

# 磁場反転ジェット of 伝搬ダイナミクス

松本仁

福岡大学 爆発天体研究所

共同研究者：政田洋平（愛知教育大学）

滝脇知也（国立天文台）

# 相対論的ジェット

Cygnus A: radio(5 GHz)

$L > 10^{23}$  cm

活動銀河核

ジェット

相対論的ジェット：  
■ ガンマ線バースト  $\gamma > 100$   
■ 活動銀河核ジェット  $\gamma \sim 10$   
■ マイクロクエーサー  $v \sim 0.9c$

ローレンツ因子：

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

# 本研究のテーマ

## ■ 宇宙ジェットの問題

- 駆動メカニズム：BZ機構？
- 加速（慣性の増加が困難の原因）
- 収束・安定性
- 放射の時間変動性：フレア・即時放射

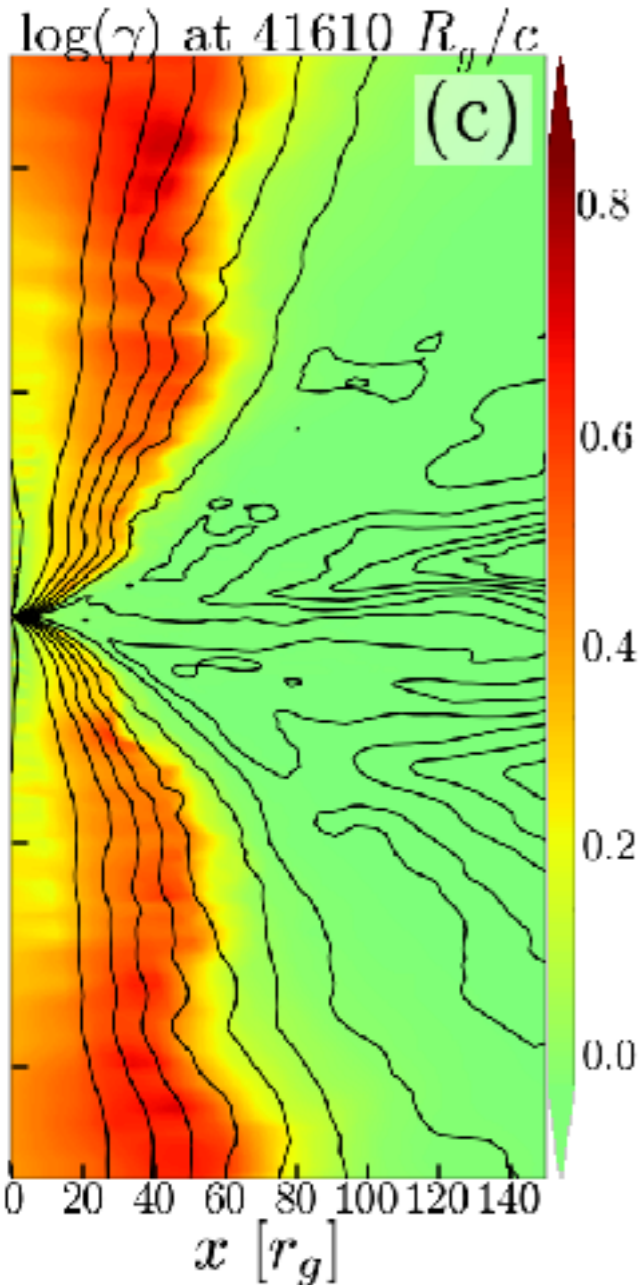
## ■ 相対論的ジェット

- 活動銀河核ジェット： $\gamma \sim 30$
- ガンマ線バースト： $\gamma \sim 100$

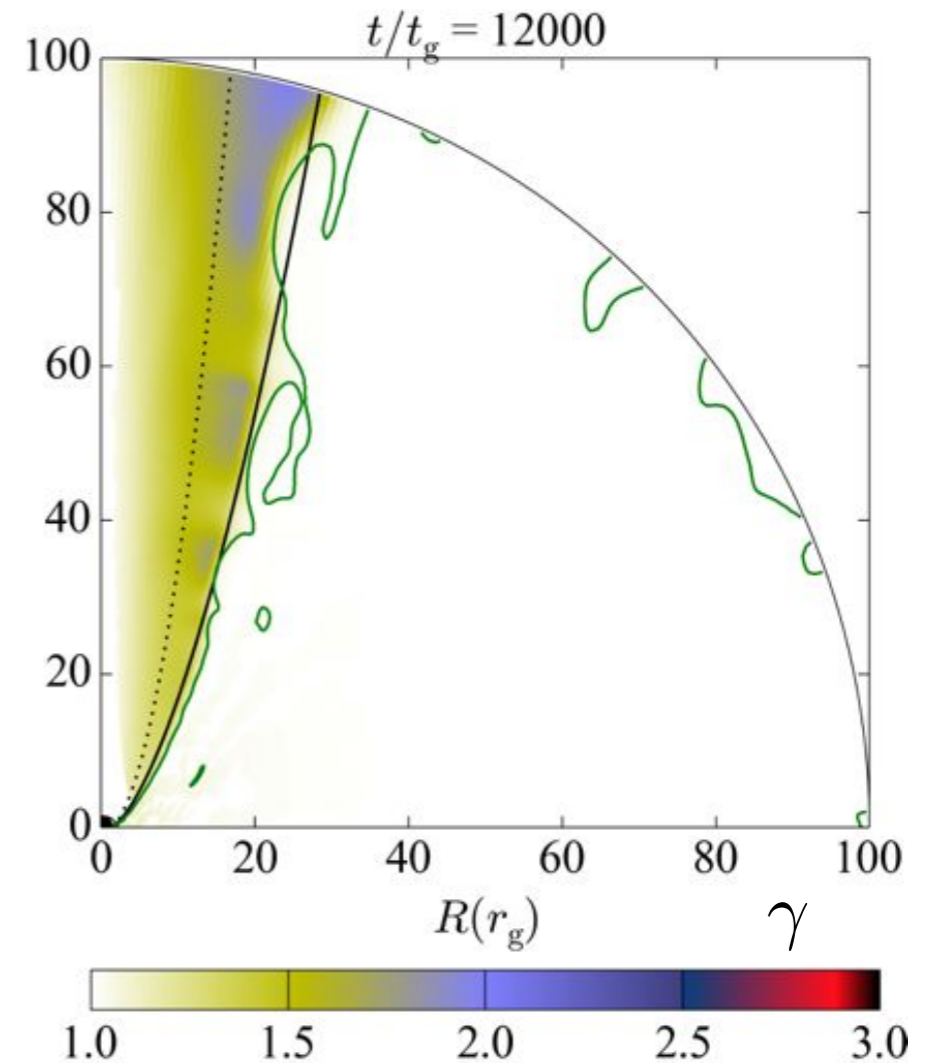
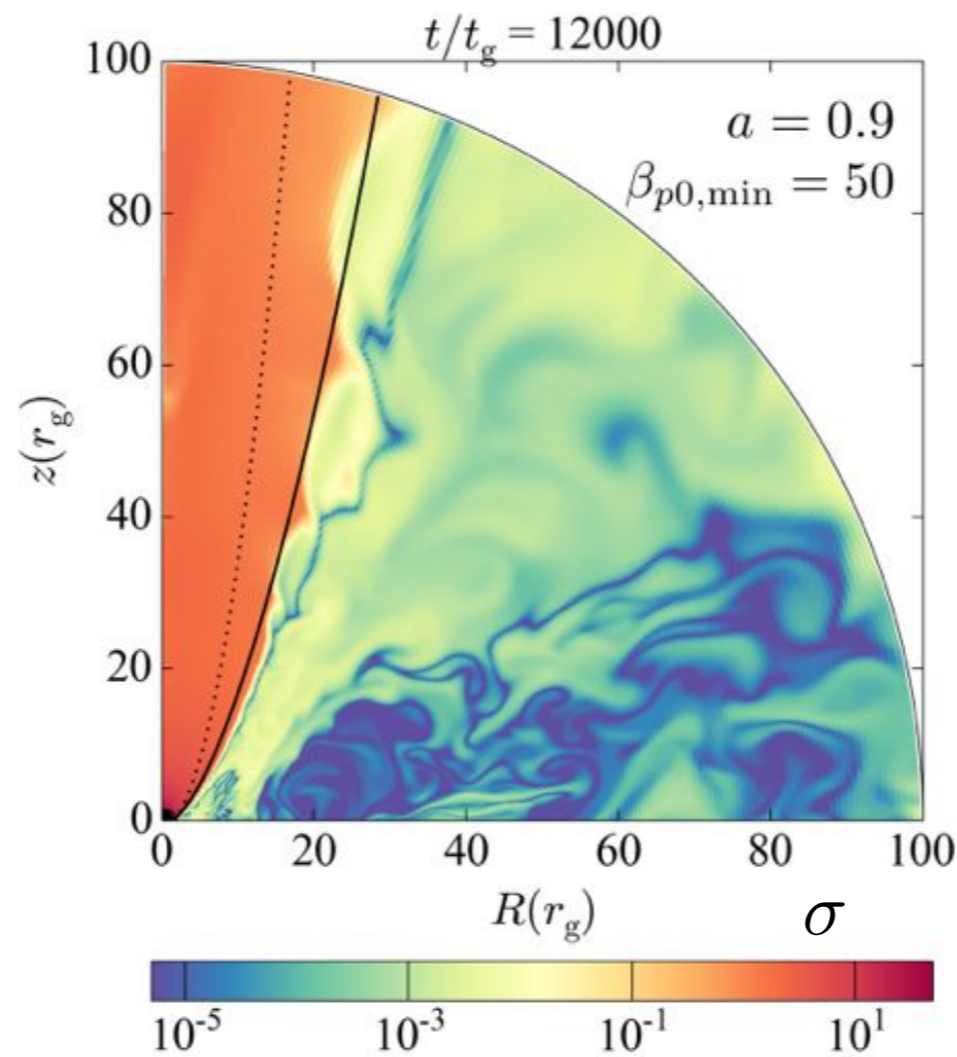
加速メカニズムは何か？

# GRMHD simulations for launching jet

Liska+ 18



Nakamura+ 18



$\gamma \sim 7$  at  $z = 100 r_g$

$\gamma \sim 2$  at  $z = 100 r_g$

Poynting-flux-dominated jets with mildly relativistic velocity are launched.

Further acceleration of the jet is necessary during the propagation of jet.

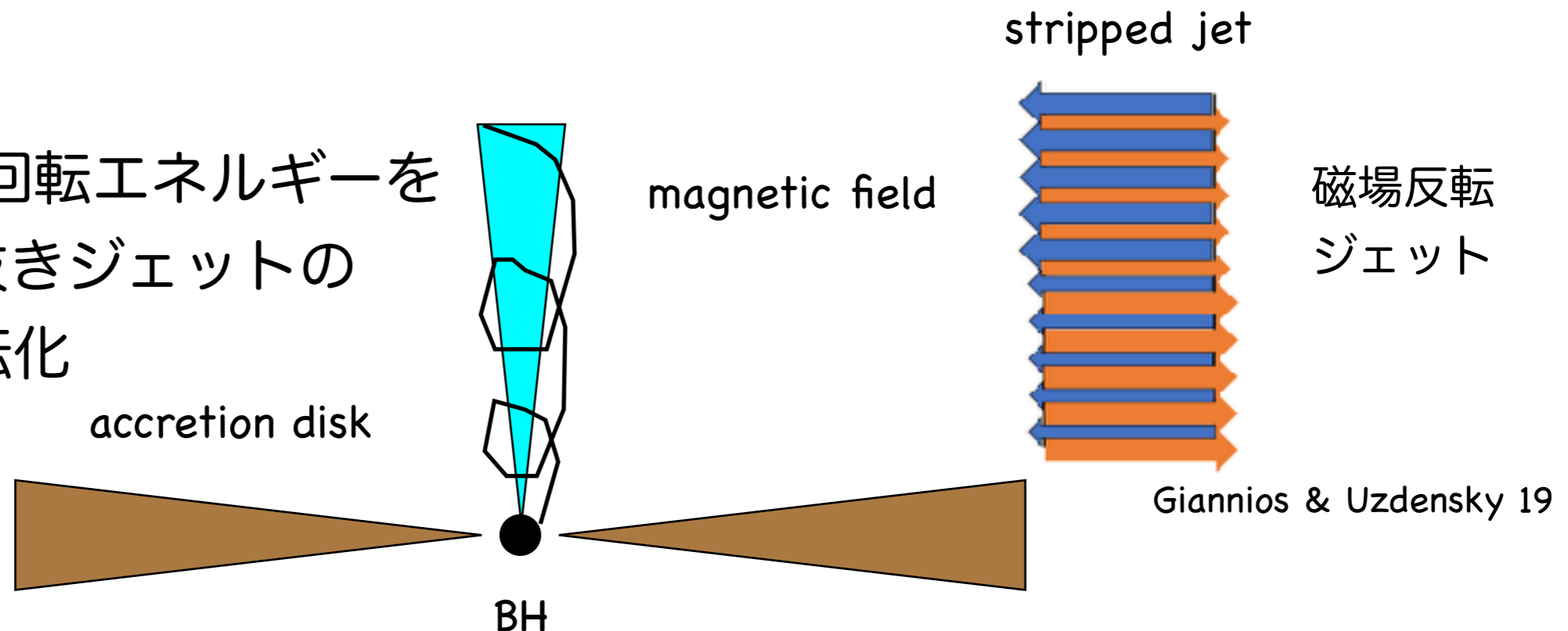
# ジェット加速のシナリオ

- 磁気散逸 (cf. ideal MHD process (Komissarov 09))
- in situ energy conversion
- 磁気エネルギー → 内部エネルギー → 運動エネルギー  
膨張

Idea: striped jet (Drenkhahn+ 02, Giannios & Uzdensky 19)

ジェット駆動：

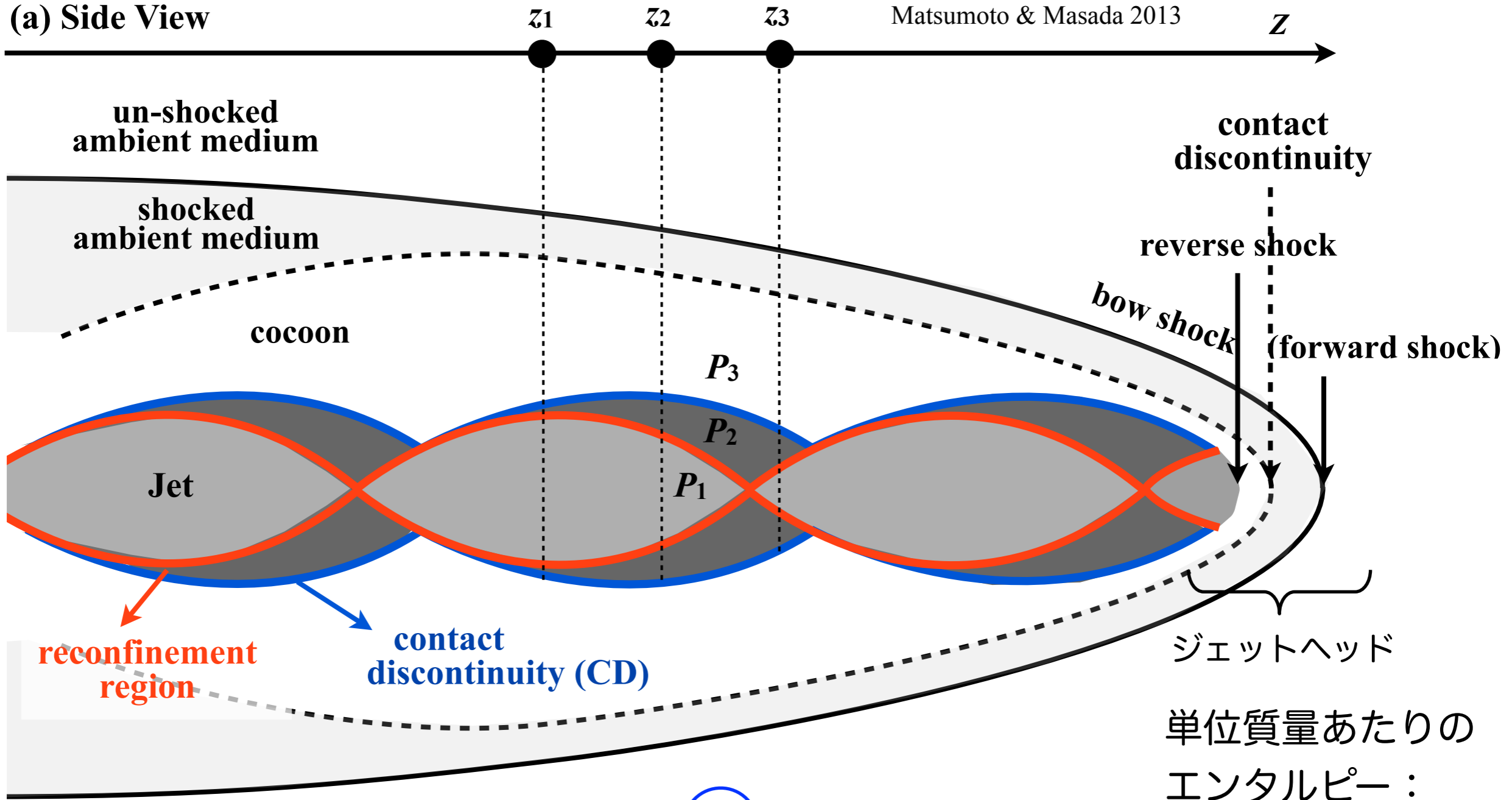
BH or 降着円盤の回転エネルギーを  
磁場を介して引き抜きジェットの  
運動エネルギーに転化



# ジェット半径の膨張に伴う加速

(a) Side View

Matsumoto & Masada 2013



単位質量あたりの  
エンタルピー：

相対論の運動方程式：
$$\gamma \rho \frac{D}{Dt} \left( \gamma \frac{h}{c^2} v \right) = - \frac{\partial P}{\partial x}$$

単位質量あたりのエンタルピー：
$$\frac{h}{c^2} = 1 + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} \frac{P}{\rho c^2}$$

ベルヌーイ方程式：
$$\gamma h \sim \text{一定}$$

ジェット半径が膨張し、 $h$ が下がることで加速

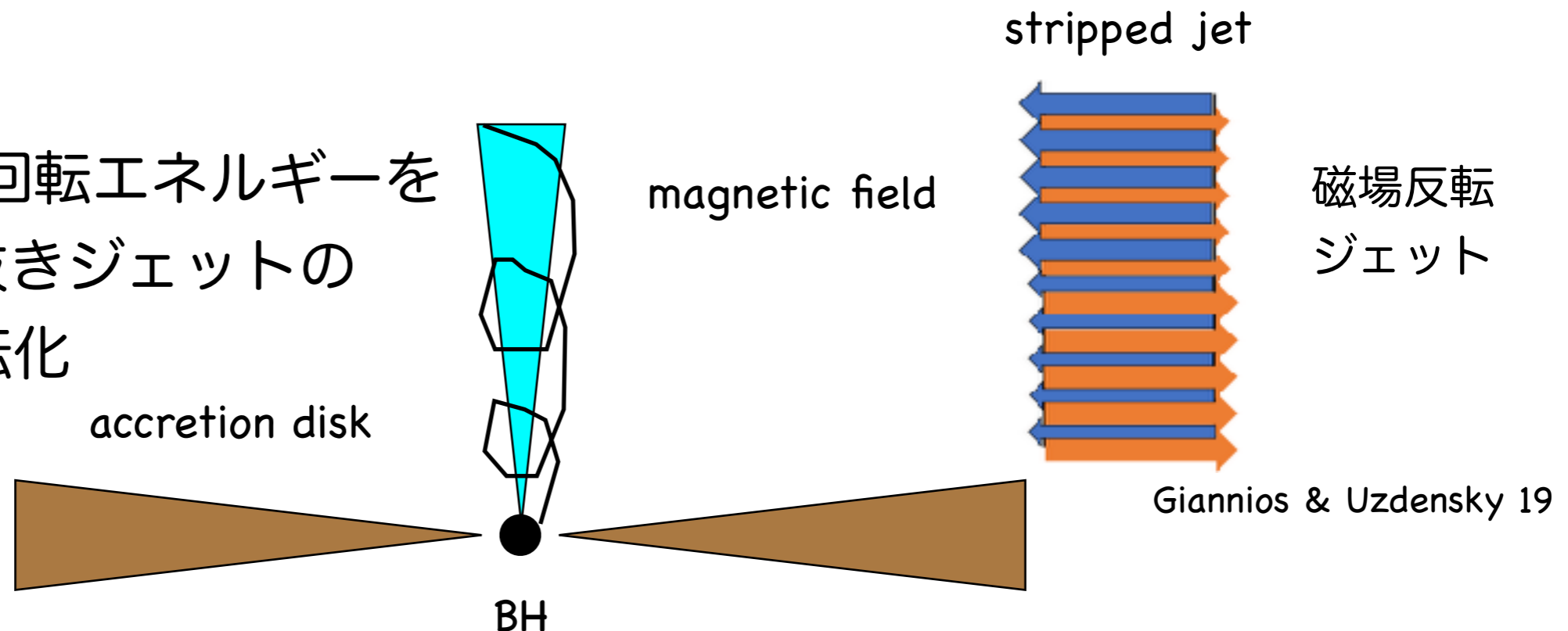
# ジェット加速のシナリオ

- 磁気散逸 (cf. ideal MHD process (Komissarov 09))
- in situ energy conversion
- 磁気エネルギー → 内部エネルギー → 運動エネルギー  
膨張

Idea: striped jet (Drenkhahn+ 02, Giannios & Uzdensky 19)

ジェット駆動：

BH or 降着円盤の回転エネルギーを  
磁場を介して引き抜きジェットの  
運動エネルギーに転化

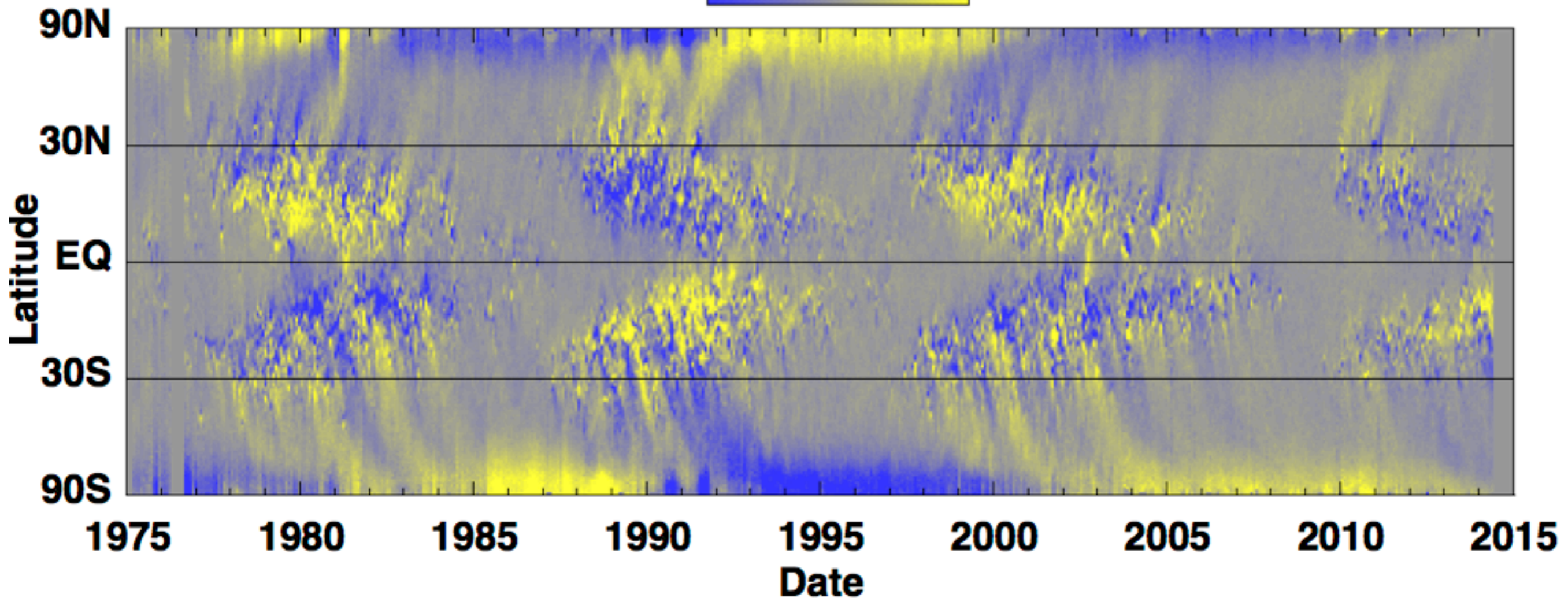


# Polar field reversals in the Sun

Magnetic Butterfly Diagram

Hathaway 15

-10G 0 +10G



longitudinally averaged radial magnetic field obtained from instruments on Kitt Peak and SOHO

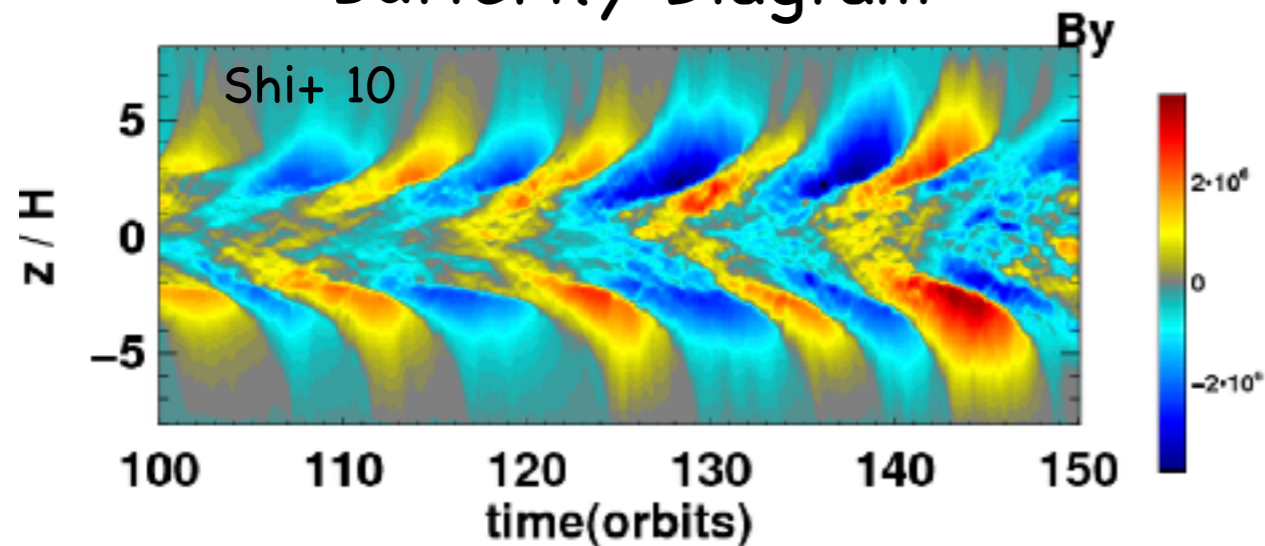
11-year cycle for the polarity of the magnetic field in the sun



# Field reversals in accretion disks

Butterfly Diagram

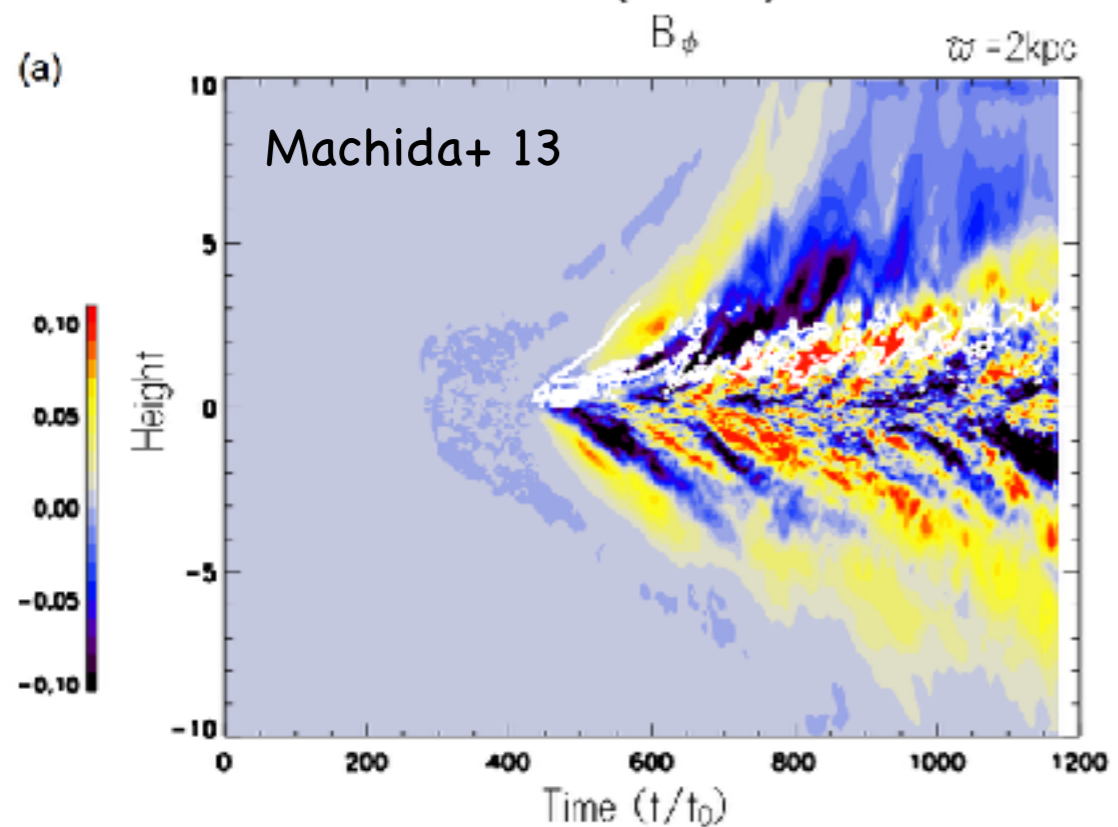
(Brandenburg+ 95)



proto-stellar disk

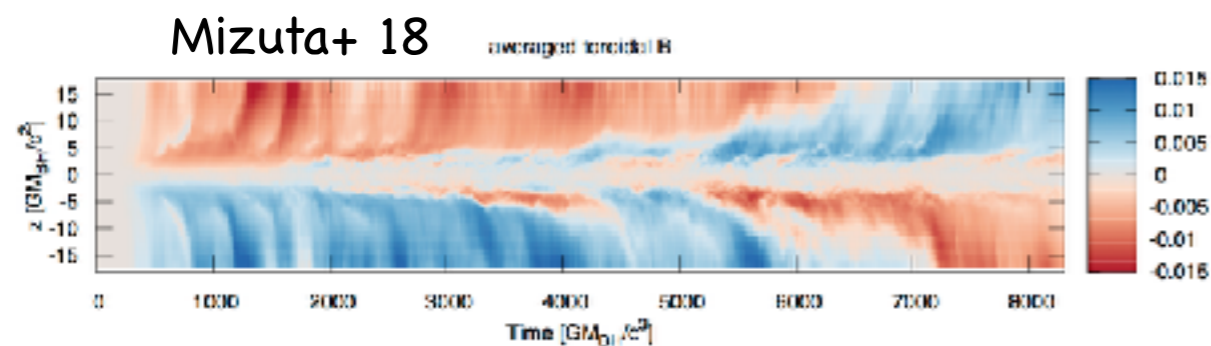
local simulation: shearing box

10 orbital periods



3D global simulation

(e.g., Nishikori+ 06, Machida+ 13)

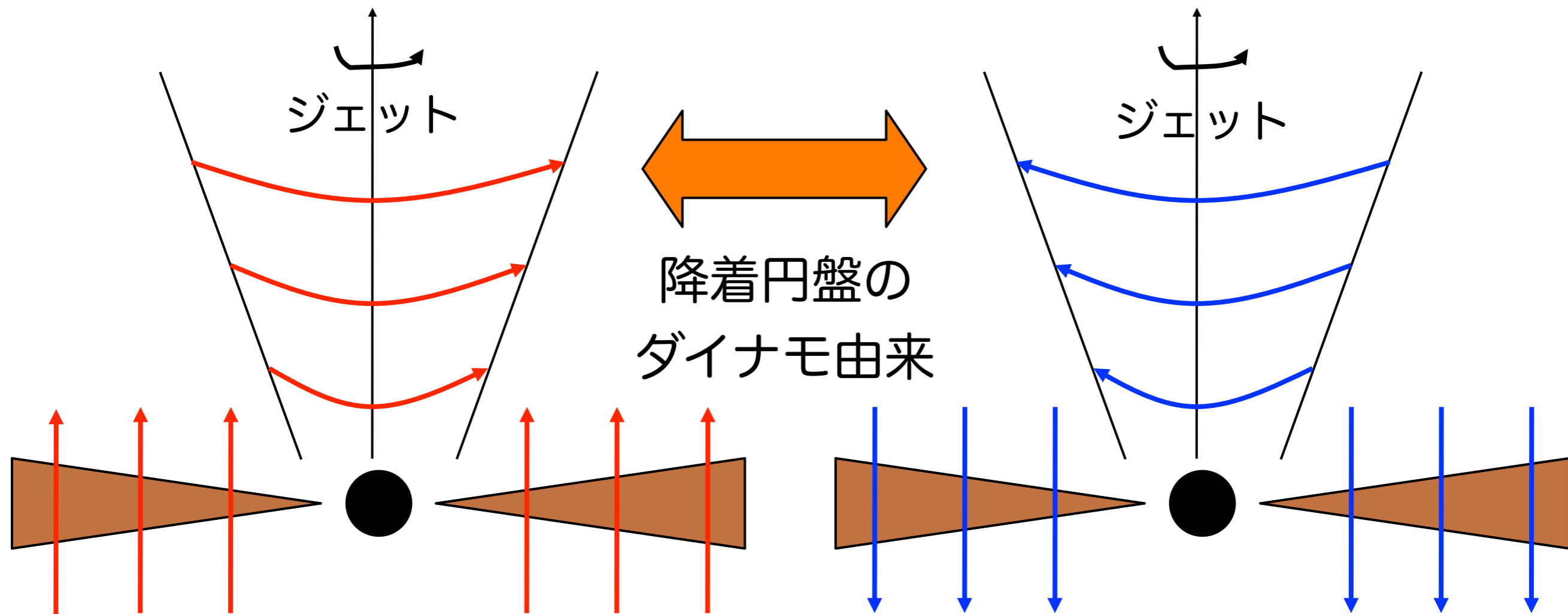


global GRMHD simulation

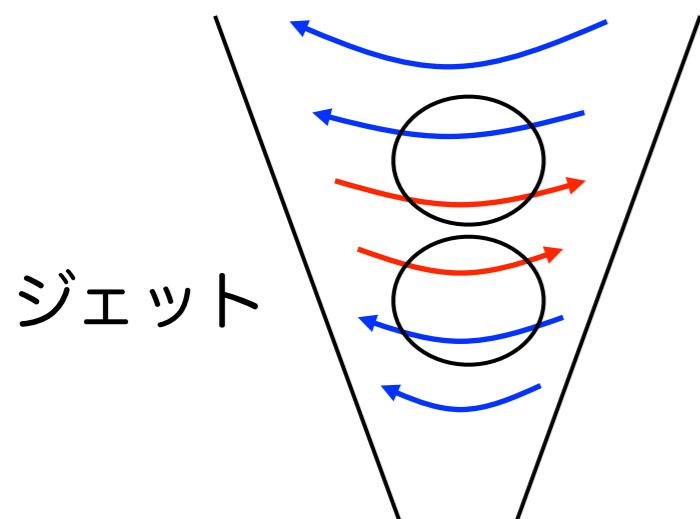
(Siegel+ 18, Mizuta+ 18)

Alternating polarity are generated by MHD turbulence.

# ジェットの磁場反転



磁気リコネクションにより磁気エネルギーが  
散逸することが期待される



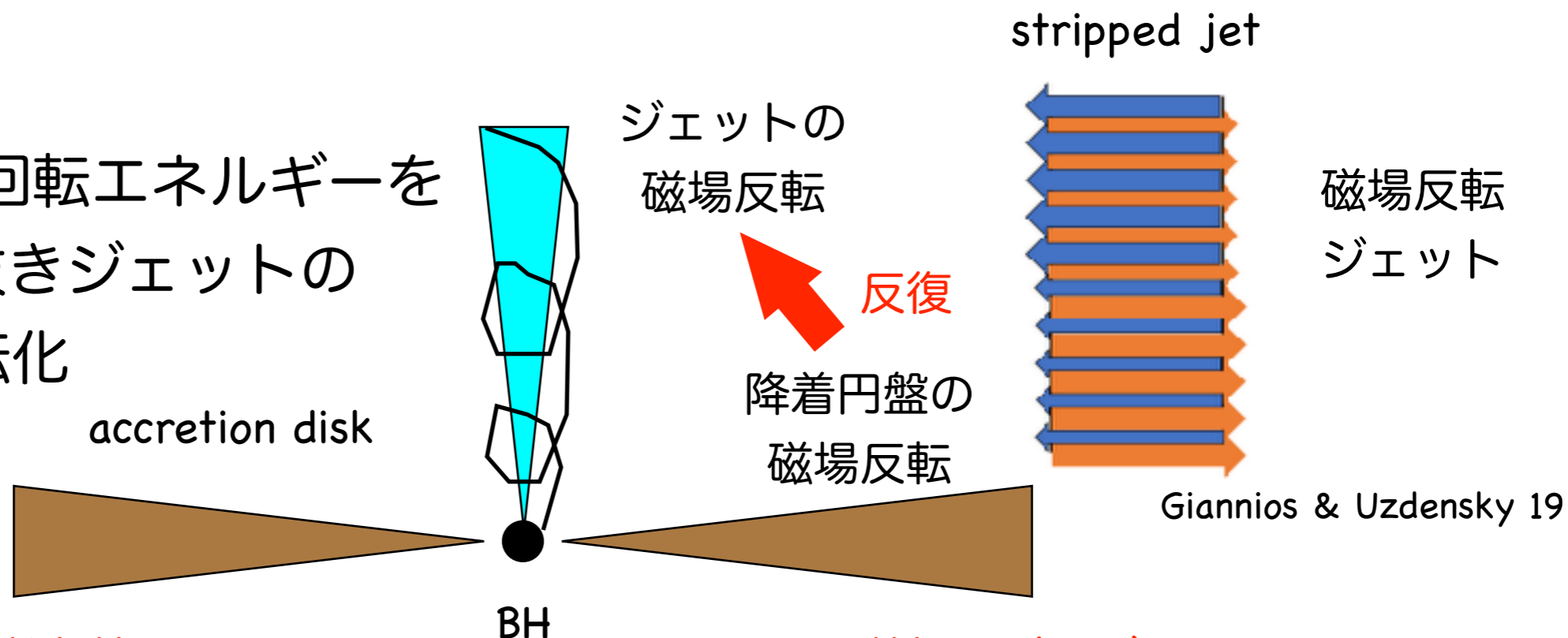
# ジェット加速のシナリオ

- 磁気散逸 (cf. ideal MHD process (Komissarov 09))
- in situ energy conversion
- 磁気エネルギー → 内部エネルギー → 運動エネルギー  
膨張

Idea: striped jet (Drenkhahn+ 02, Giannios & Uzdensky 19)

ジェット駆動：

BH or 降着円盤の回転エネルギーを  
磁場を介して引き抜きジェットの  
運動エネルギーに転化



相対論的電磁流体シミュレーションを用いて磁場反転ジェットの  
ダイナミクス (加速されるか) を調べる

# 基礎方程式

mass conservation

$$\partial_\alpha(\rho u^\alpha) = 0$$

energy-momentum conservation

$$\partial_\alpha \left[ (\rho h + b^2) u^\alpha u^\beta - b^\alpha b^\beta + \left( P + \frac{1}{2} b^2 \right) \eta^{\alpha\beta} \right] = 0$$

Maxwell's equations

$$\partial_\alpha(u^\alpha b^\beta - u^\beta b^\alpha) = 0$$

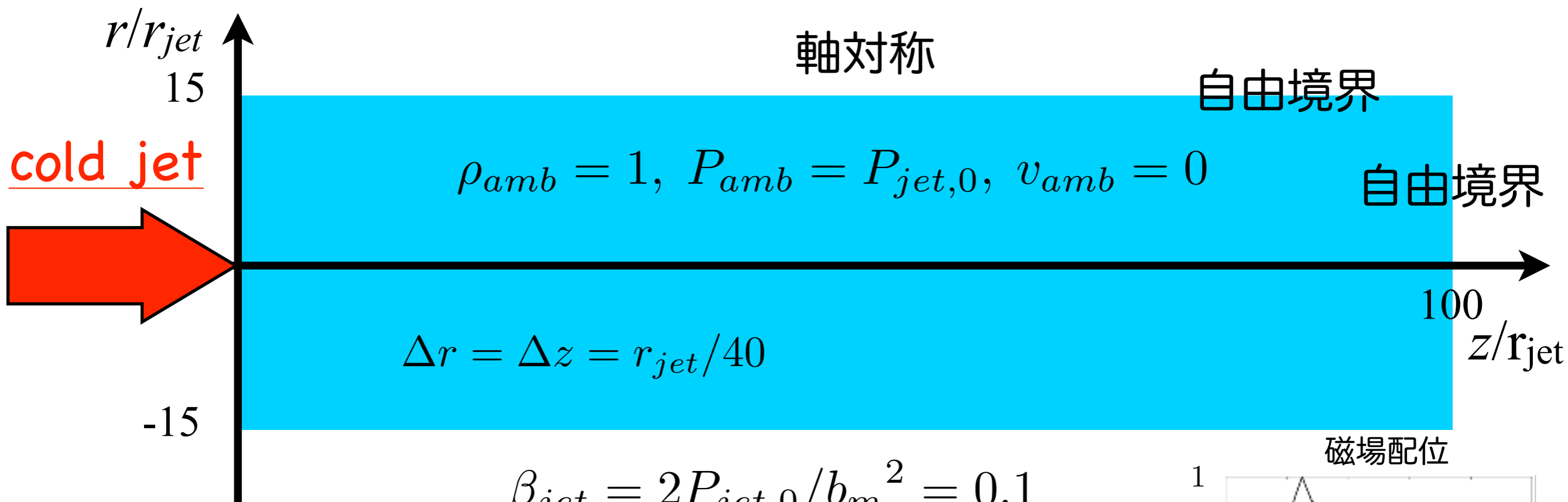
- cylindrical coordinate system
  - axisymmetric:  $\partial_\phi = 0$
  - pure toroidal field: only jet
  - ideal MHD
  - relativistic HLLD (Mignone+ 09)
  - HLLD-Upwind-CT (in prep.)
- (cf. Minoshima+15)

# 磁場反転ジェット：計算設定

$$\rho_{jet} = 0.01, v_z = v_{jet} = 0.99c, \gamma_{jet} \sim 7.09$$

$$P_{jet,0} = 2.2 \times 10^{-4}$$

$$M_{jet} = 6, M_{rela,jet} = M\gamma_{jet}/\gamma_{sound} = 41.95$$



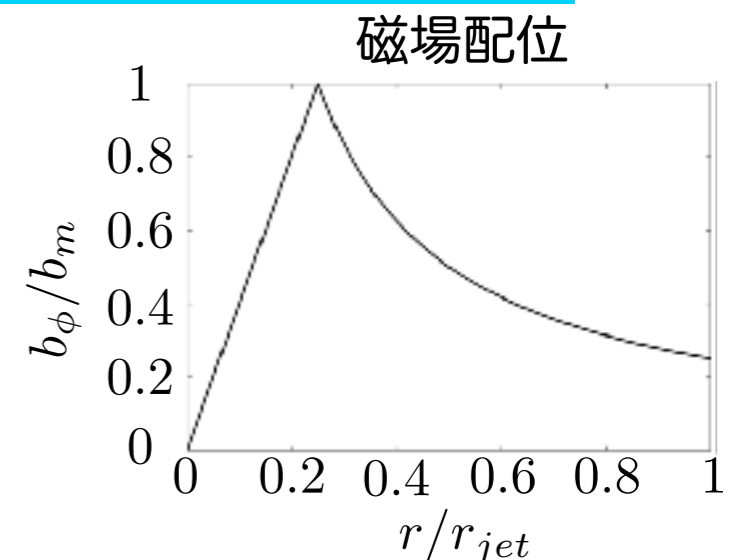
$$\tau_{rev} = \infty, 10, 1, 0.1$$

時間ユニット:  $r_{jet}/c$

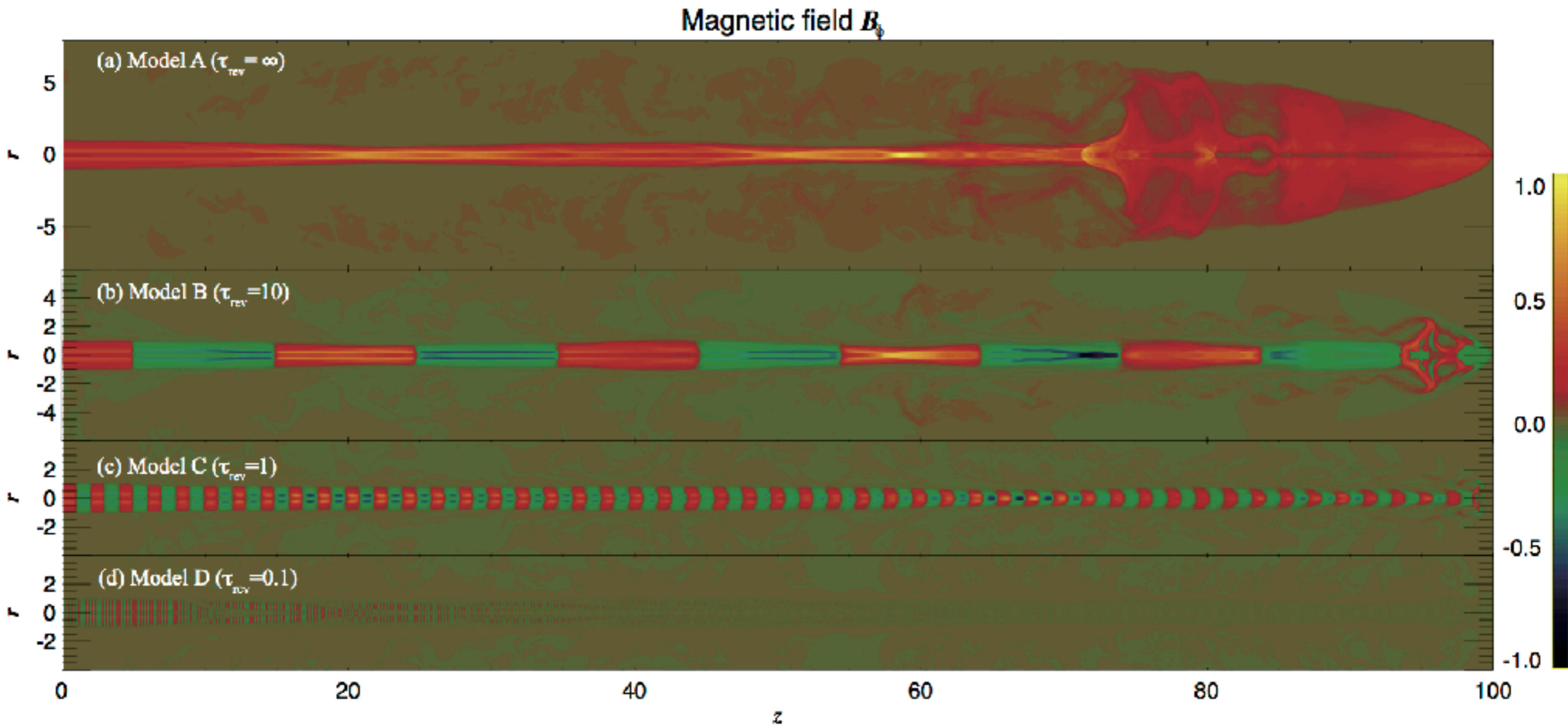
$$\beta_{jet} = 2P_{jet,0}/b_m^2 = 0.1$$

$$\sigma_{jet} = b_m^2/(\rho h)_{jet} = 0.41$$

動径方向に磁気圧・磁気張力と釣り合うようにガス圧を設定



# 磁場の比較

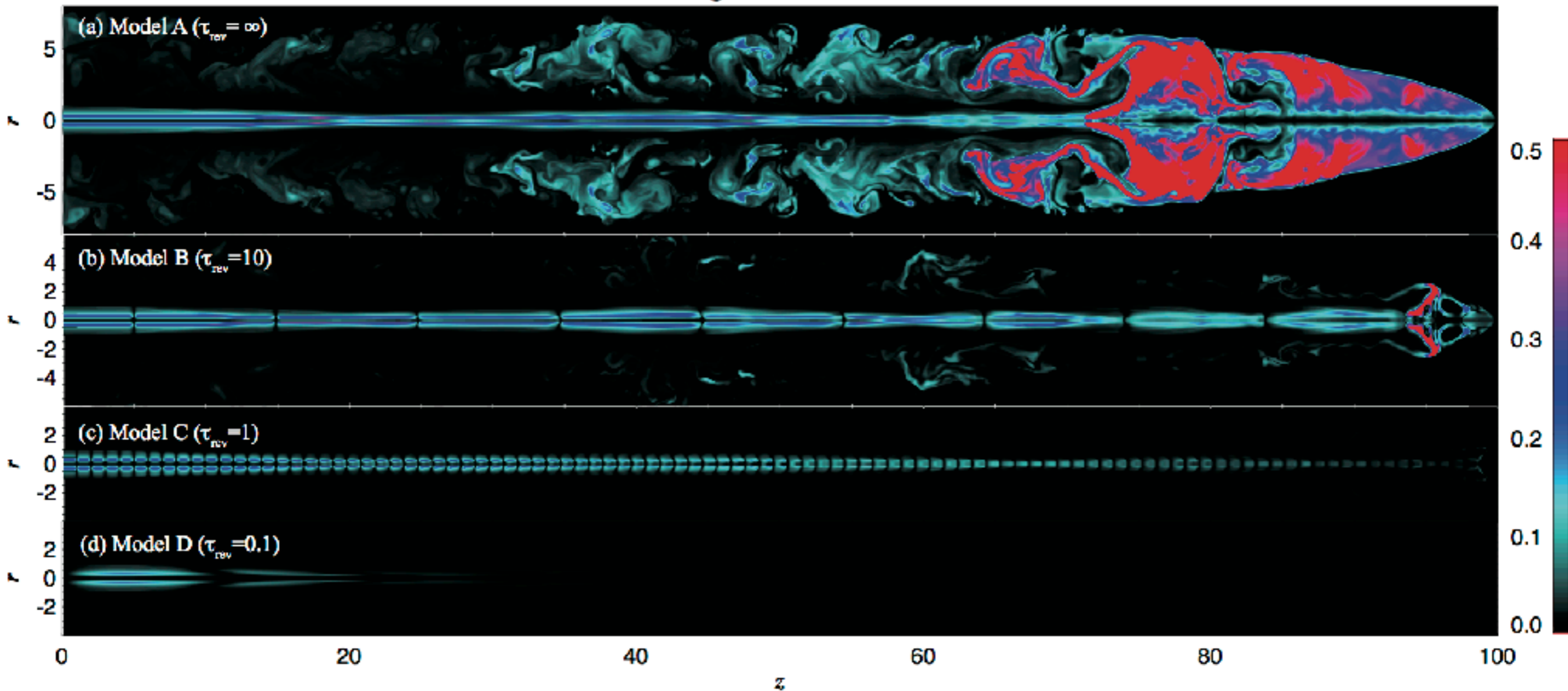


- nose cone in model A
- We can not find strip pattern in model D.

# magnetizationの比較

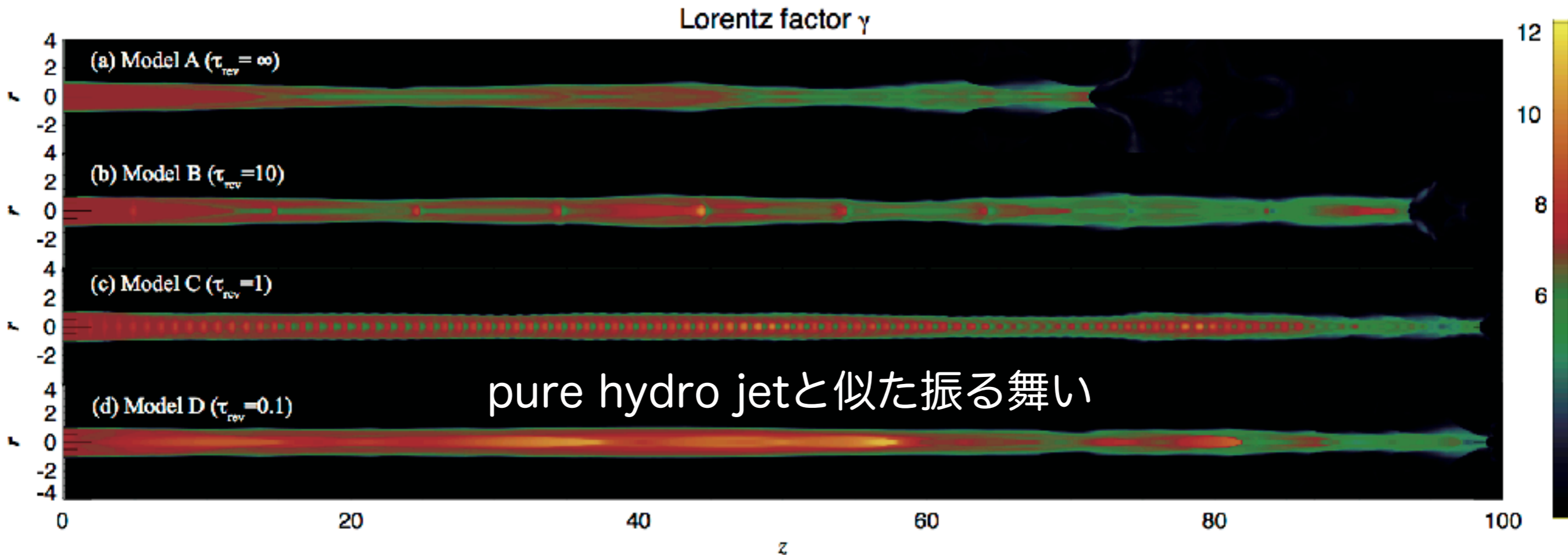
$$\sigma = \frac{b^2}{\rho h c^2} \quad h = 1 + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} \frac{P}{\rho c^2}$$

Magnetization  $\sigma$



Magnetic energy is dissipated at the interface of field reversals.

# Lorentz factorの比較



- energy conversion from magnetic energy into thermal energy
- acceleration at the reconfinement region

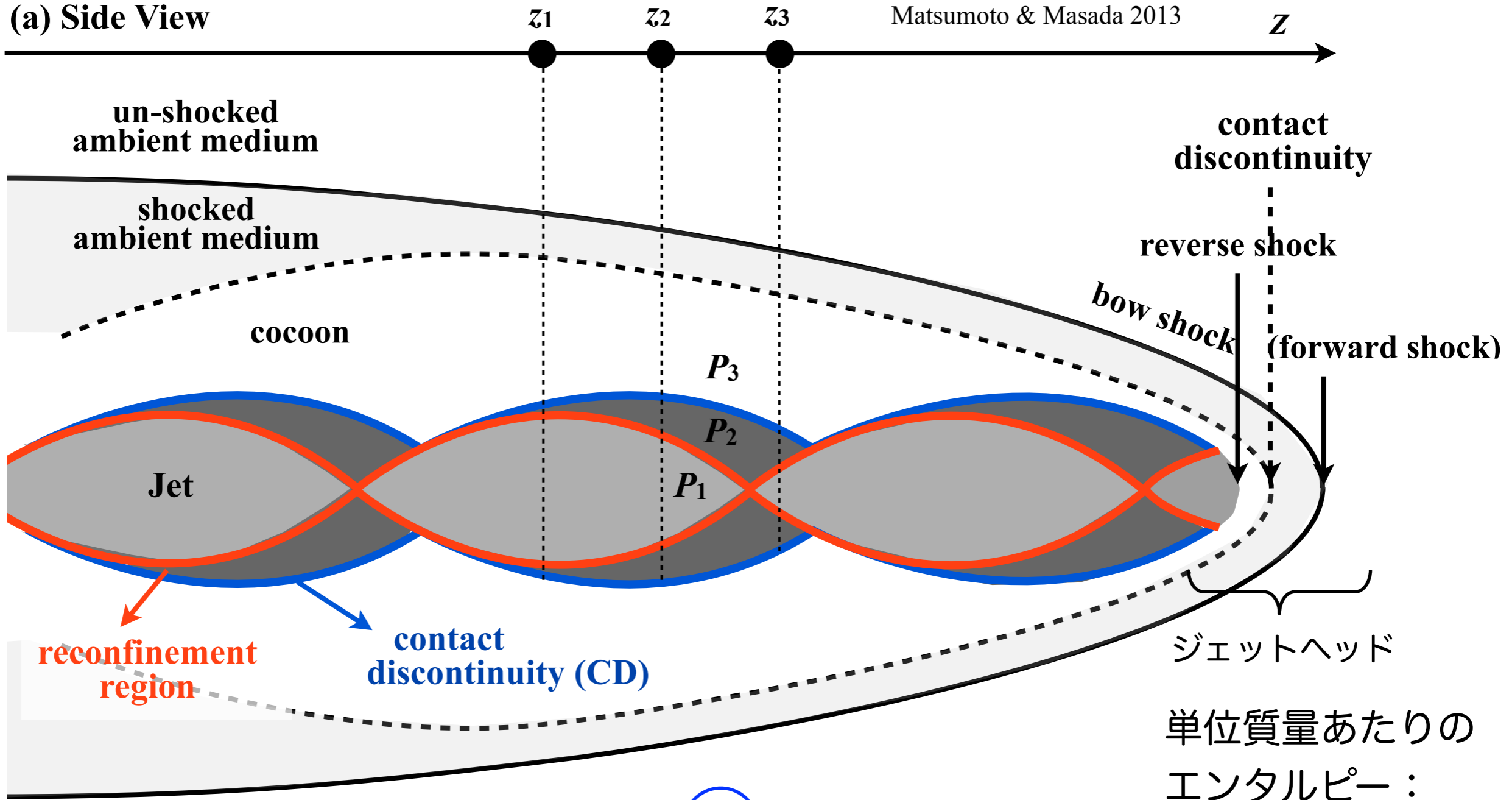
thermal energy - - > kinetic energy



# ジェット半径の振動に伴う加速

(a) Side View

Matsumoto & Masada 2013



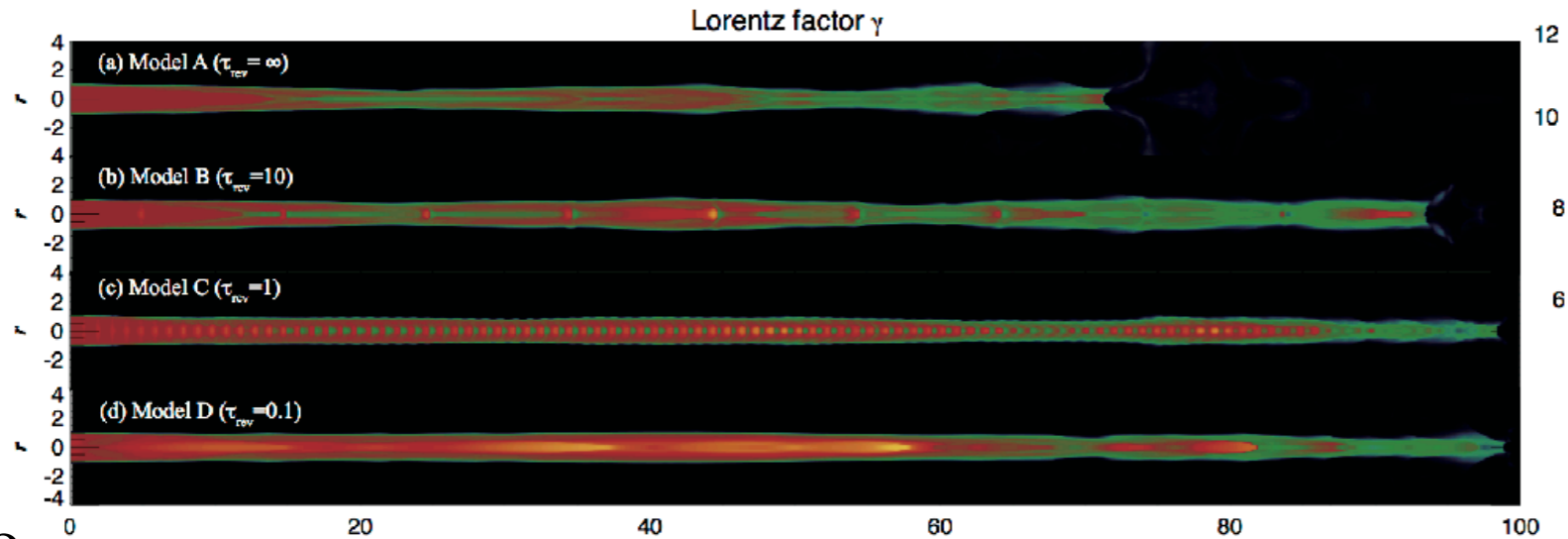
単位質量あたりの  
エンタルピー：

相対論の運動方程式：
$$\gamma \rho \frac{D}{Dt} \left( \gamma \frac{h}{c^2} v \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} \quad \frac{h}{c^2} = 1 + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} \frac{P}{\rho c^2}$$

ベルヌーイ方程式：
$$\gamma h \sim \text{一定}$$

ジェット半径が膨張し、 $h$ が下がることで加速

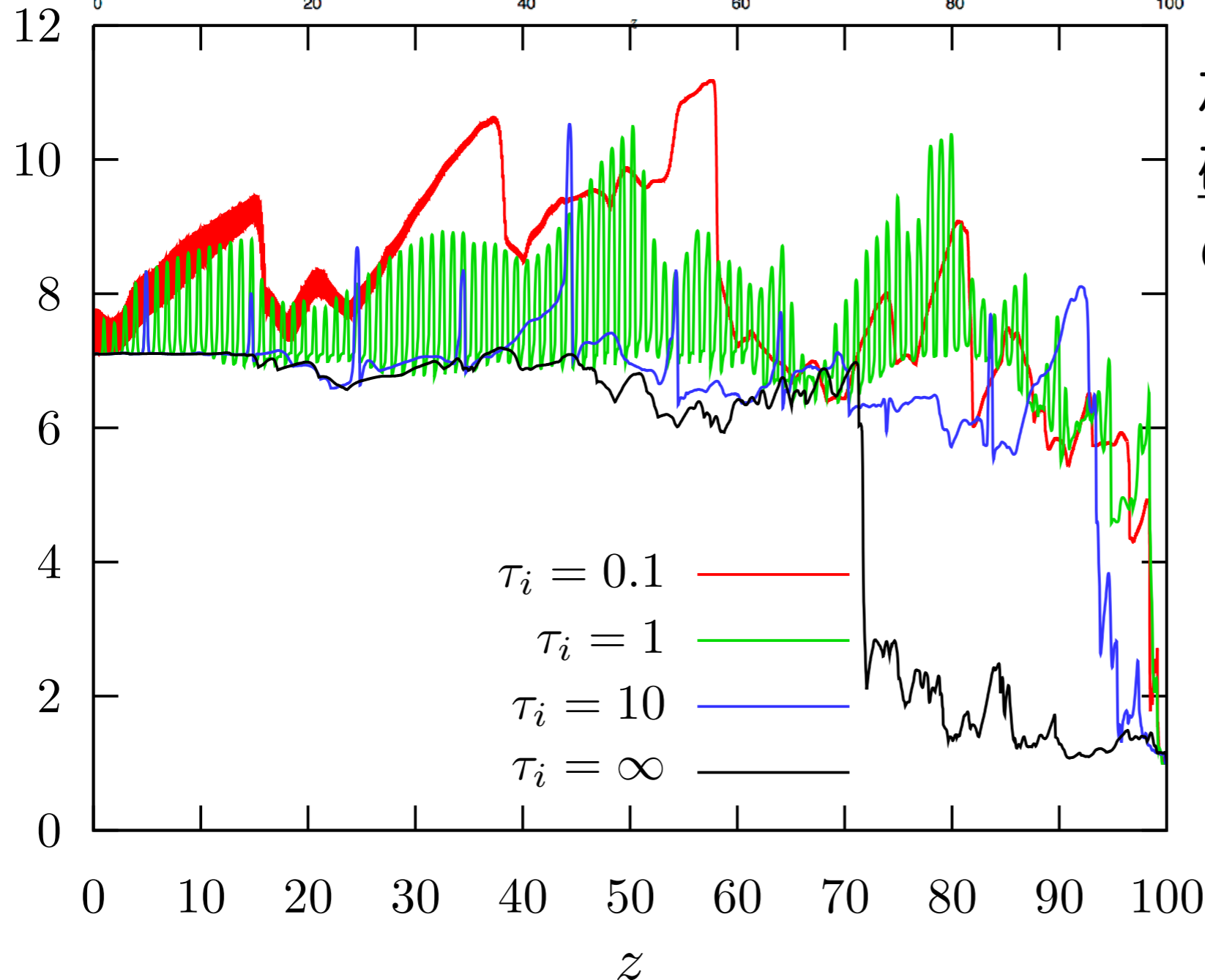
# Lorentz factorの比較



- Bernoulli equation:

$$(1 + \sigma)\gamma = \gamma_{max}, \quad \sigma = 0.4$$

7      10



加速領域：

磁場反転の周期 x c の長さ  
の周期で出現

$\tau_{rev} = 0.1$  モデル：

周期性の消失

← pure hydro jet

時間変動性の起源？

$\tau_{rev} = 10$  モデル

long GRB: 数十ミリ秒

AGN jet: 数日

# まとめ

## 磁場反転ジェットの伝搬ダイナミクス

- 軸対称二次元相対論的電磁流体シミュレーション
- 磁場反転なしモデル：加速されず
- ジェットヘッド及び磁場反転の境界層(電流シート)で  
磁場が散逸し、磁気エネルギー → 熱エネルギー →  
運動エネルギーのエネルギー転換が起こりジェットが  
加速 ( $\tau_{rev} = 10, 1$ )

加速領域が周期的に出現 → 時間変動性の起源の可能性

- $\tau_{rev} = 0.1$  モデル：pure hydro jetと同じ振る舞い