

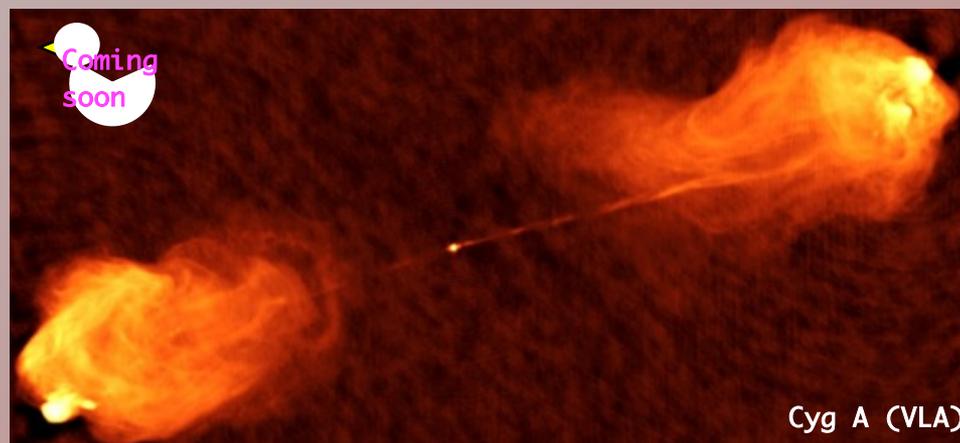


# 磁場の散逸と ジェット加速について

田中周太 (青山学院大学)

with

当真賢二 (東北大学)

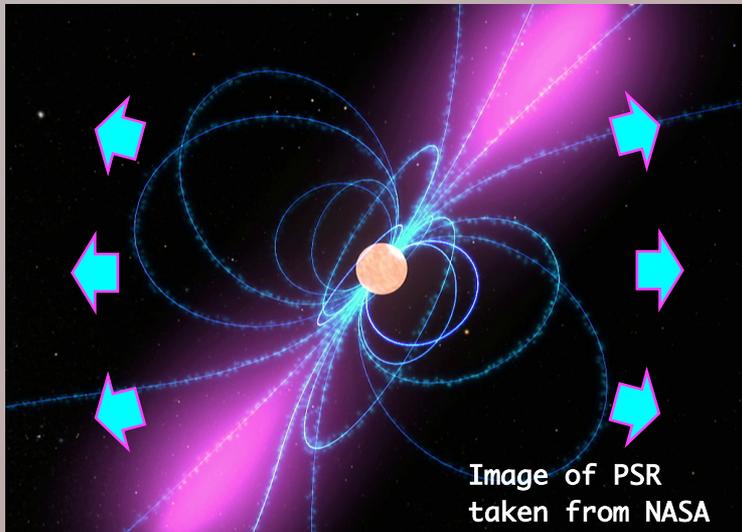


# Introduction

# Pulsar Winds

- Powered by pulsar = NS.
- Relativistic plasma outflow.
- High energy (non-thermal) emission.
- Non-spherical (jet-torus structure).

Crab (Chandra)



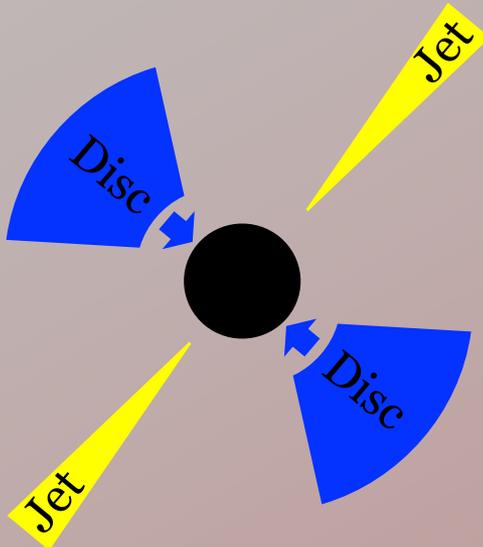
- Rotation power of pulsar  $\leftarrow$  period decrease
- $\Gamma_{\text{wind}} \gg 1 \leftarrow$  relativistically hot PWN emission
- $e^{\pm}$  plasma  $\leftarrow$  high emission efficiency of PWN
- Magnetized plasma  $\leftarrow$  synchrotron emission

# Relativistic Jet

- Powered by NS or BH.
- Relativistic plasma outflow.
- High energy (non-thermal) emission.
- Bipolar jets from engine.



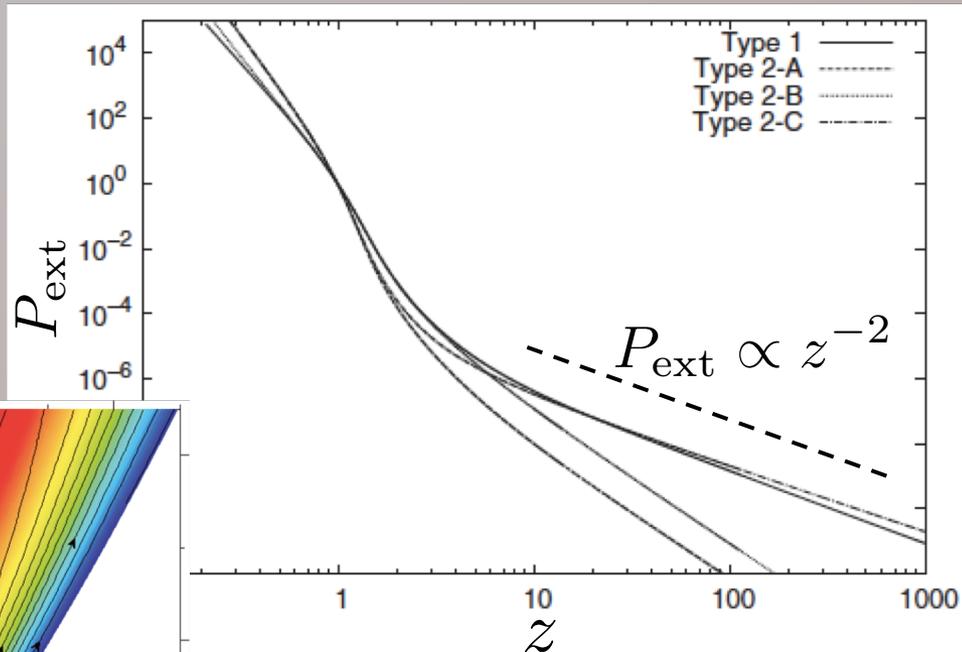
Common astrophysical phenomena phenomena in AGN, microquasar, & GRB



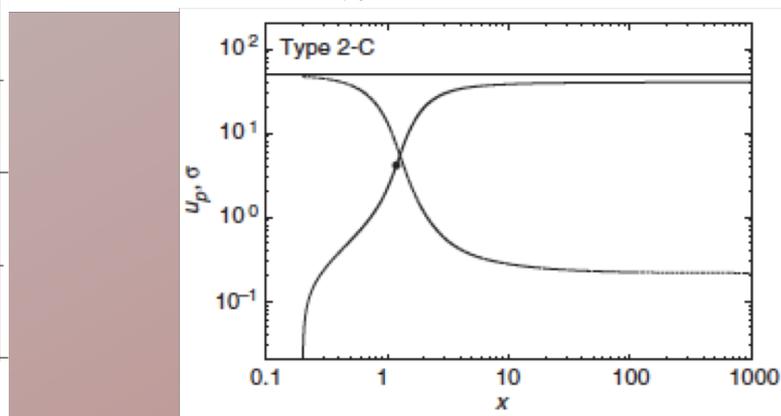
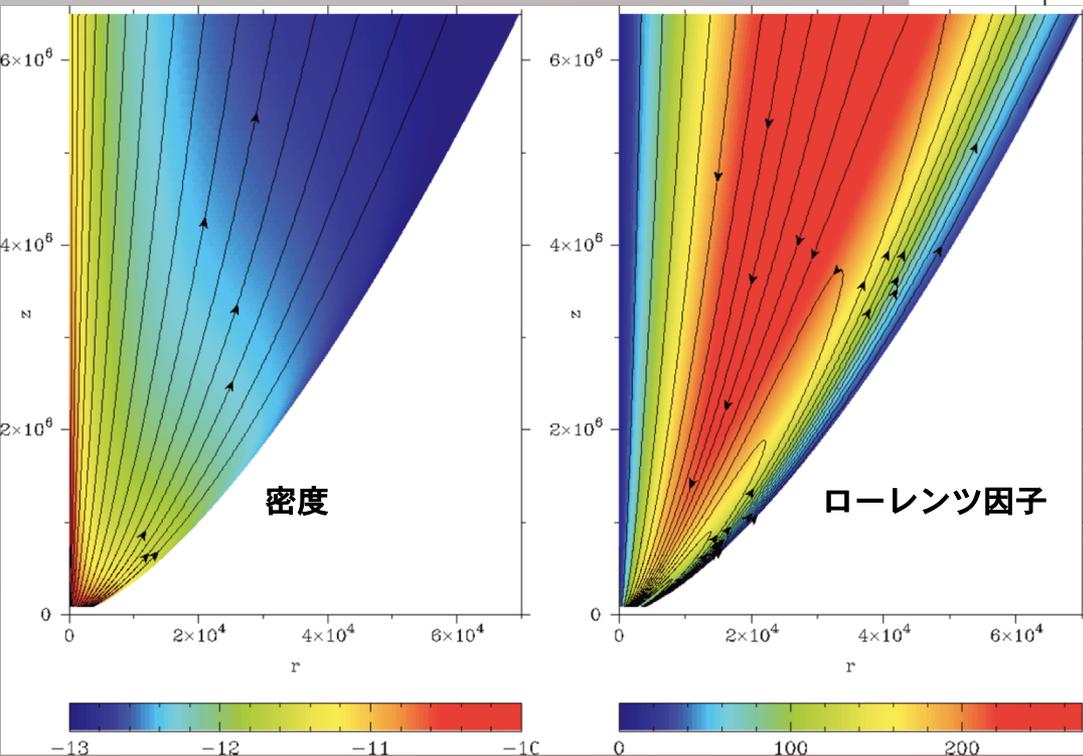
- Gravitational energy (inflow -> outflow)  
**Same as pulsar wind**
- Rotation powered?
- Role of magnetic field?
- How to accelerates to relativistic flow?
- How to collimate jets?

# Acceleration & Stability of Jets

# コミサロフの壁



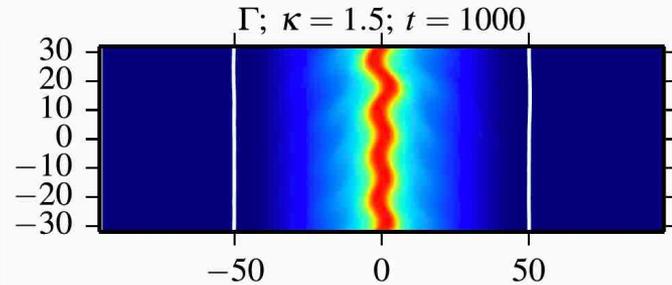
Komissarov+09



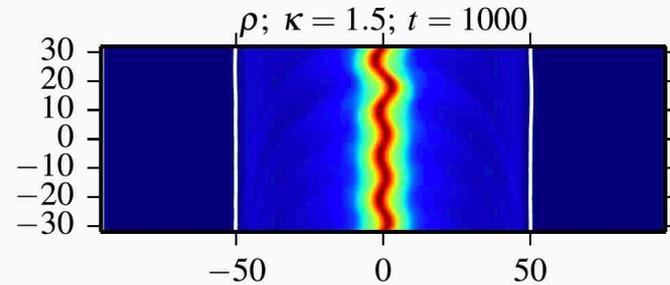
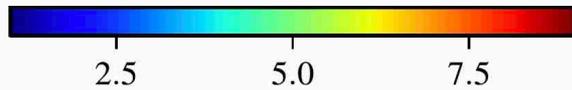
壁を置けば加速するようだ

$$P_{\text{ext}} \propto z^{-\kappa}$$

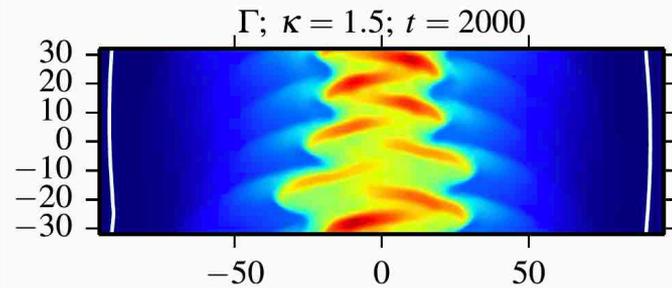
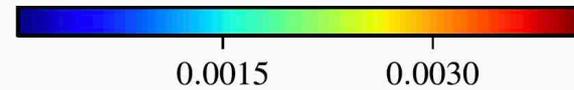
Porth&Komissarov15



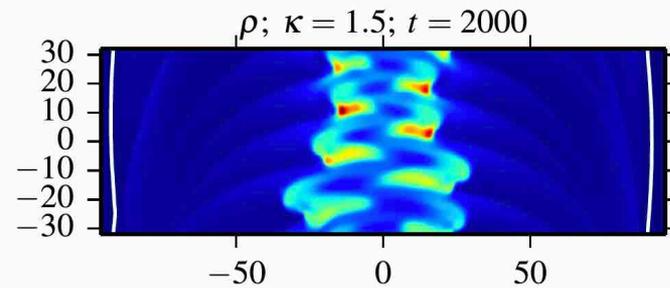
ローレンツ因子



密度



2.5 5.0 7.5



0.0008 0.0016 0.0024

軸対称ジェット的不安定性( $\kappa < 2$ )

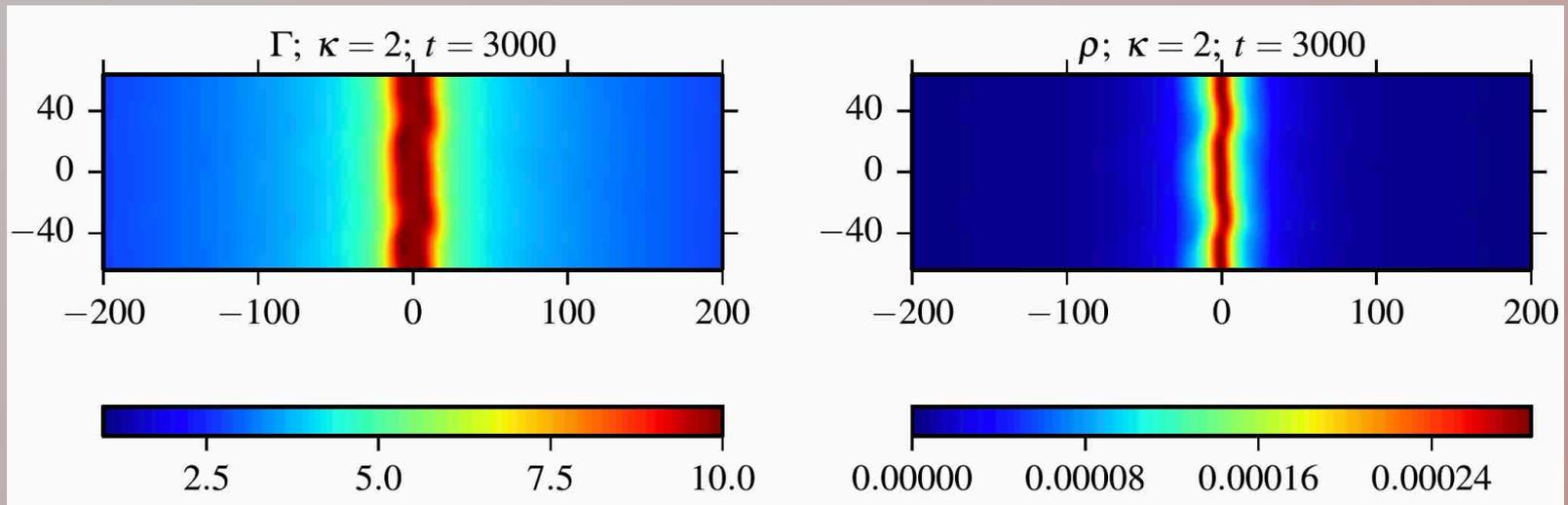
$$P_{\text{ext}} \propto z^{-\kappa}$$

# 安定性について

外圧が安定性に寄与

- 横方向の急速な膨張によって、ジェットが安定化
- 加速の時と同様に安定性についても $\kappa = 2$ がcritical

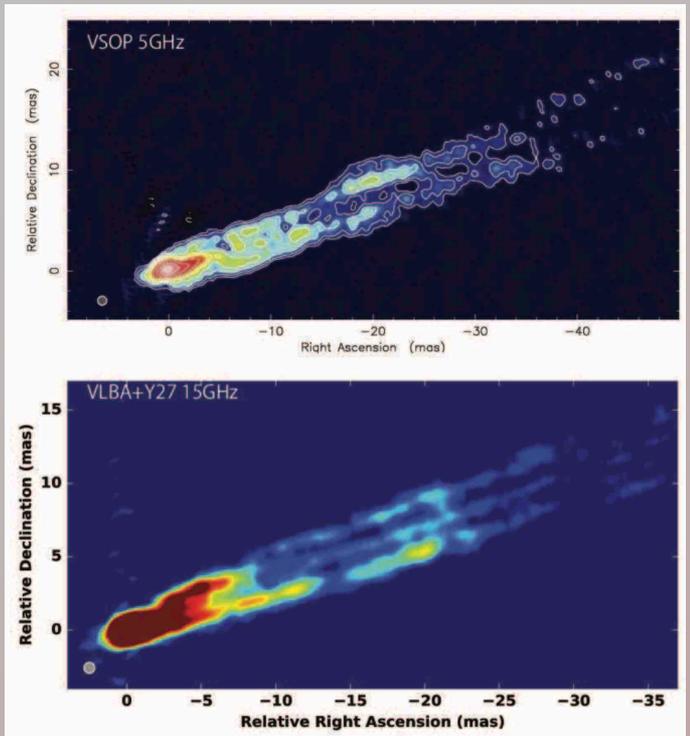
Porth&Komissarov15



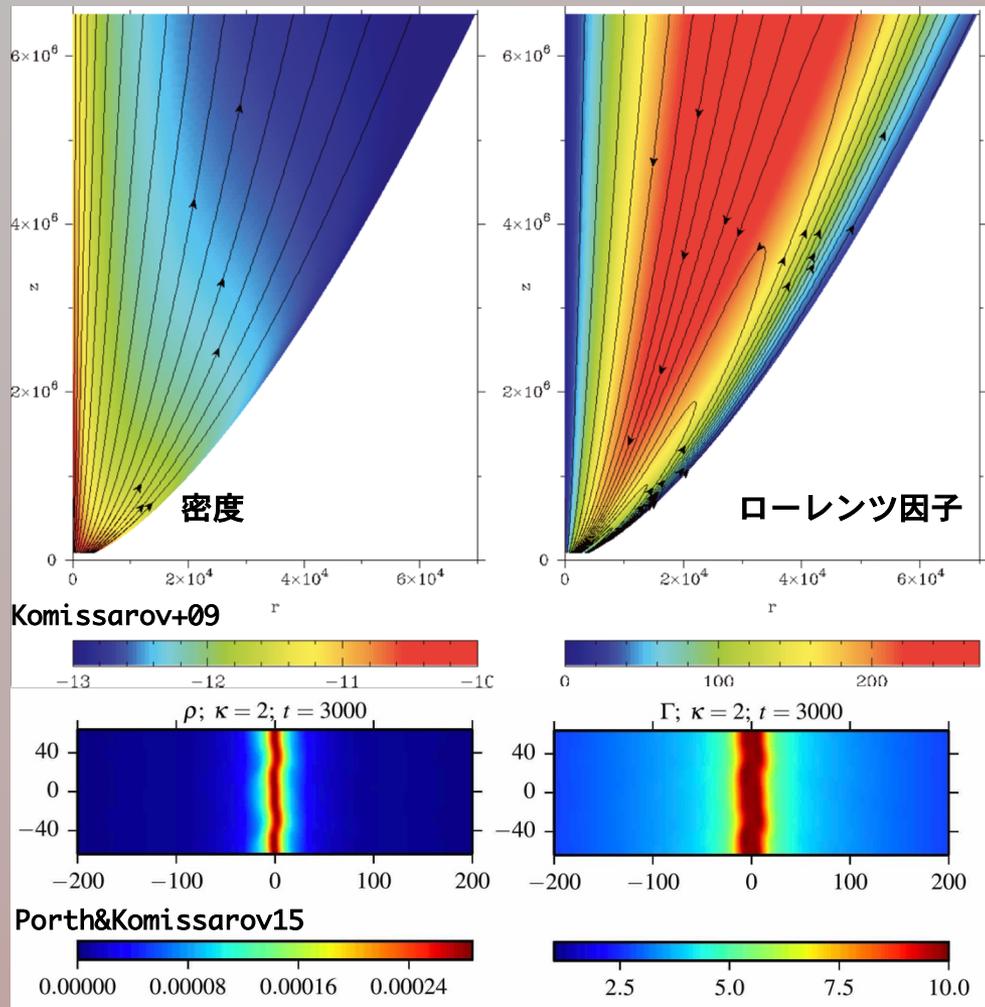
**FR II typeのジェットの候補**

# モチベーション

Spine-sheath?



Asada+17



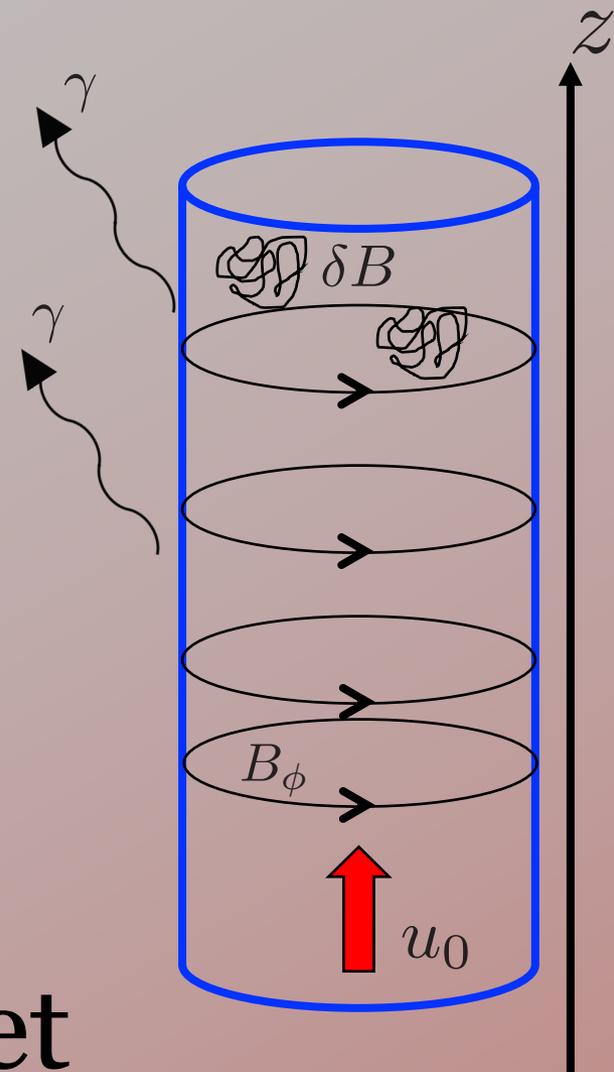
Komissarov+09

Porth&Komissarov15

Cylinder構造のジェットが安定的に存在

乱流磁場モデルで何かできないか?

# A Model of Cylindrical Jet



# Basic Equations

TTT18の乱流磁場入りの相対論的MHD modelを採用。

**radiation loss**, **turbulent magnetic field**, & **magnetic dissipation**.

Eq. of continuity  $\langle \nabla_{\mu} (n u^{\mu}) \rangle = 0,$

Conservation of total energy  $\langle \nabla_{\mu} T^{\mu t} \rangle = -\gamma \frac{\Lambda_{\text{rad}}}{c},$

Conservation of fluid internal energy  $-\langle u_{\nu} \nabla_{\mu} T_{\text{FL}}^{\mu\nu} \rangle = \frac{\delta b^2 / 2}{\tau_{\text{diss}}} - \frac{\Lambda_{\text{rad}}}{c},$

Induction equation for (mean) toroidal field + turbulent field  $\frac{1}{2} \langle \bar{b}_{\mu} e^{\mu\nu\alpha\beta} \nabla_{\nu} F_{\alpha\beta} \rangle = -\frac{\bar{b}^2 / 2}{\tau_{\text{conv}}},$

$$\frac{1}{2} \langle \delta b_{\mu} e^{\mu\nu\alpha\beta} \nabla_{\nu} F_{\alpha\beta} \rangle = \frac{\bar{b}^2 / 2}{\tau_{\text{conv}}} - \frac{\delta b^2 / 2}{\tau_{\text{diss}}}.$$

定常な円柱状ジェットを考える

# Cylinder Jet再考

一次元定常流は加速しない  $\Leftrightarrow$  一次元定常流は膨張しない

$$(\beta^2 - \beta_c^2) \frac{du}{dx} = \frac{8u}{3r} \frac{p}{\epsilon}, \quad \epsilon = w + \bar{b}^2$$

TTT18ではCrab Nebula内での乱流磁場の生成による減速を考えた

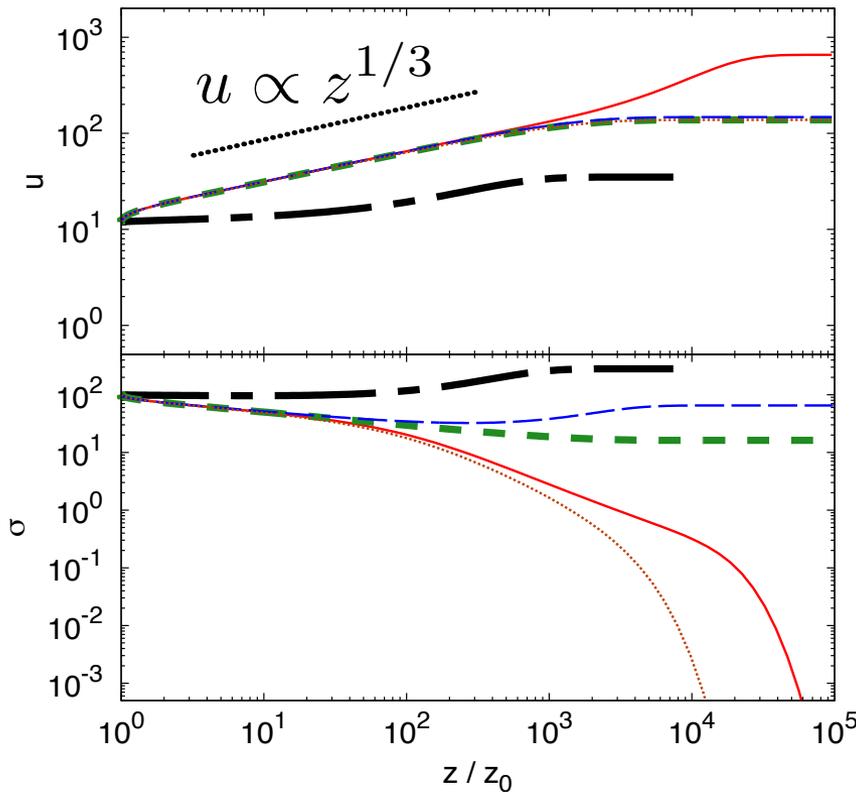
$$(\beta^2 - \beta_c^2) \frac{du}{dx} = \frac{8u}{3r} \frac{p}{\epsilon} + \frac{\Lambda_{\text{rad}}}{3c} + \frac{\bar{b}^2}{3c\tau_{\text{conv}}}$$

希薄化加速とは別のメカニズム

# Results $u$ & $\sigma$

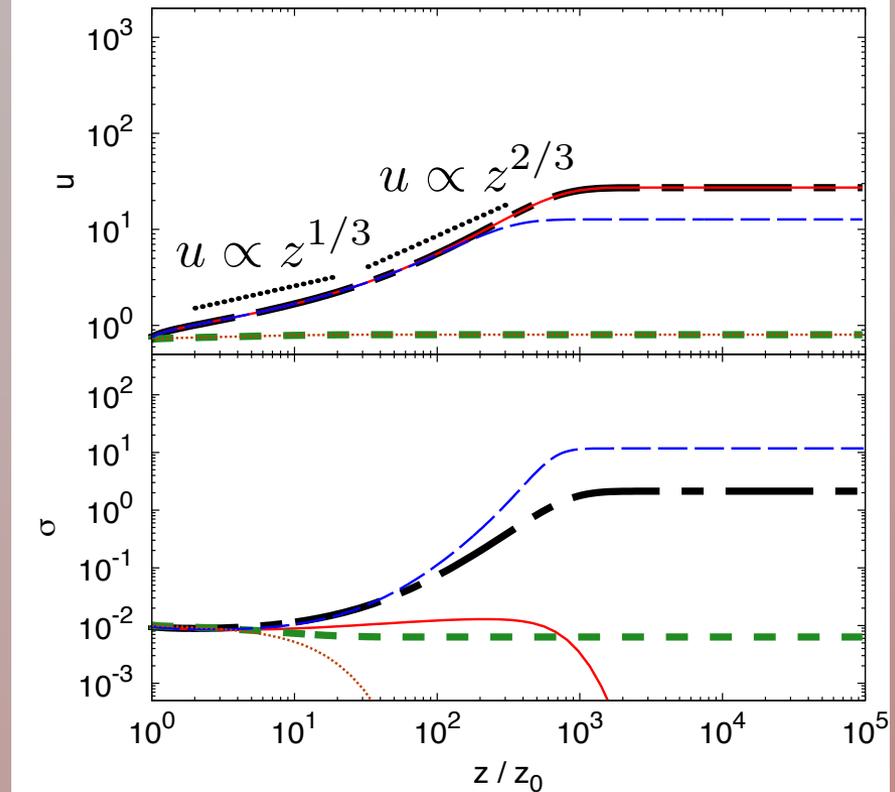
固有系で  $z_{\text{diss}}, z_{\text{conv}}$  が一定

High- $\sigma$  flow:  $\sigma_0 = 10^2$



	黒	赤	緑	青	茶
$\tilde{z}_{\text{conv}}$	$10^{10}$	10	10	10	10
$\tilde{z}_{\text{diss}}$	$10^{10}$	10	$10^{10}$	$10^{10}$	10
$\tilde{z}_{\text{cool}}$	10	10	$10^{10}$	10	$10^{10}$

Low- $\sigma$  flow:  $\sigma_0 = 10^{-2}$



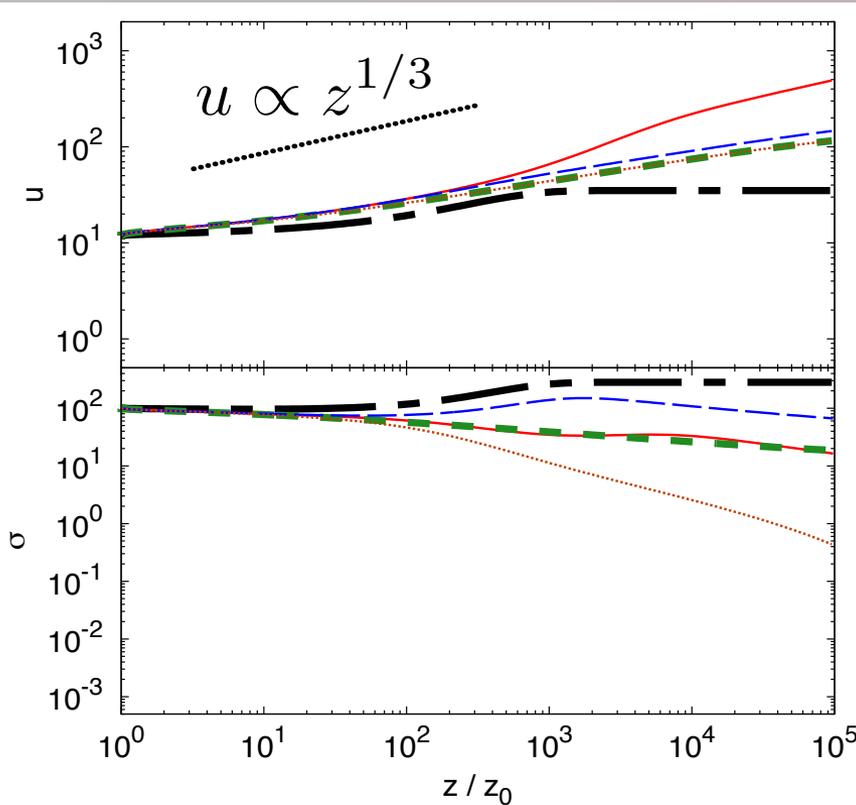
$$(n_0, u_0, w_0, b_0, \delta b_0) = (\gamma_{\text{max}} = 10^4, u_c + \delta u, 1.0, \sigma_0, 0.0)$$

$w_0 \left[ \frac{L_0}{A_0 c u_0 \gamma_0 (1 + \sigma_0)} \right]$   $L_0$ (全光度),  $A_0$ (断面積),  $z_0$ (初期位置)で系が定まる。

# Results $u$ & $\sigma$

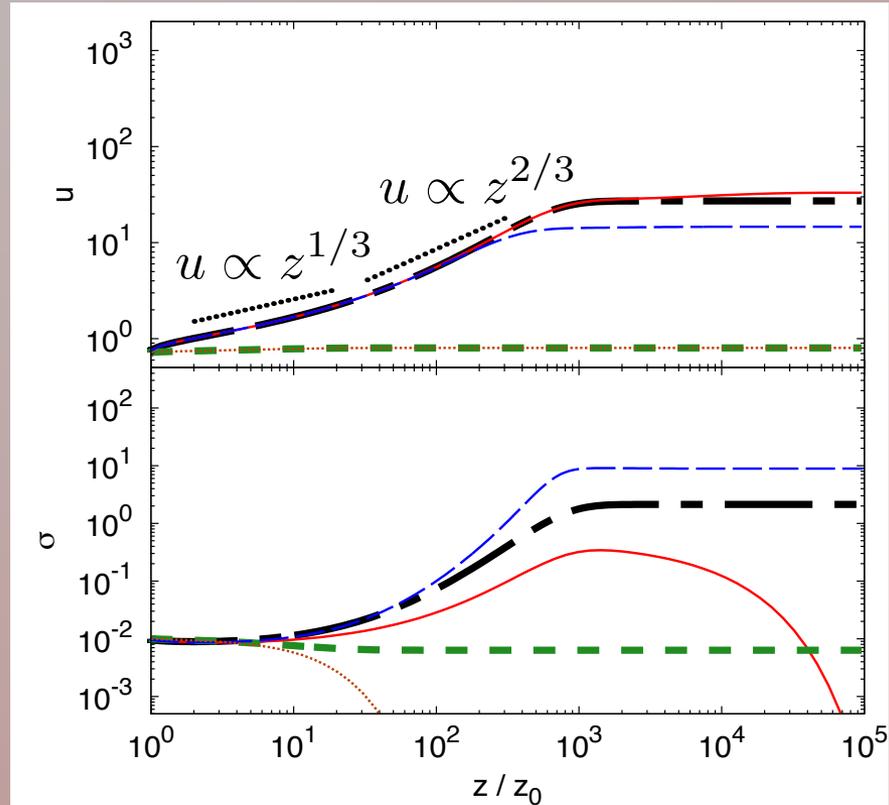
観測者系で  $z_{\text{conv}}$  が一定

High- $\sigma$  flow:  $\sigma_0 = 10^2$



	黒	赤	緑	青	茶
$\tilde{z}_{\text{conv}}$	$10^{10}$	10	10	10	10
$\tilde{z}_{\text{diss}}$	$10^{10}$	10	$10^{10}$	$10^{10}$	10
$\tilde{z}_{\text{cool}}$	10	10	$10^{10}$	10	$10^{10}$

Low- $\sigma$  flow:  $\sigma_0 = 10^{-2}$



$$(n_0, u_0, w_0, b_0, \delta b_0) = (\gamma_{\text{max}} = 10^4, u_c + \delta u, 1.0, \sigma_0, 0.0)$$

$w_0 \left[ \frac{L_0}{A_0 c u_0 \gamma_0 (1 + \sigma_0)} \right]$   $L_0$ (全光度),  $A_0$ (断面積),  $z_0$ (初期位置)で系が定まる。

# Discussion

# Cooling acceleration

定常な円柱状ジェット、磁場なし

$$\partial_z(nu) = 0,$$

$$\partial_z(u\gamma w) = -\gamma\Lambda_{\text{rad}}/c,$$

$$\partial_z(u^2w) + \partial_z p = -u\Lambda_{\text{rad}}/c,$$

$$nmc^2 + \frac{\hat{\Gamma}}{\hat{\Gamma} - 1}p = w$$



$$cu' = \frac{(\hat{\Gamma} - 1)\Lambda_{\text{rad}}}{(1 + \beta^2 - \hat{\Gamma})w + (\hat{\Gamma} - 1)nmc^2}$$

$$\partial_z(\rho v) = 0,$$

$$\partial_z(\rho v(v^2/2 + h/\rho)) = -\Lambda_{\text{rad}},$$

$$\partial_z(\rho v^2) + \partial_z p = 0,$$

$$\frac{\hat{\Gamma}}{\hat{\Gamma} - 1}p = h$$



$$v' = \frac{(\hat{\Gamma} - 1)\Lambda_{\text{rad}}}{(1 - \hat{\Gamma})h + nmv^2}$$

- 冷えると加速はrelativistic effectではない。
- 超音速流は加速、亜音速流は減速、遷音速流はなし。

# Dissipation acceleration

定常な円柱状ジェット、coolingなし、磁場散逸あり

$$\langle \nabla_{\mu}(nu^{\mu}) \rangle = 0,$$

$$\langle \nabla_{\mu}T^{\mu t} \rangle = 0,$$

$$-\langle u_{\nu} \nabla_{\mu}T_{\text{FL}}^{\mu\nu} \rangle = \frac{\bar{b}^2/2}{\tau_{\text{diss}}},$$

$$\frac{1}{2} \langle \bar{b}_{\mu} e^{\mu\nu\alpha\beta} \nabla_{\nu} F_{\alpha\beta} \rangle = -\frac{\bar{b}^2/2}{\tau_{\text{diss}}}.$$

$$\tau_{\text{diss}} = \text{const.}$$

$$w \approx nmc^2, \quad \gamma \gg 1, \quad \sigma \gg 1$$



$$\gamma \propto z^{1/2}$$

- Drenkhan02他で知られるモデル。
- SphericalもCylinderも同じ冪指数。

# Conversion acceleration

定常な円柱状ジェット、coolingなし、磁場散逸なし

$$\langle \nabla_{\mu} (n u^{\mu}) \rangle = 0,$$

$$\langle \nabla_{\mu} T^{\mu t} \rangle = 0,$$

$$-\langle u_{\nu} \nabla_{\mu} T_{\text{FL}}^{\mu\nu} \rangle = 0,$$

$$\frac{1}{2} \langle \bar{b}_{\mu} e^{\mu\nu\alpha\beta} \nabla_{\nu} F_{\alpha\beta} \rangle = -\frac{\bar{b}^2/2}{\tau_{\text{conv}}},$$

$$\frac{1}{2} \langle \delta b_{\mu} e^{\mu\nu\alpha\beta} \nabla_{\nu} F_{\alpha\beta} \rangle = \frac{\bar{b}^2/2}{\tau_{\text{conv}}}.$$

$$\tau_{\text{conv}} = \text{const.}$$

$$w \approx n m c^2, \quad \gamma \gg 1, \quad \sigma \gg 1$$



$$\gamma \propto z^{1/3}$$

- Dissipationとは振る舞いが異なる。
- 磁気圧の減り方が変わる効果?
  - 磁場無しで加速しないのに?

# Summary

## 一次元流の加速

- 乱流磁場の生成、散逸をモデル化した非MHD方程式系 c.f., STTT18
- 球対称系と同じ  $u \propto z^{1/3}$  が得られる。 c.f., Drenkhan02
- 散逸+放射冷却を加えることでより加速する。
- 磁場変換、磁場散逸、冷却はそれぞれ違う加速の仕方を示す。
- Total energyが同じ場合、high- $\sigma_0$  flowの方が(粒子が少ない分)速くなれる。

## Further studies

- Mass loading jet? c.f., Komissarov94
- 安定なcylinder jetの $\tau_{\text{conv}}$ をどう評価するのか?
  - Spine-sheath構造でも本当に安定?