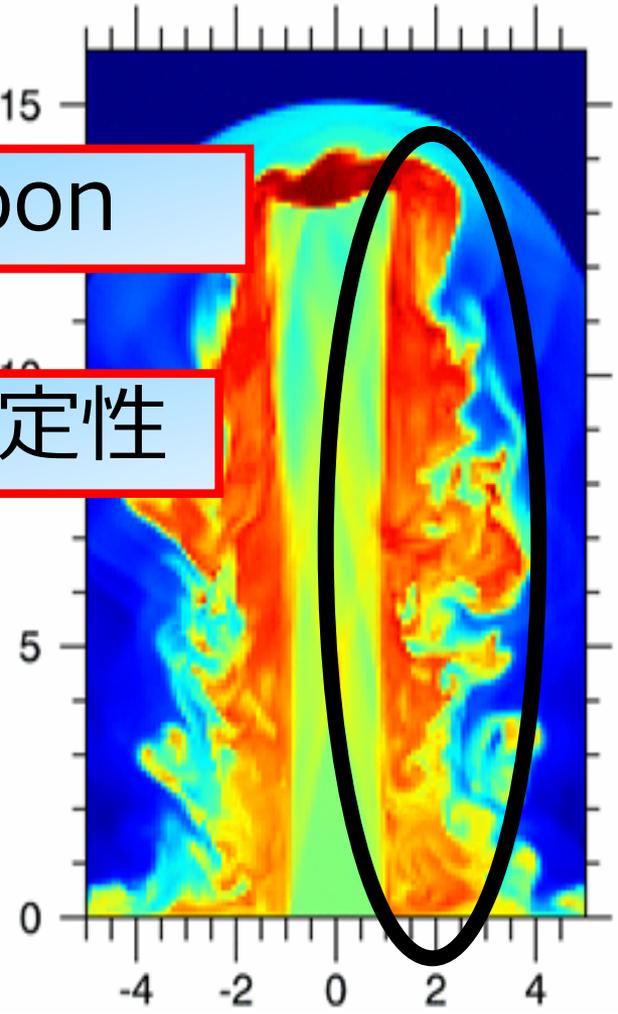


$T$  (温度)

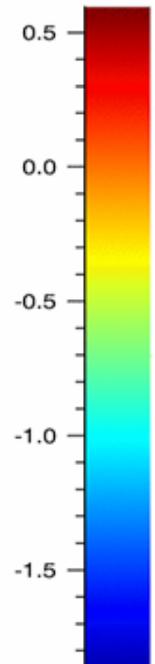
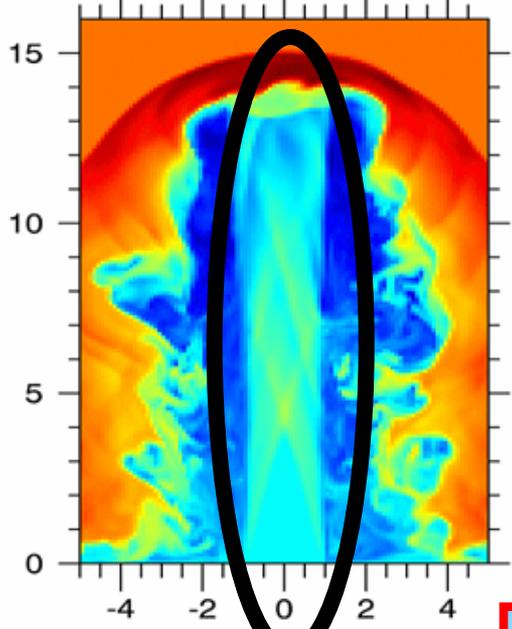


Cocoon

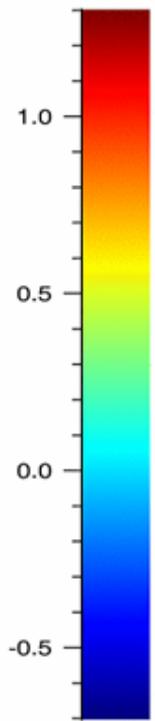
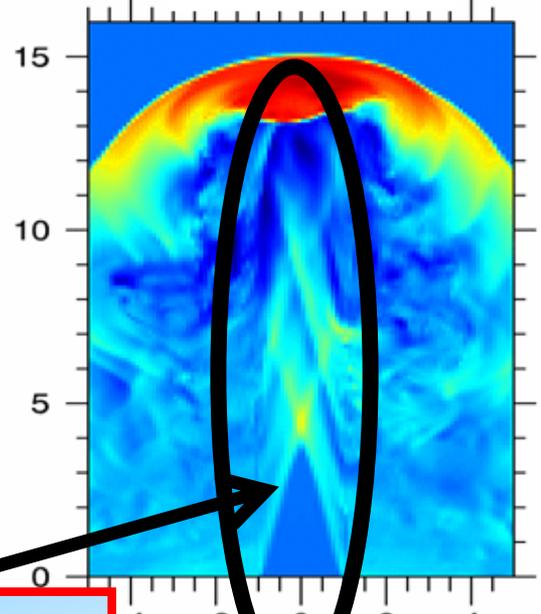
KH不安定性



$\rho$  (密度)

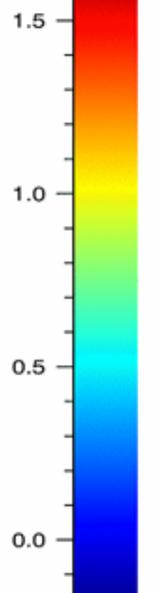
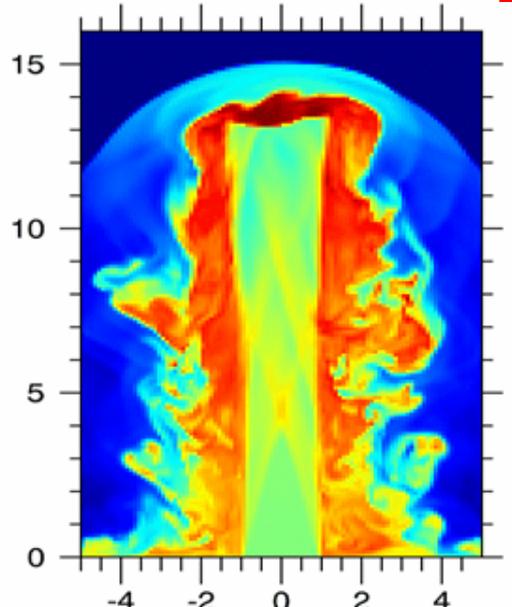


$p$  (圧力)

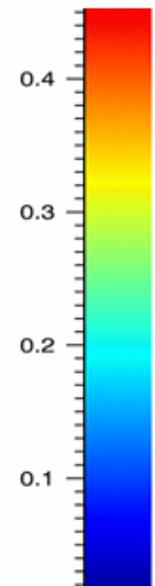
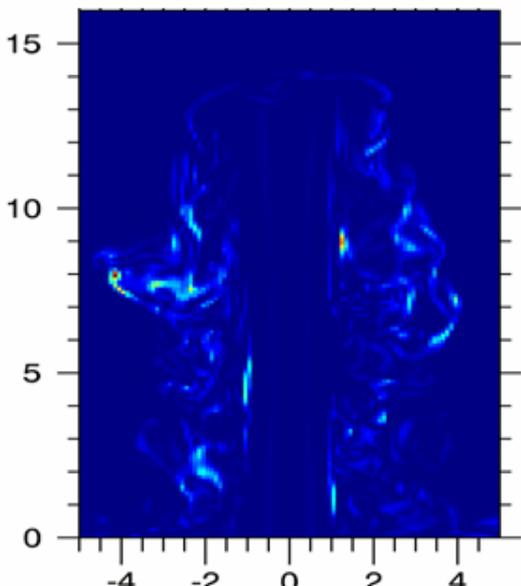


shock wave

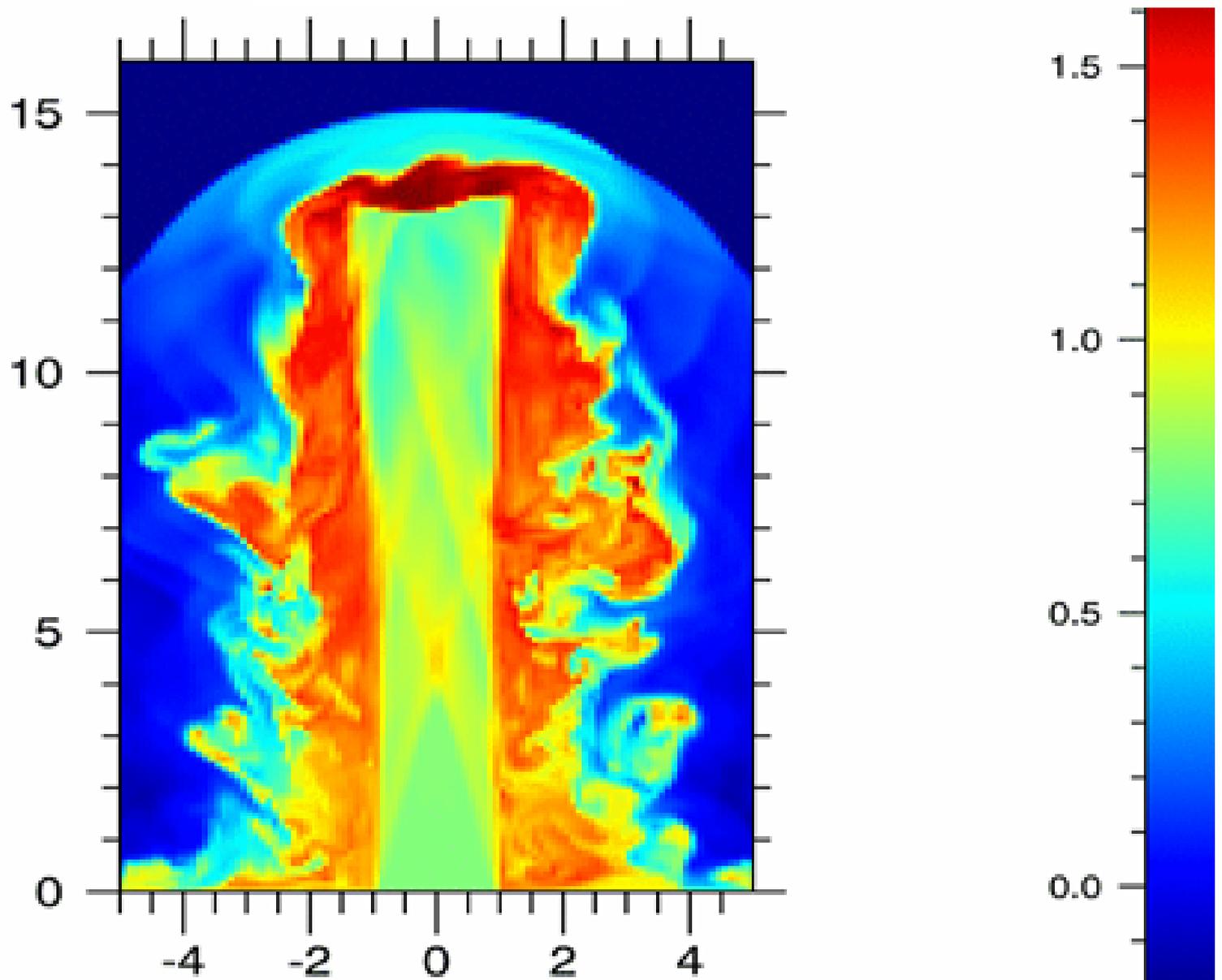
$T$  (温度)



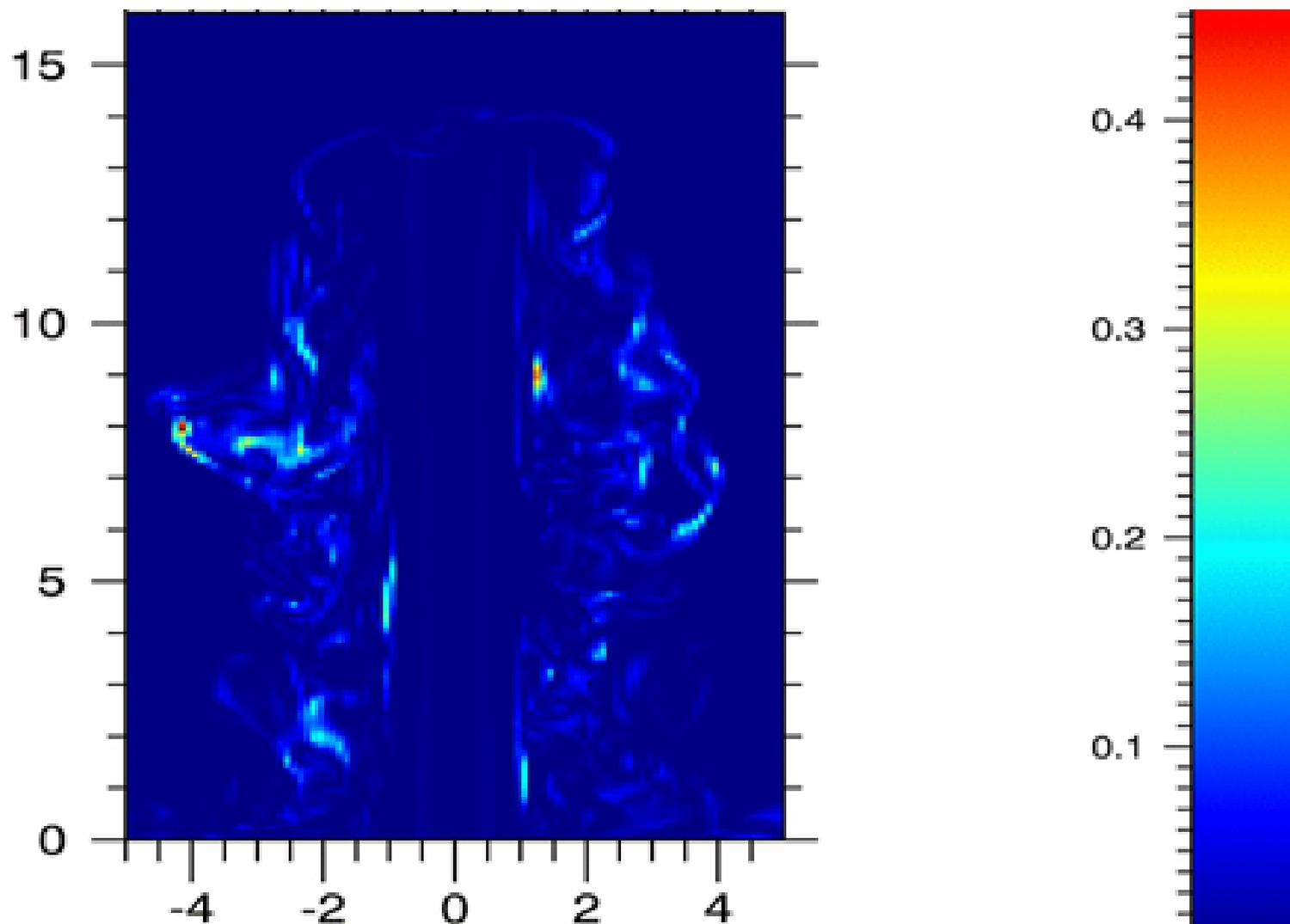
圧と磁気エネルギーの比)



$T$ (温度)



$\beta$  (ガス圧と磁気エネルギーの比)



# 磁場 (B) の強度による比較

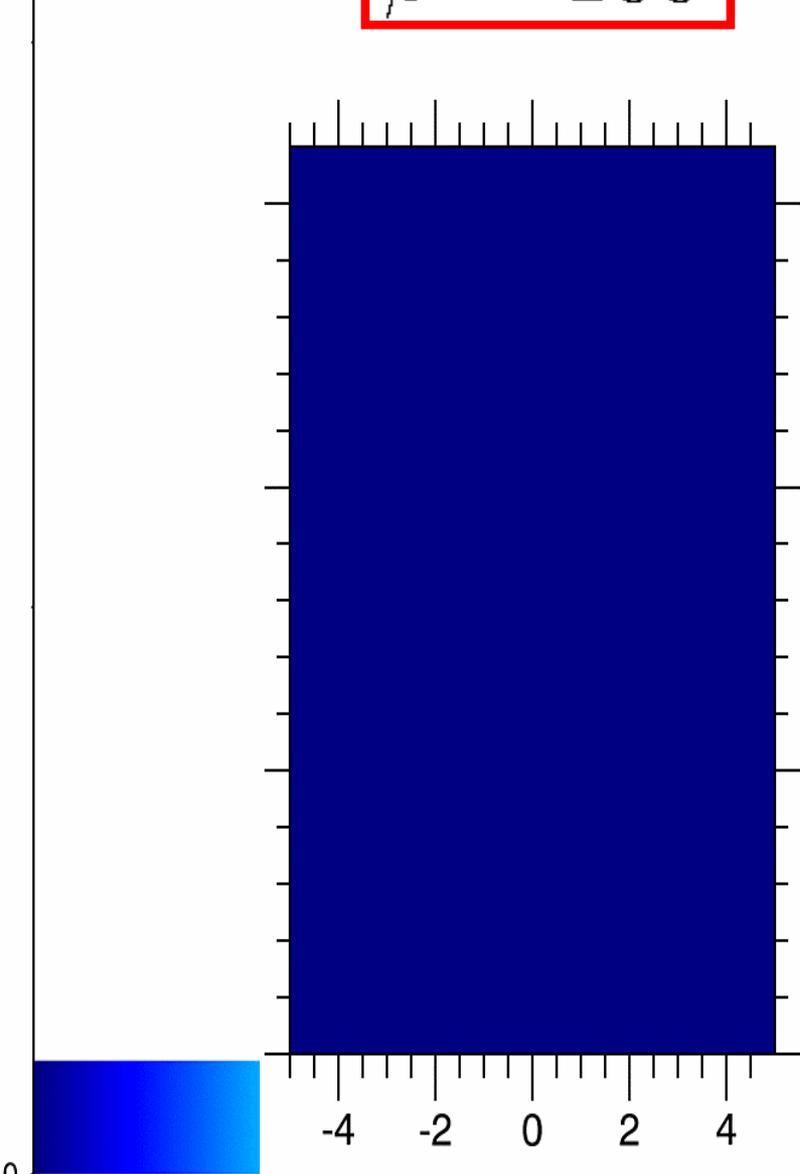
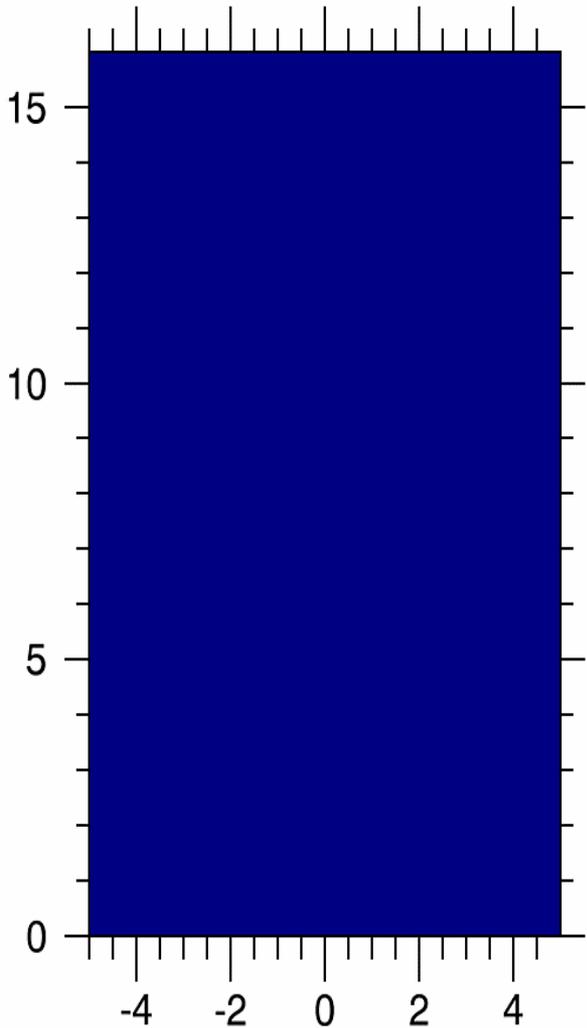
- 磁場形状 ⇒ トロイダル磁場
- プラズマ $\beta$  (ガス圧と磁気圧の比)

$$\beta = \frac{p}{B^2/2}$$

$$\beta = 5$$

$$\beta = \frac{p}{B^2/2}$$

$$\beta = 100$$



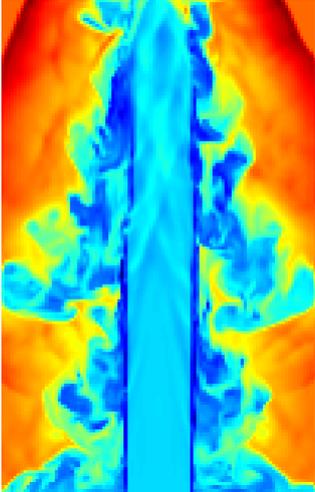
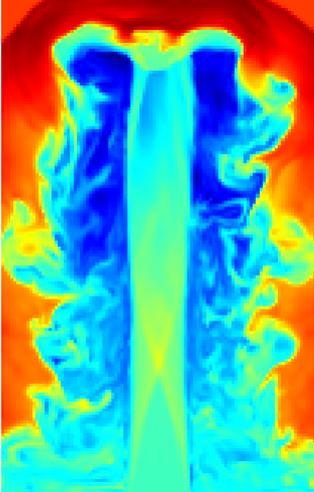
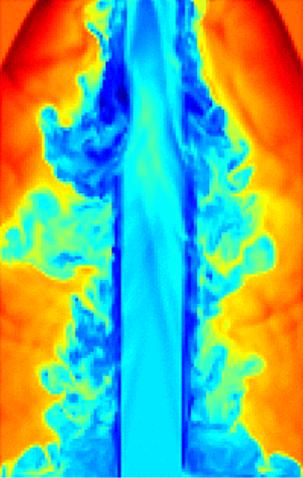
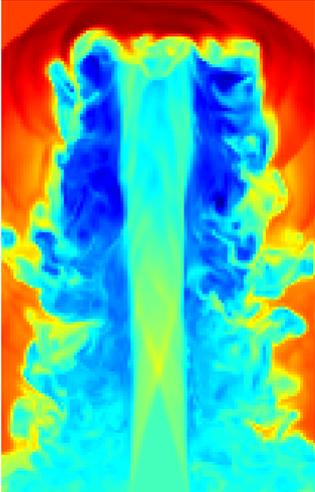
# Conclusion

- ・ 低磁気圧（プラズマ $\beta$ 大）では、あまりjetの構造に違いは見られなかった。
- ・ もっと磁気圧を大きくしてシミュレーションすれば、違いが見られるかもしれない。（課題）

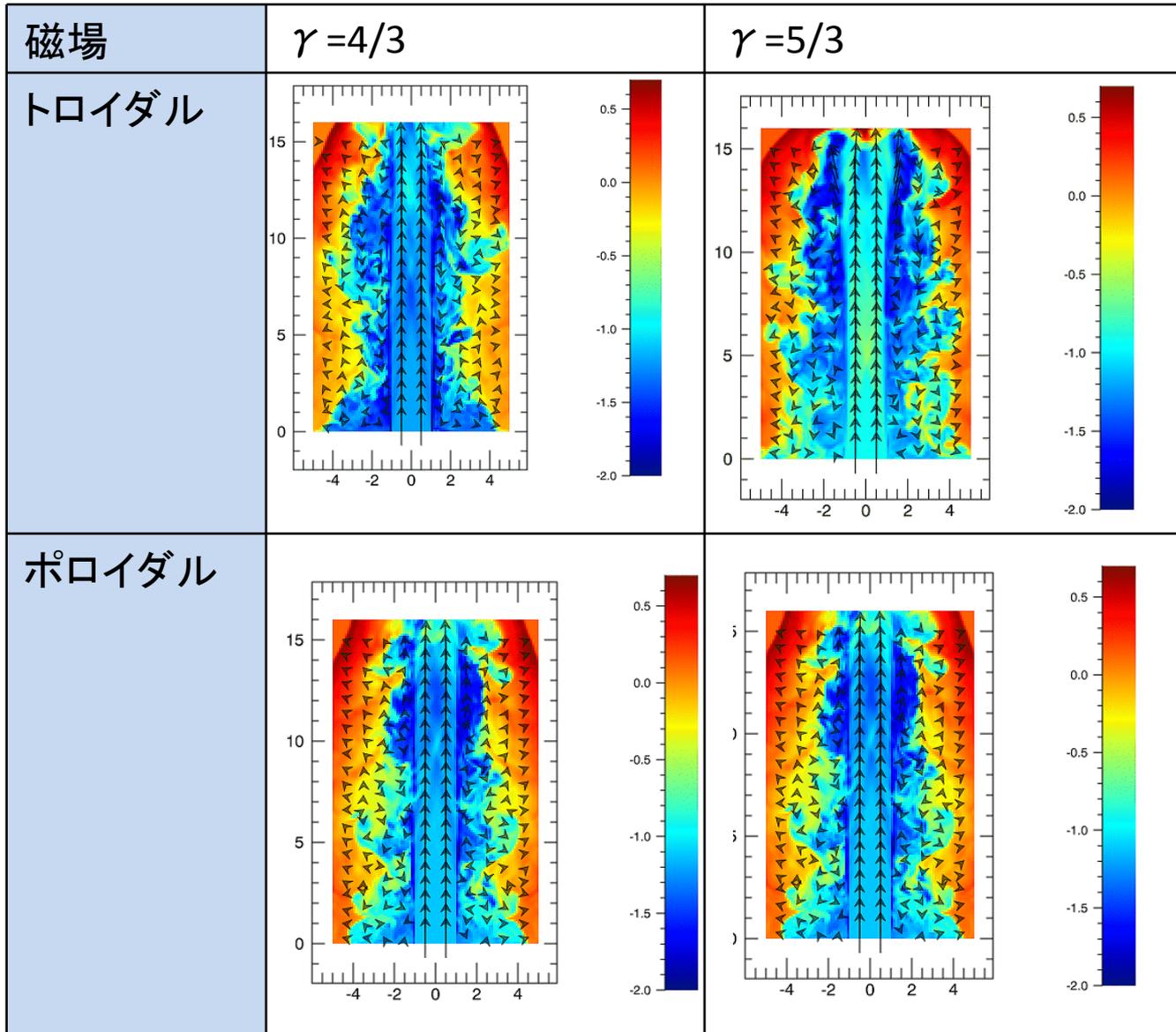
比熱比

# 比熱比

ジェット中心部の最終時間ステップにおける密度(logスケール)

磁場	$\gamma = 7/5$	$\gamma = 2$
トロイダル	 A vertical density plot showing a central jet with a blue core and yellow/orange outer regions, exhibiting some irregularities.	 A vertical density plot showing a central jet with a blue core and yellow/orange outer regions, appearing smoother than the gamma = 7/5 case.
ポロイダル	 A vertical density plot showing a central jet with a blue core and yellow/orange outer regions, exhibiting some irregularities.	 A vertical density plot showing a central jet with a blue core and yellow/orange outer regions, appearing smoother than the gamma = 7/5 case.

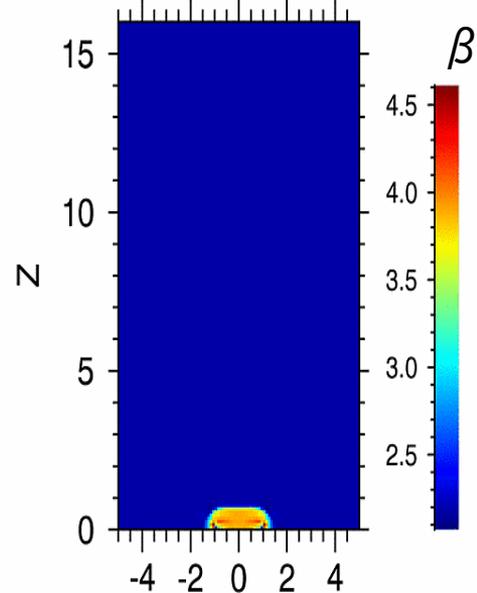
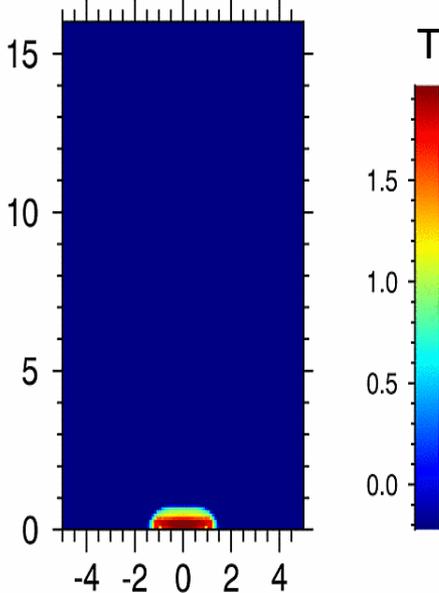
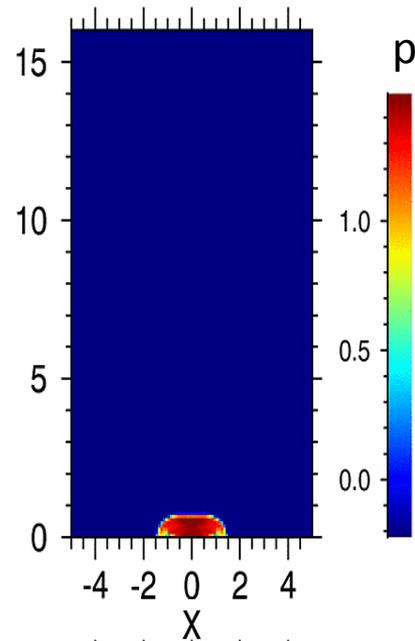
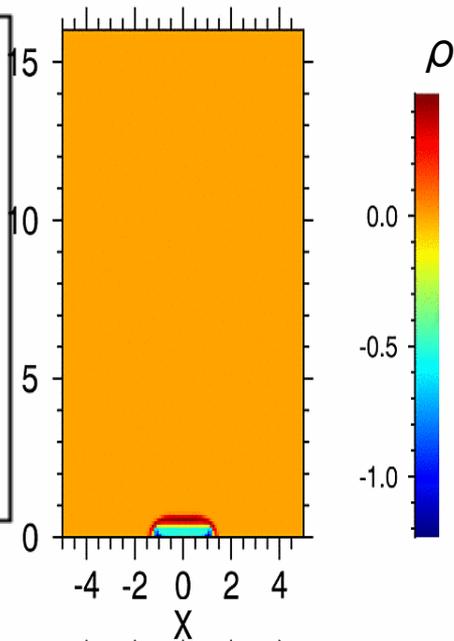
# 比熱比(磁場構造)



# 密度比の変化

# ポロイダル磁場中を伝播するジェット

amb:  
 $\rho_{amb} = 1$   
 $p_{amb} = 1/\gamma$   
 $c_{s,amb} = 1$   
Jet :  
 $\rho_{jet} = 0.1$   
 $p_{jet} = 1/\gamma$   
 $c_{s,jet} = \sqrt{10}$

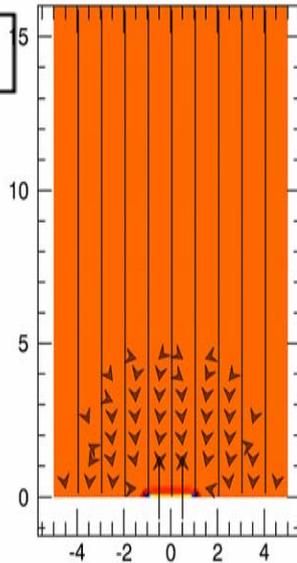


$\eta$ の変化によるジェットの影響速度の変化 (密度比: $\eta = \frac{\rho_{jet}}{\rho_{amb}}$ )

$\eta = 0.01$

Jet :

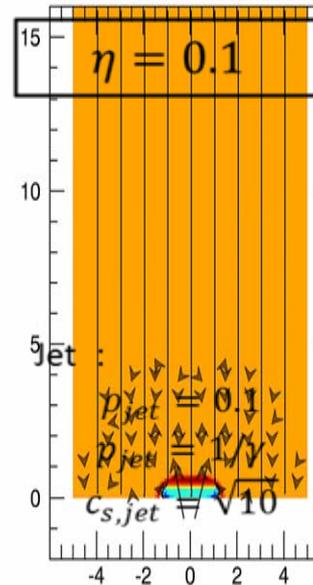
$$\begin{aligned} \rho_{jet} &= 0.01 \\ p_{jet} &= 0.1/\gamma \\ c_{s,jet} &= \sqrt{10} \end{aligned}$$



$\eta = 0.1$

Jet :

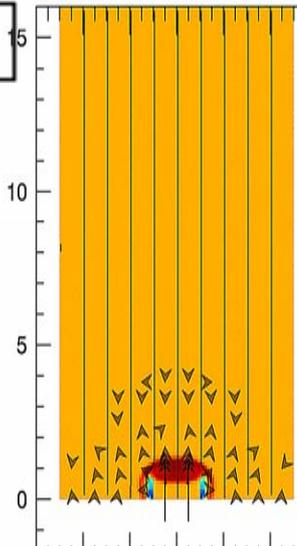
$$\begin{aligned} \rho_{jet} &= 0.1 \\ p_{jet} &= 0.1/\gamma \\ c_{s,jet} &= \sqrt{10} \end{aligned}$$



$\eta = 1$

Jet :

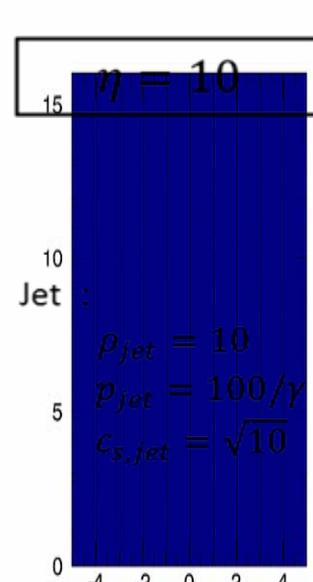
$$\begin{aligned} \rho_{jet} &= 1 \\ p_{jet} &= 10/\gamma \\ c_{s,jet} &= \sqrt{10} \end{aligned}$$



$\eta = 10$

Jet :

$$\begin{aligned} \rho_{jet} &= 10 \\ p_{jet} &= 100/\gamma \\ c_{s,jet} &= \sqrt{10} \end{aligned}$$

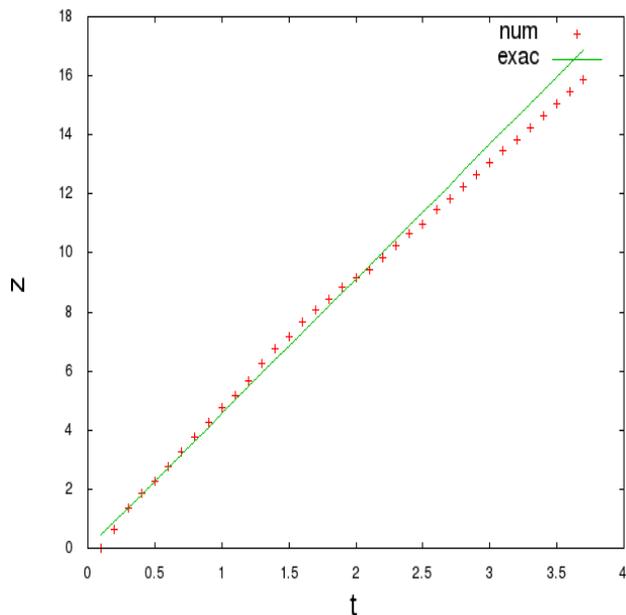


# ジェットヘッドの速度変化

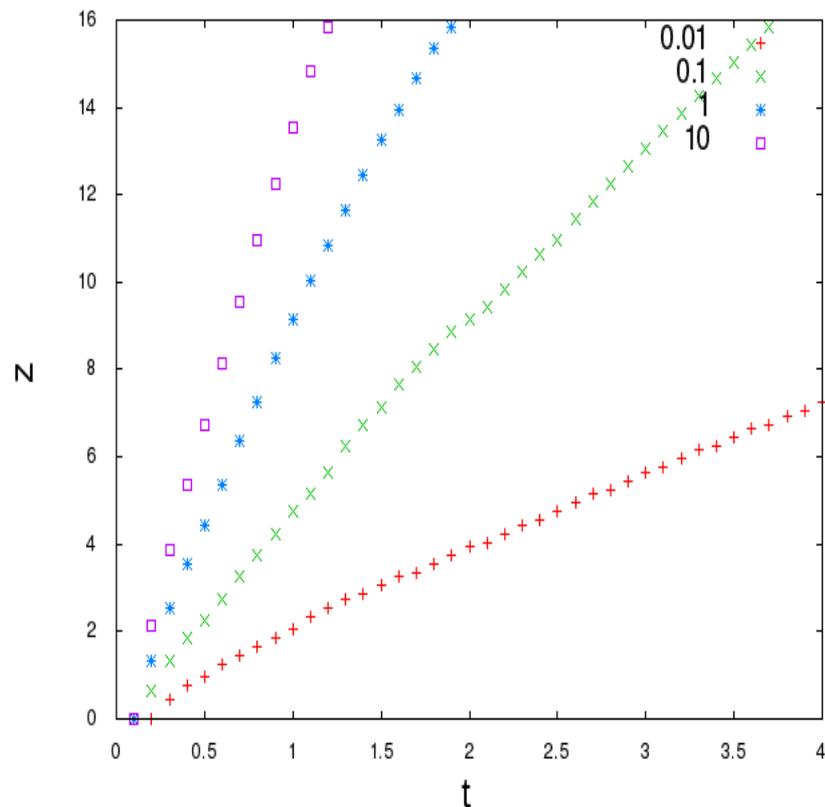
理論値(直線)  $v_j = \frac{\sqrt{\eta}}{1+\sqrt{\eta}} v_h$  (Norman et.al. 1983)

密度比:  $\eta = \frac{\rho_{jet}}{\rho_{amb}}$

$\eta = 0.1$



各 $\eta$ での時刻 $t$ とジェットヘッドの位置 $z$ のグラフ



# 磁場形状

# ジェット周辺の磁場の影響

プラズマベータ

$$\beta = \frac{p}{B^2 / 2}$$

$p$ : 圧力

$B$ : 磁場の強度

- ジェットの磁場: トロイダル磁場

- ジェットのプラズマベータを固定する:

$$\beta = 100$$

- ジェットの周辺の磁場の強度と形状を変化:

$$\beta = 5 \quad \text{or} \quad 100$$



ジェット



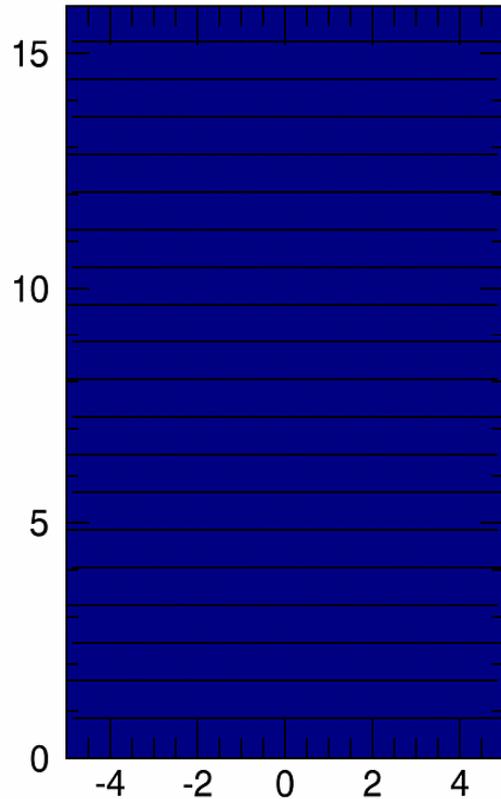
ジェット

# 横の磁場に入射

$$\beta = \frac{p}{B^2/2}$$

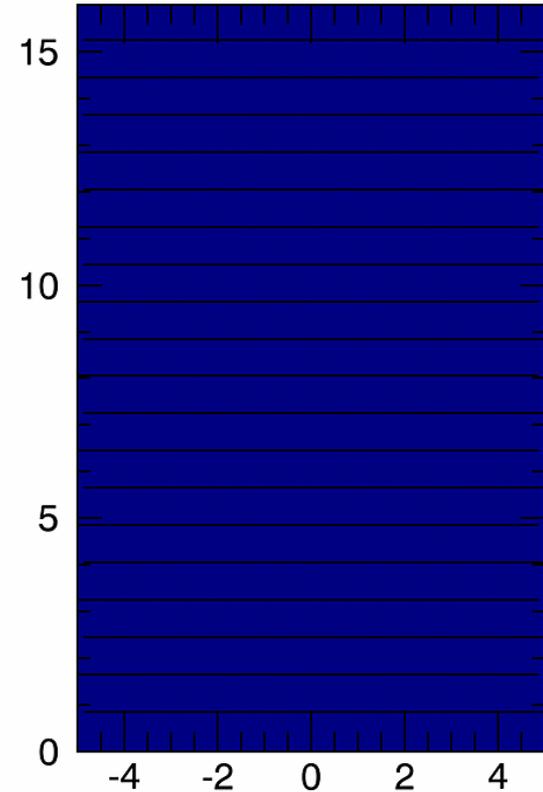
ジェットの周囲の磁場

$$\beta = 100$$



ジェットの周囲の磁場

$$\beta = 5$$



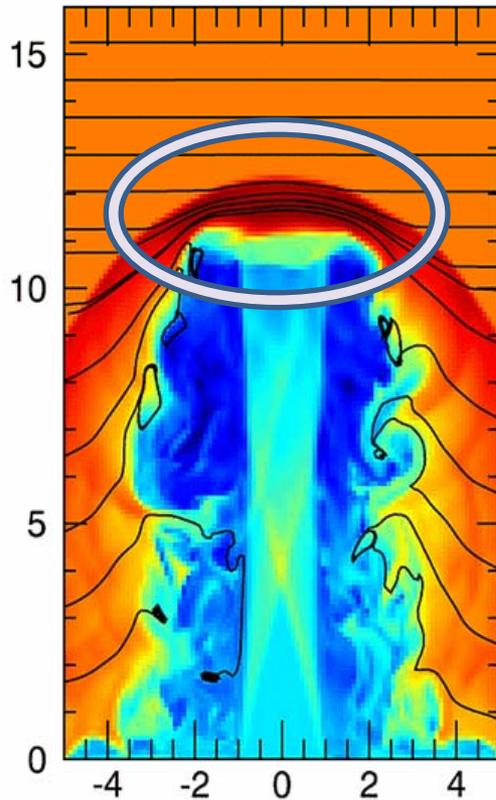
0

# 横の磁場に入射

$$\beta = \frac{p}{B^2/2}$$

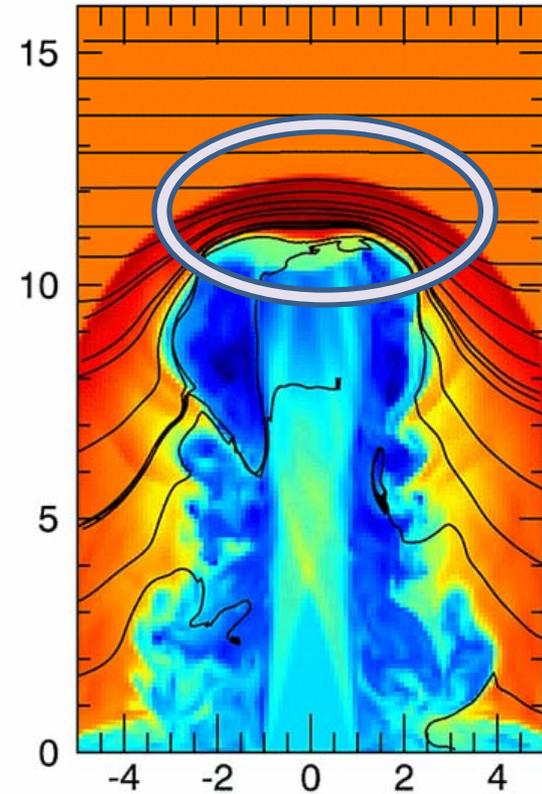
ジェットの周囲の磁場

$$\beta = 100$$



ジェットの周囲の磁場

$$\beta = 5$$

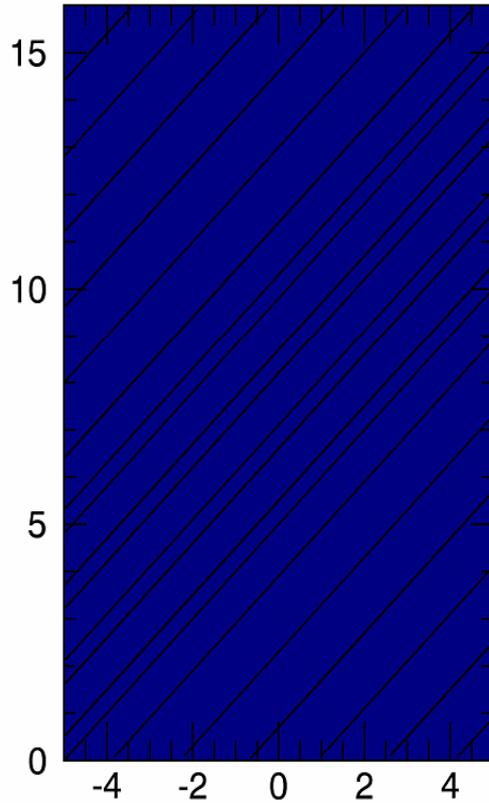


# 斜めの磁場に入射

$$\beta = \frac{p}{B^2/2}$$

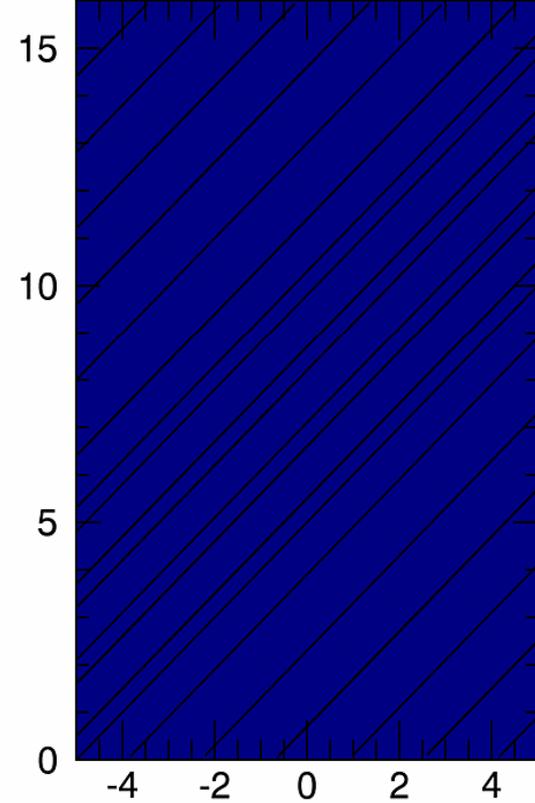
ジェットの周囲の磁場

$$\beta = 100$$



ジェットの周囲の磁場

$$\beta = 5$$



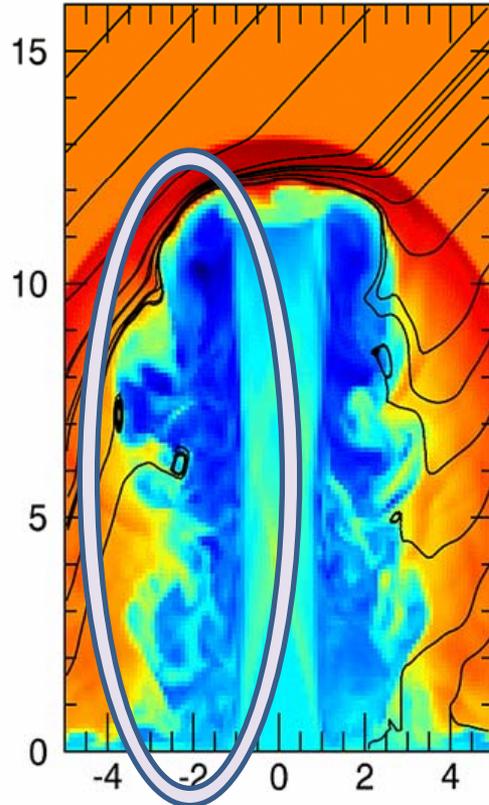
0

# 斜めの磁場に入射

$$\beta = \frac{p}{B^2/2}$$

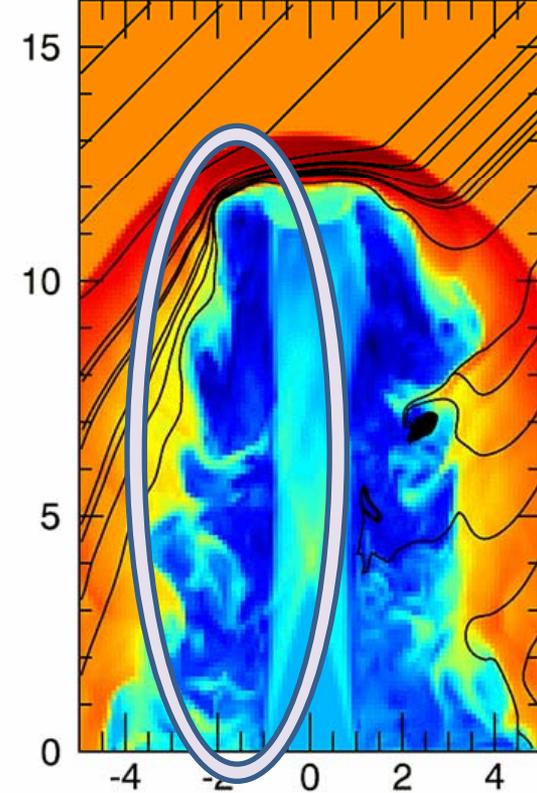
ジェットの周囲の磁場

$$\beta = 100$$



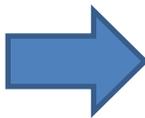
ジェットの周囲の磁場

$$\beta = 5$$



# 考察

- $\beta = 5$ 、100で行ったがあまり顕著な違いが見られなかった。

 磁場の効果を見るにはもっと  $\beta$  を小さくする必要がある。

- 今回のシミュレーションは抵抗のない理想MHDで行ったが、抵抗が入ると磁気リコネクションが起こり、ジェットの方学に影響が出る可能性がある。
- 解像度を上げるとコクーンでのKH不安定性がもっと顕著に表れる可能性がある。

