

2005年12月27日 基礎物理学研究所研究会
「高エネルギー天体物理学の最前線」

宇宙ジェットの形成： MHDモデルか否か？

高原 vs 柴田 論争(2001) revisited

柴田一成 京大理花山天文台
(工藤哲洋 国立天文台)

講演内容

- 宇宙ジェット形成: MHDモデルか否か?
高原vs柴田(2001年3月@宇宙研) revisited
 - MHDジェット駆動には、大局的磁場の存在が必要か?
 - エネルギー解放率は十分か?
 - ローレンツ因子の大きなジェットを作るにはどうすれば良いか?
 - 岡本論争について: MHDジェットのコリメーション
 - $E(\text{粒子}) \gg E(\text{磁場})$ という観測をどう考えるか?
 - 今後の課題: 加速と構造, collimation, 観測
- その後の進展(2001–2005)
- 残された問題点

2001年3月29日 「ディスクとジェット」研究会(宇宙研)

宇宙ジェットの形成： MHDモデルか否か？ 高原vs柴田

柴田一成、工藤哲洋

宇宙ジェットの特徴(まとめ)

	活動銀河核	近接連星系	星形成領域
中心天体	超巨大ブラックホール	ブラックホールまたは中性子星	原始星
ジェットの長さ	100万光年	10光年	1光年
ジェットの速度	光速	0.3 – 1 光速	100km/s
脱出速度	光速	0.3 – 1 光速	100km/s

2. 宇宙ジェットの理論モデル

原始星の場合

~~ガス圧加速モデル~~

音速 $\ll$ ジェットの速度

~~放射圧加速モデル~~

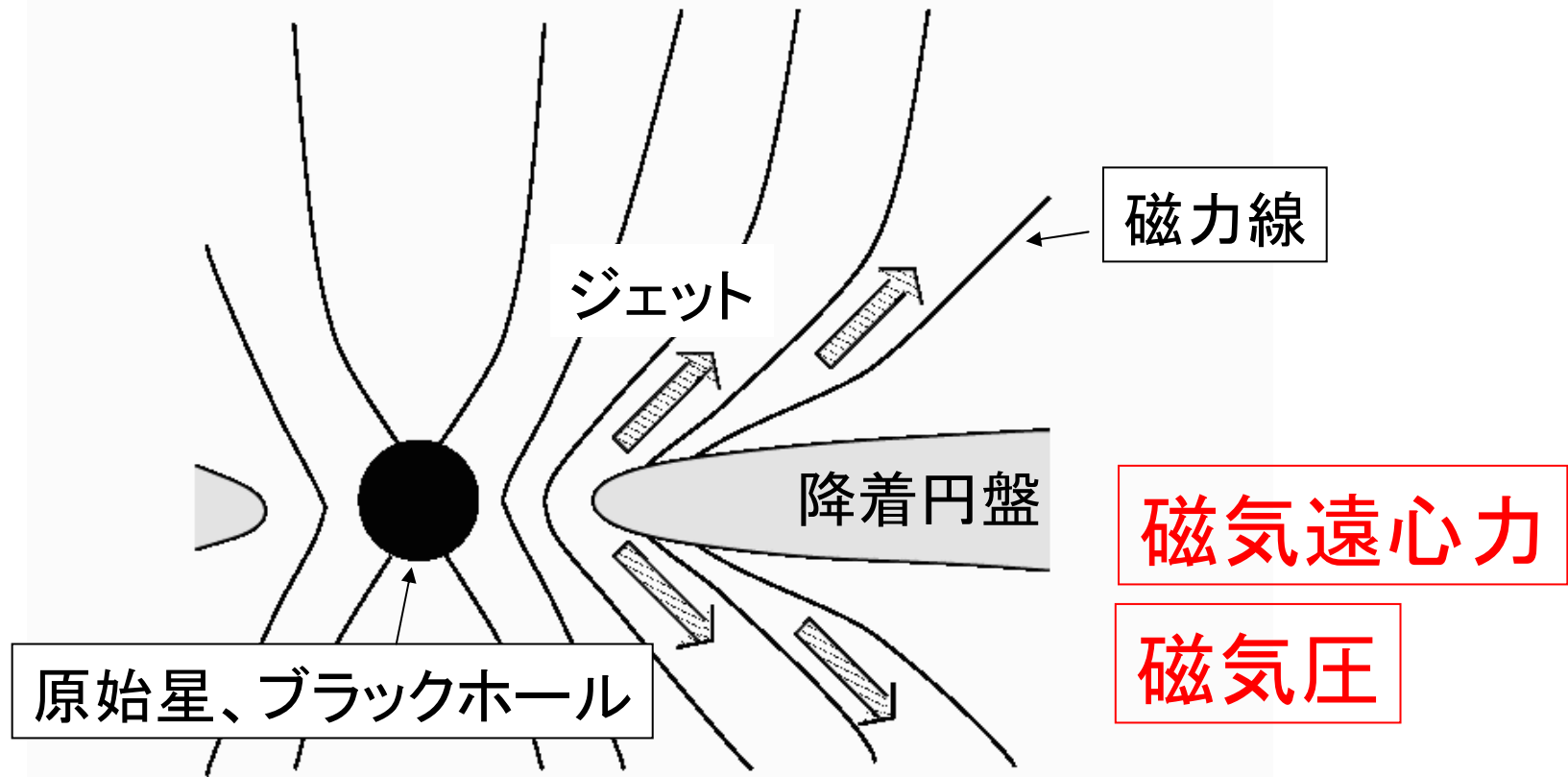
放射の運動量

$\ll$ ジェットの運動量

磁気力で加速するモデル
(磁気流体モデル)

宇宙ジェットの磁気流体モデル

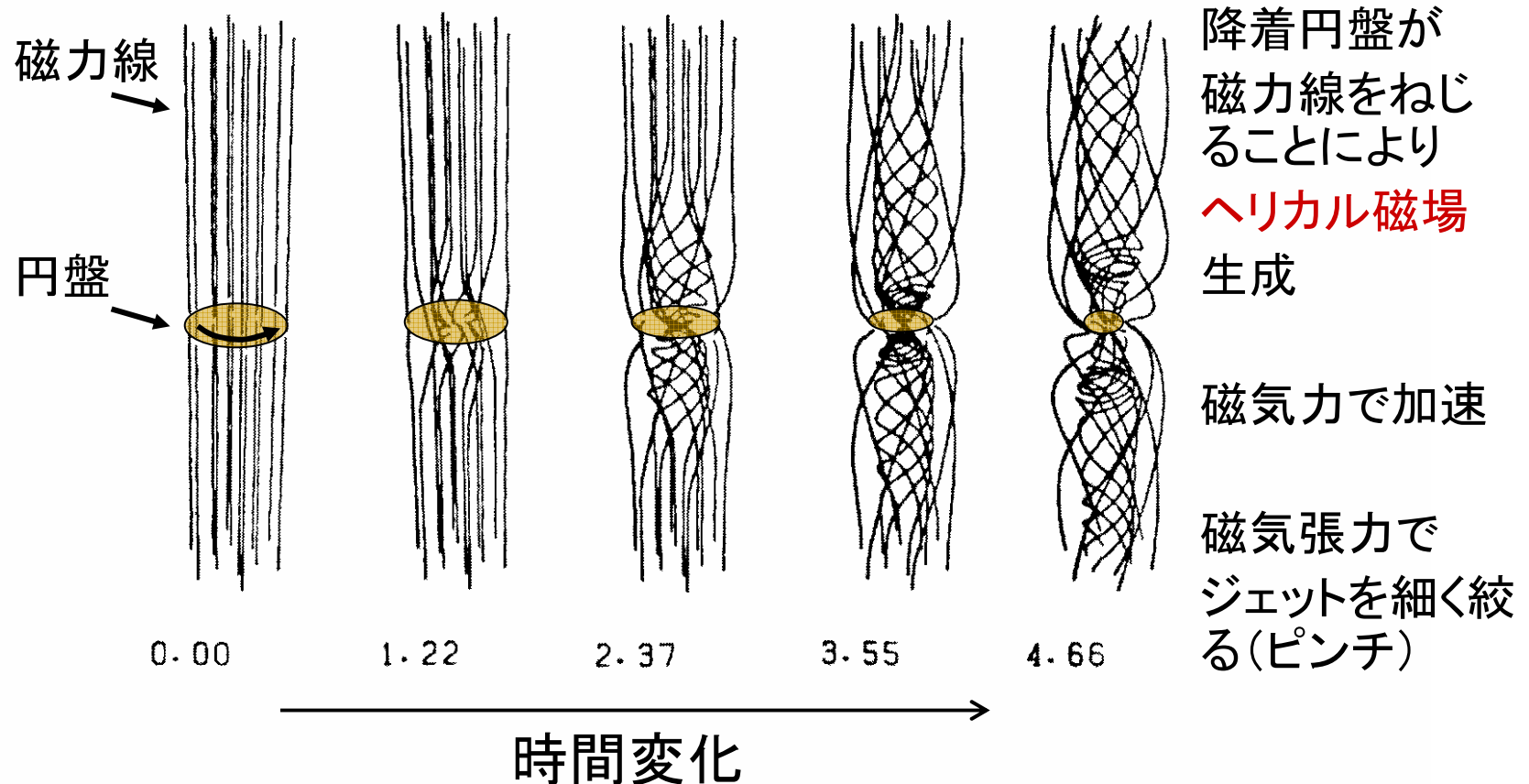
磁場と回転によってアウトフローを加速するモデル



Blandford, Lovelace, Uchida-Shibata, Pudritz-Norman, Shu,,,

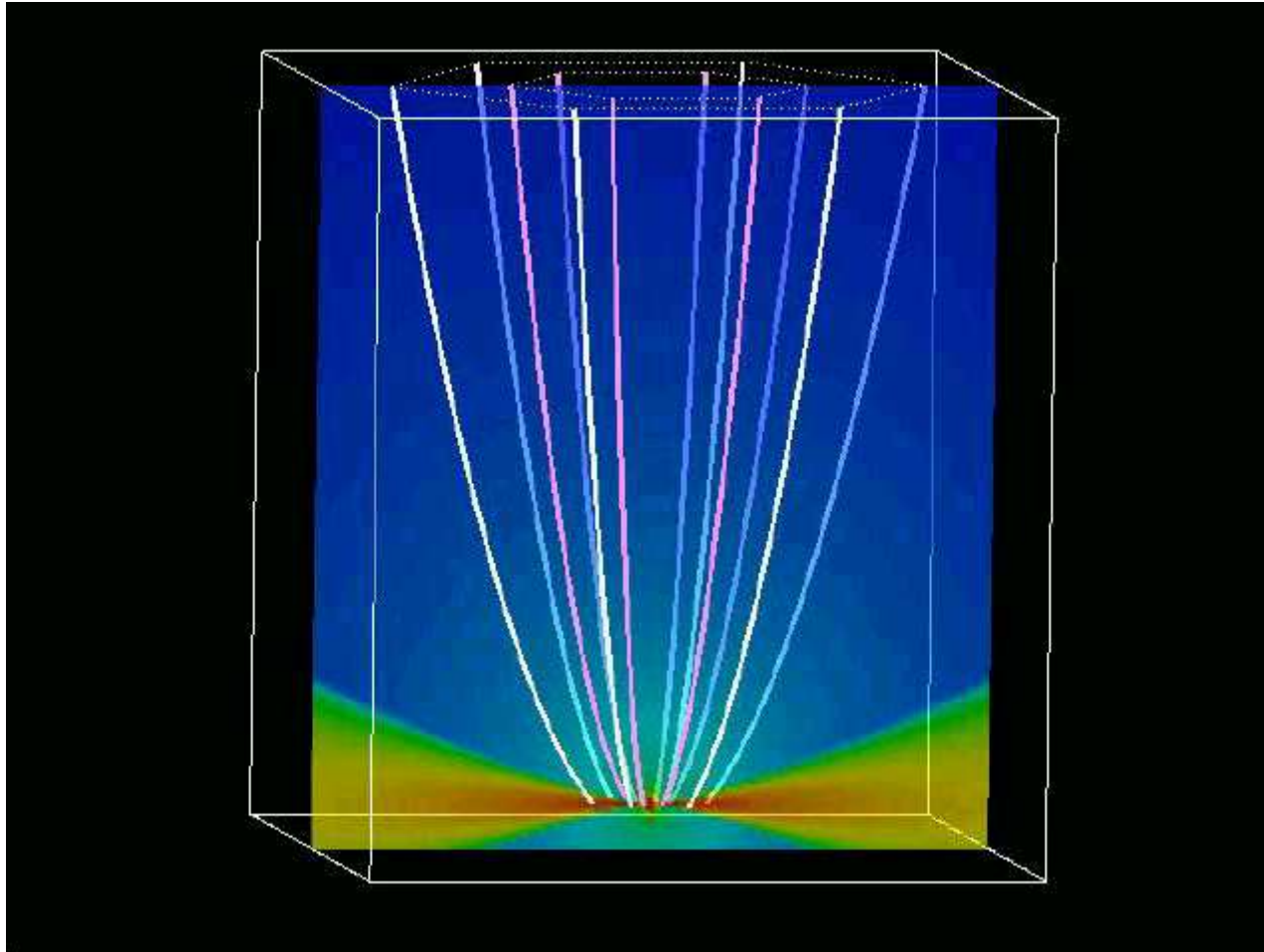
宇宙ジェットの電磁流体数値シミュレーション

Shibata & Uchida (1986)



ジェットの速度～ケプラー速度(円盤の回転速度)
～中心天体近傍では、その脱出速度

宇宙ジェットの電磁流体モデル (工藤、松元、柴田 2000)



MHDジェット駆動には、
大局的磁場の存在が必要か？

高原： 活動銀河核や連星系で
は大局的磁場は弱い(?)
からMHDジェットはできない

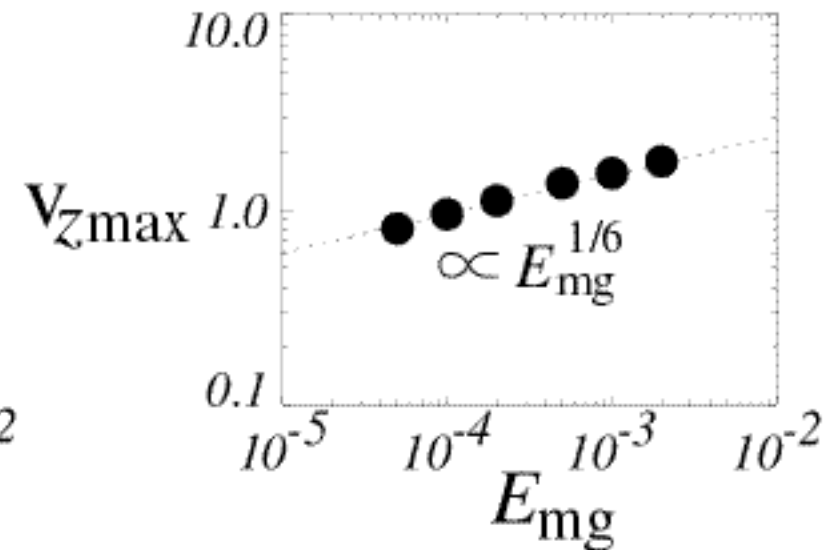
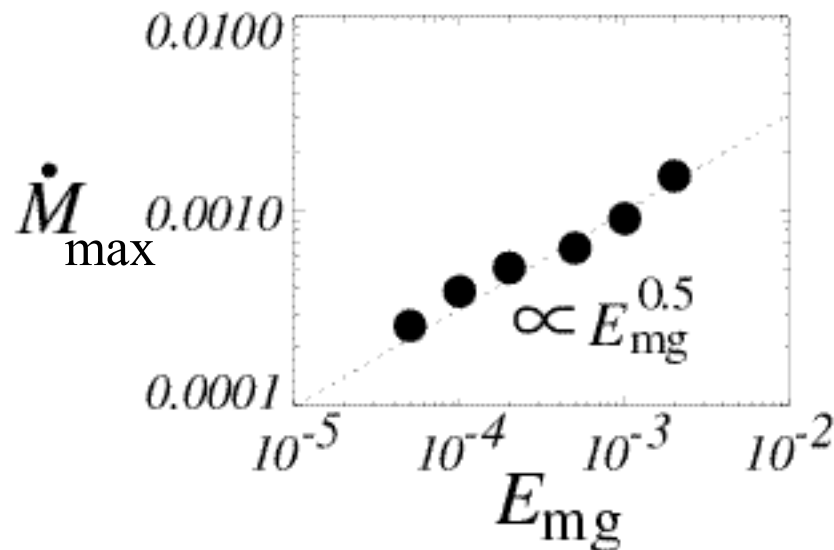
工藤・柴田：

- 1) 大局的磁場は弱くても、MHD
ジェットはできる！
- 2) 局所的磁場でも、MHDジェット
はできる！

磁場に対する依存性 (from 2.5D-MHD
simulation by Kudoh et al. 1998)

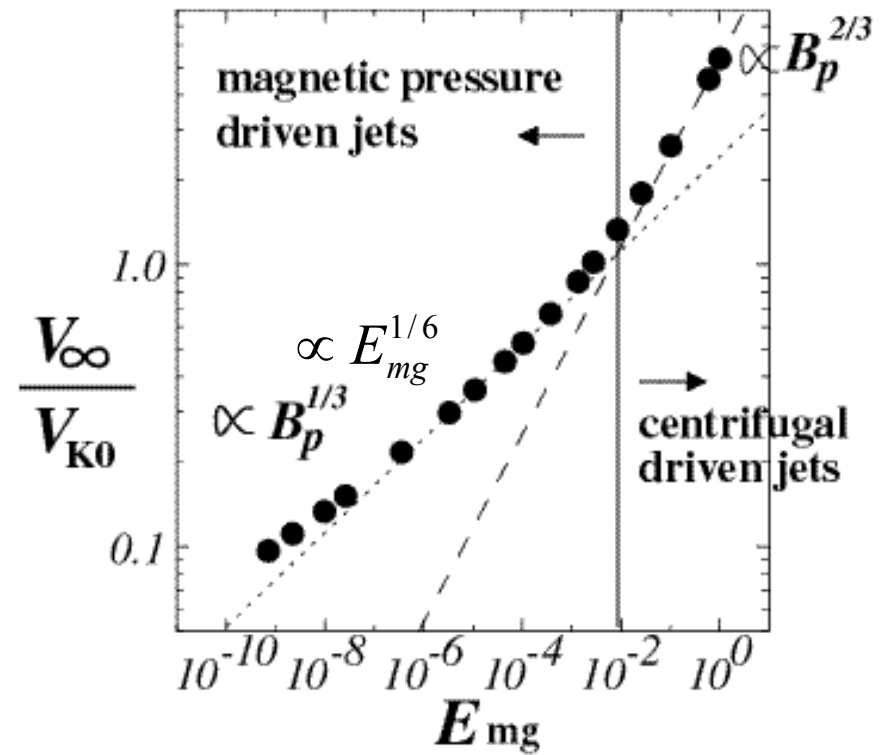
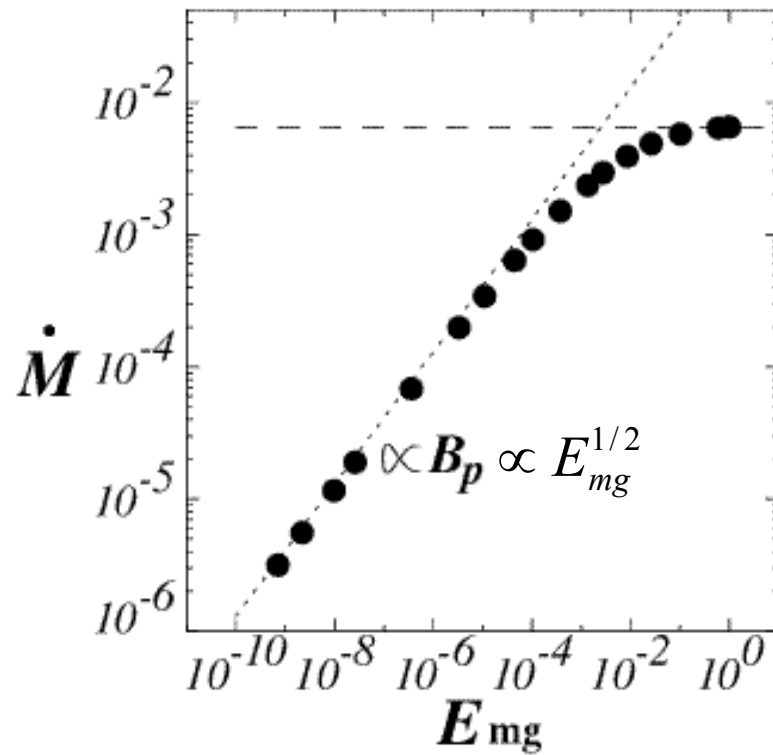
質量放出率

ジェット速度 / V_K



$$E_{\text{mg}} = \left(\frac{V_A}{V_K} \right)^2 = \text{磁気エネルギー} / \text{重力エネルギー}$$

定常理論 (Kudoh & Shibata 1997)



$$E_{\text{mg}} = \left(\frac{V_A}{V_K} \right)^2 \propto B_p^2$$

Jet velocity

$$V_{jet} \approx B_{\phi} / (4\pi\rho)^{1/2}$$
$$\approx \left(\frac{\Omega^2 B_p^2 r^4}{\dot{M}} \right)^{1/3}$$

Michel (1969) velocity

$$\approx \left(\frac{V_A}{C_s} \right)^{1/3} V_k \propto B_p^{1/3}$$

V_k : ケプラー速度
(円盤回転速度)

$$V_A = B_p / (4\pi\rho)^{1/2}$$

磁気遠心力 vs 磁気圧

• ポロイダル磁場	強い	弱い
• 降着円盤近傍の 磁力線形状	直線的	ぎりぎり巻き
• 質量流出量	$\rho C_s r^2$	$\rho C_s r^2 \frac{B_p}{B}$
• 最終速度 (V_∞)	$V_k \left(\frac{V_A^2}{C_s V_k} \right)^{1/3}$	$V_k \left(\frac{V_A}{C_s} \right)^{1/3}$
• 適用範囲	$E_{mg,c} < E_{mg} < 1$	$E_{mg} < E_{mg,c}$

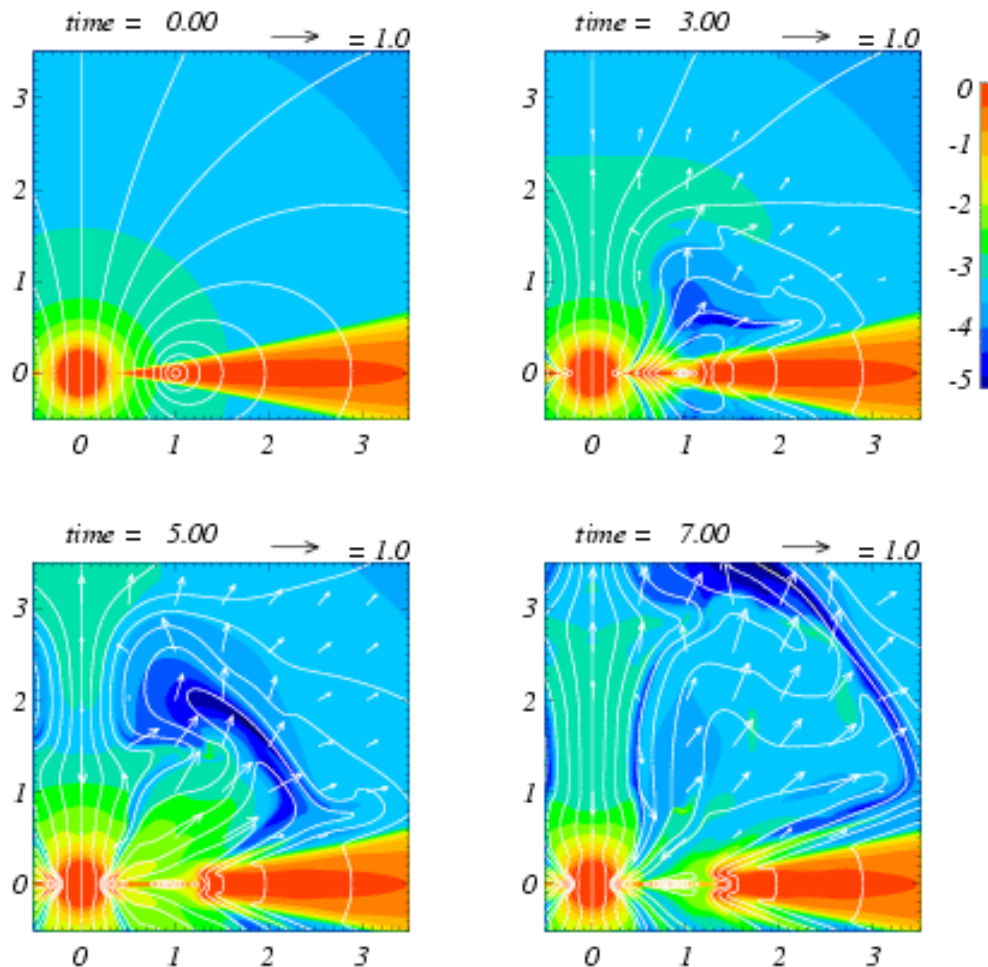
$E_{mg} \equiv$ 磁気エネルギー／重力エネルギー

$E_{mg,c} \equiv \rho_s / \rho_d$

局所的磁場でも、ジェットは 加速できる

1. 降着円盤にダイポール磁場
2. 中心天体にダイポール磁場

ダイポール磁場の場合 (Kudoh et al. 2001)



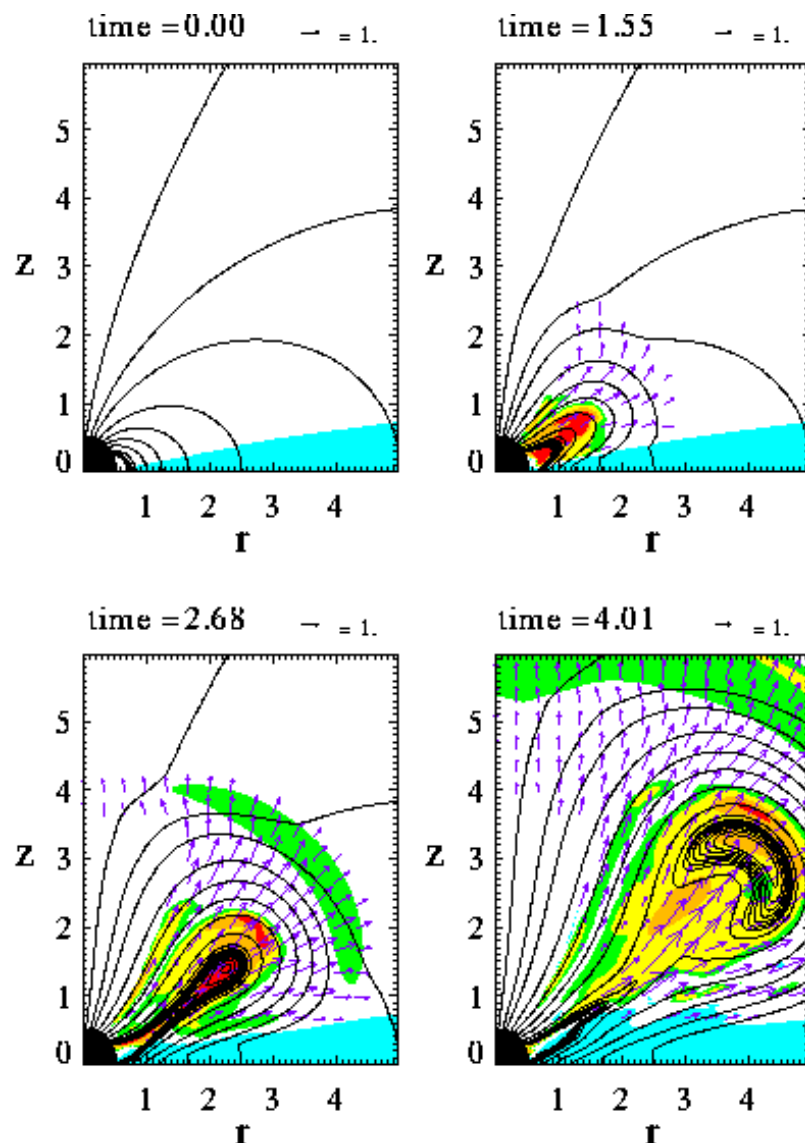
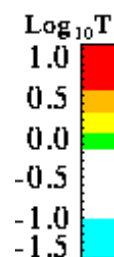
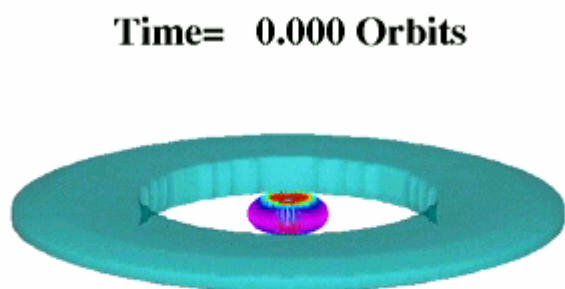
2成分

Polar jet

Equatorial wind

(ただし、非定常
過程?)

原始星フレアの MHDmodel (Hayashi, Shibata Matsumoto 1996)



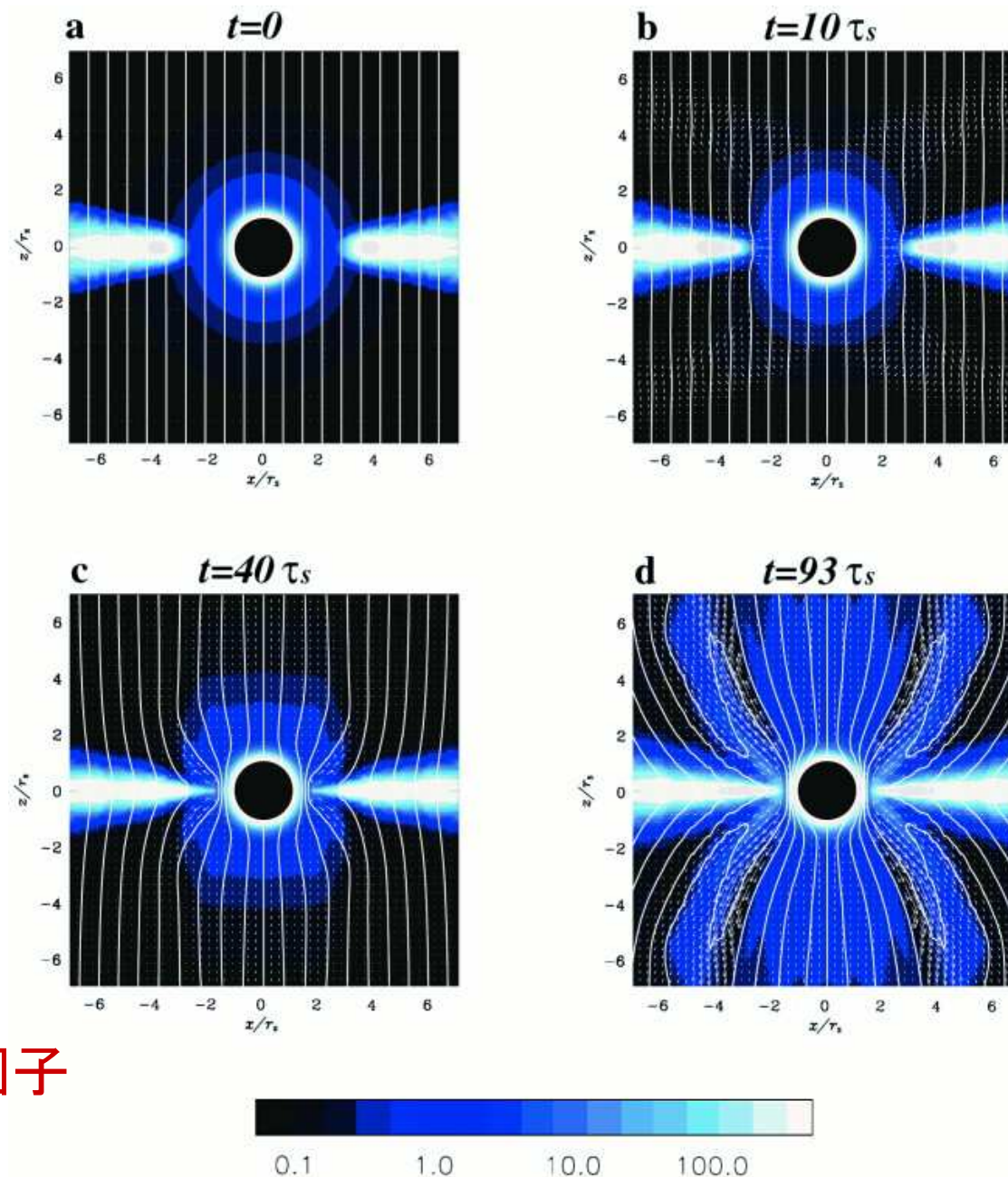
ローレンツ因子 ~ 10 は 磁場加速説では困難？

これまでの多くの研究では、降積円盤が強い磁場を持っていて、この磁場によってジェット
の加速が起こるという仮説を採用していた。降積円盤がこのような強い磁場を持っているとい
うことは理論的にはありそうもないことであるが、他の加速機構も多くの困難を抱えているため
磁場による加速という仮説が一定の支持を受けてきたのである。しかし、磁場による加速でも、
ローレンツ因子が10というような加速を起こすのに成功している例は皆無に近いということ
は多くの人には認識されていないのではなかろうか。数値シミュレーションできれいな絵をみ
せられると何となく納得してしまうという悪い例の一つであろう。近年の観測の進展によって
相対論的ジェット中の磁場はかなり弱いことが判明し、磁場仮説は観測的にも問題を抱えるこ
とになってきた。またジェットの組成も電子陽子プラズマよりは電子陽電子対が主成分である
ことも強く示唆されている。

一般相 対論的 MHD ジェット

(Koide,
Shibata,
Kudoh
1998、
1999,2000,
Aoki et al.)

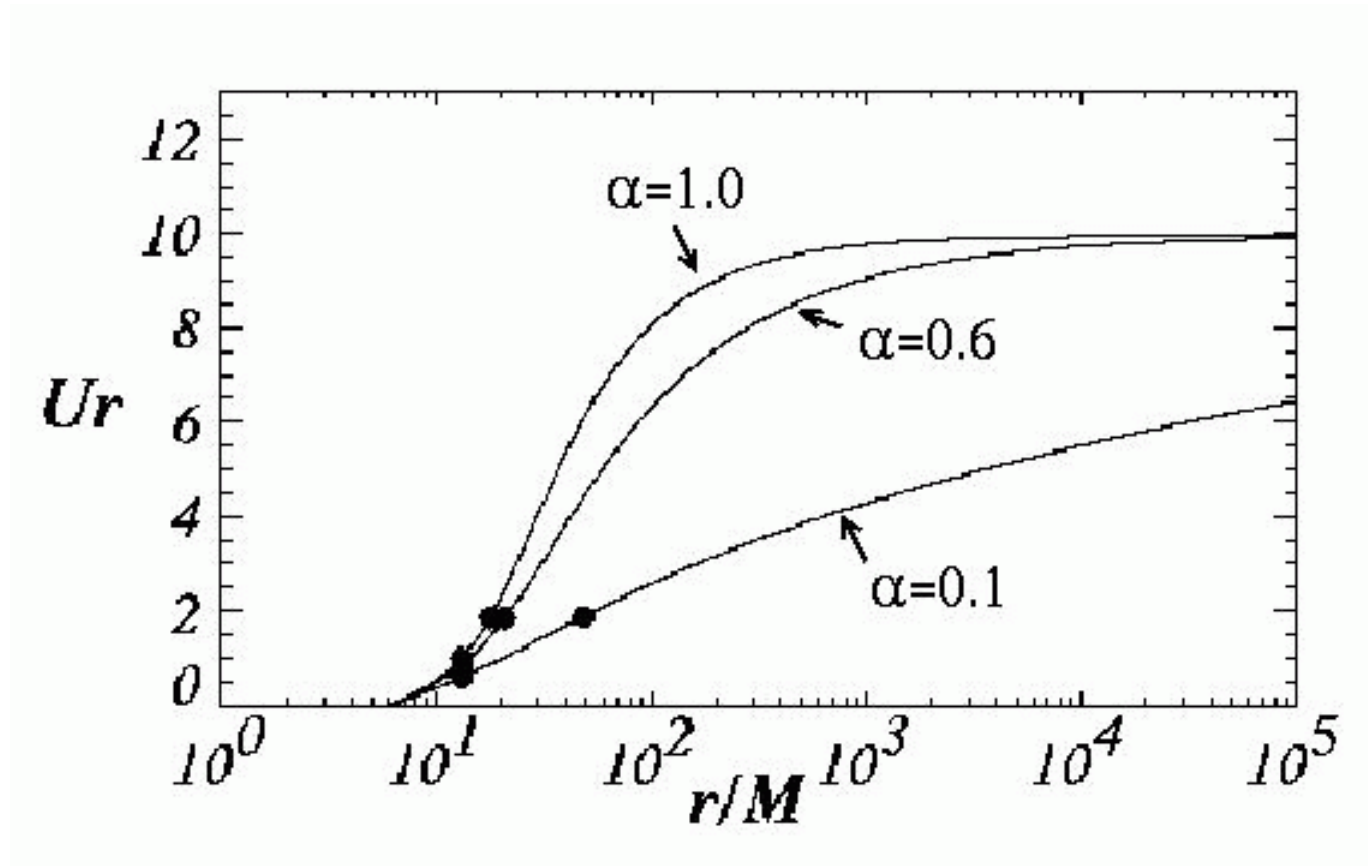
最大のローレンツ因子
~2 => real limit ?



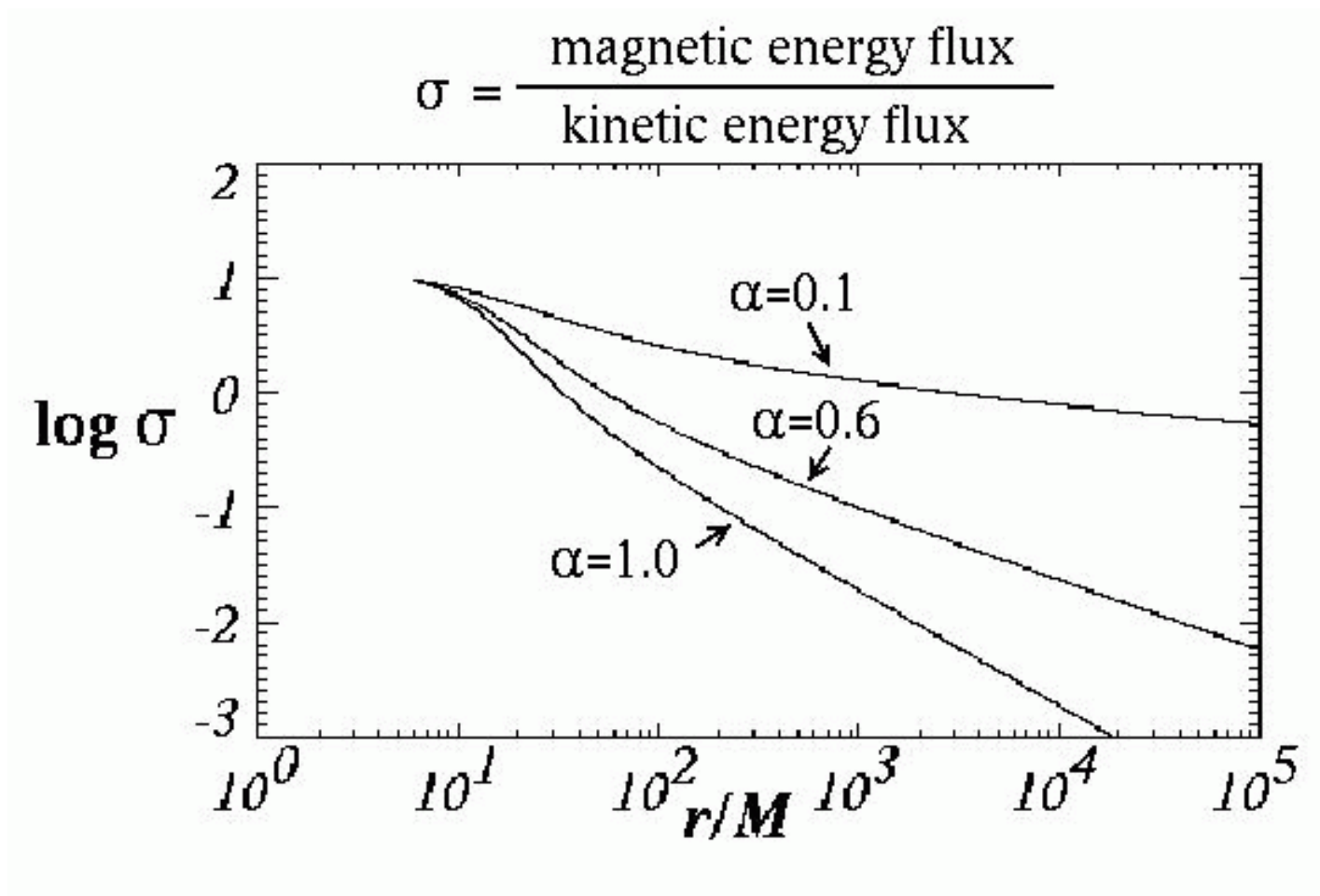
ローレンツ因子の大きなジェットを作るにはどうすれば良いか？

- パルサー風と良く似た状況設定を作る
 - 急激に広がる FLOW TUBE (磁場)
 - 非常に希薄なコロナ (ジェット)
 - => ダイポール磁場
 - 電子・陽電子プラズマ

ローレンツ因子



Flow tube の断面積 $A \propto r^{-(2+\alpha)}$



Flow tube の断面積 $A \propto r^{-(2+\alpha)}$

岡本論争について

MHDジェットのコリメーション

- 岡本(天文月報 2000年3月)
「宇宙ジェットーあるパラダイムの終焉」

宇宙ジェットは磁場によってコリメートできる
か？

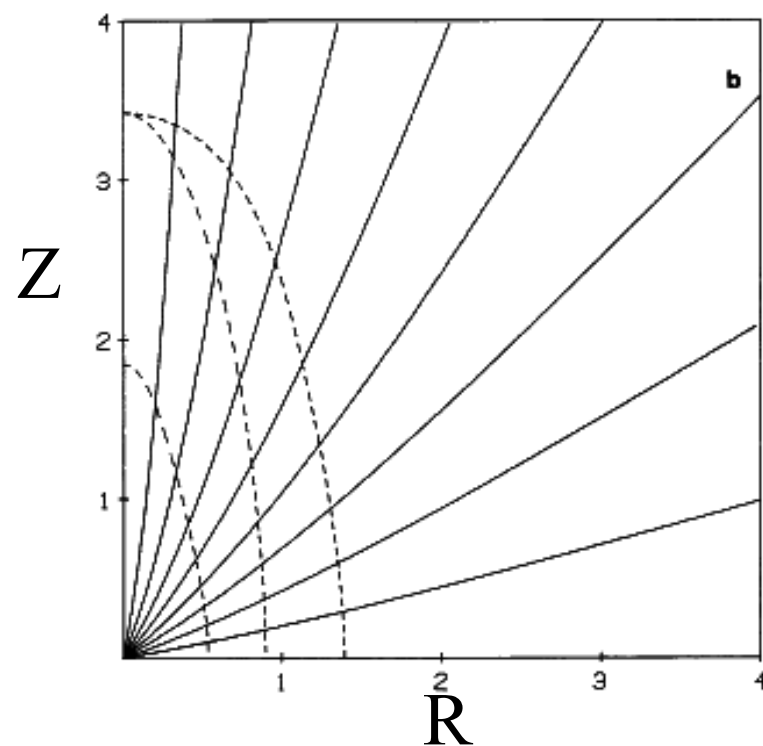
「定常・軸対称MHDアウトフローはセルフコリ
メイトしない」

これまでのコリメーションに関する研究

2次元軸対称定常解

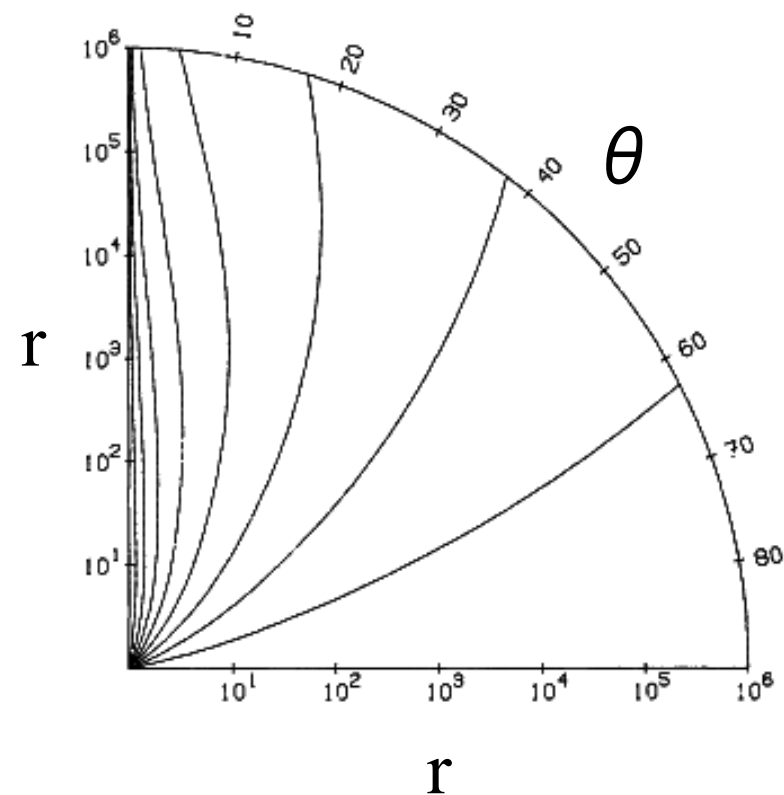
桜井(1985)

天体の近く

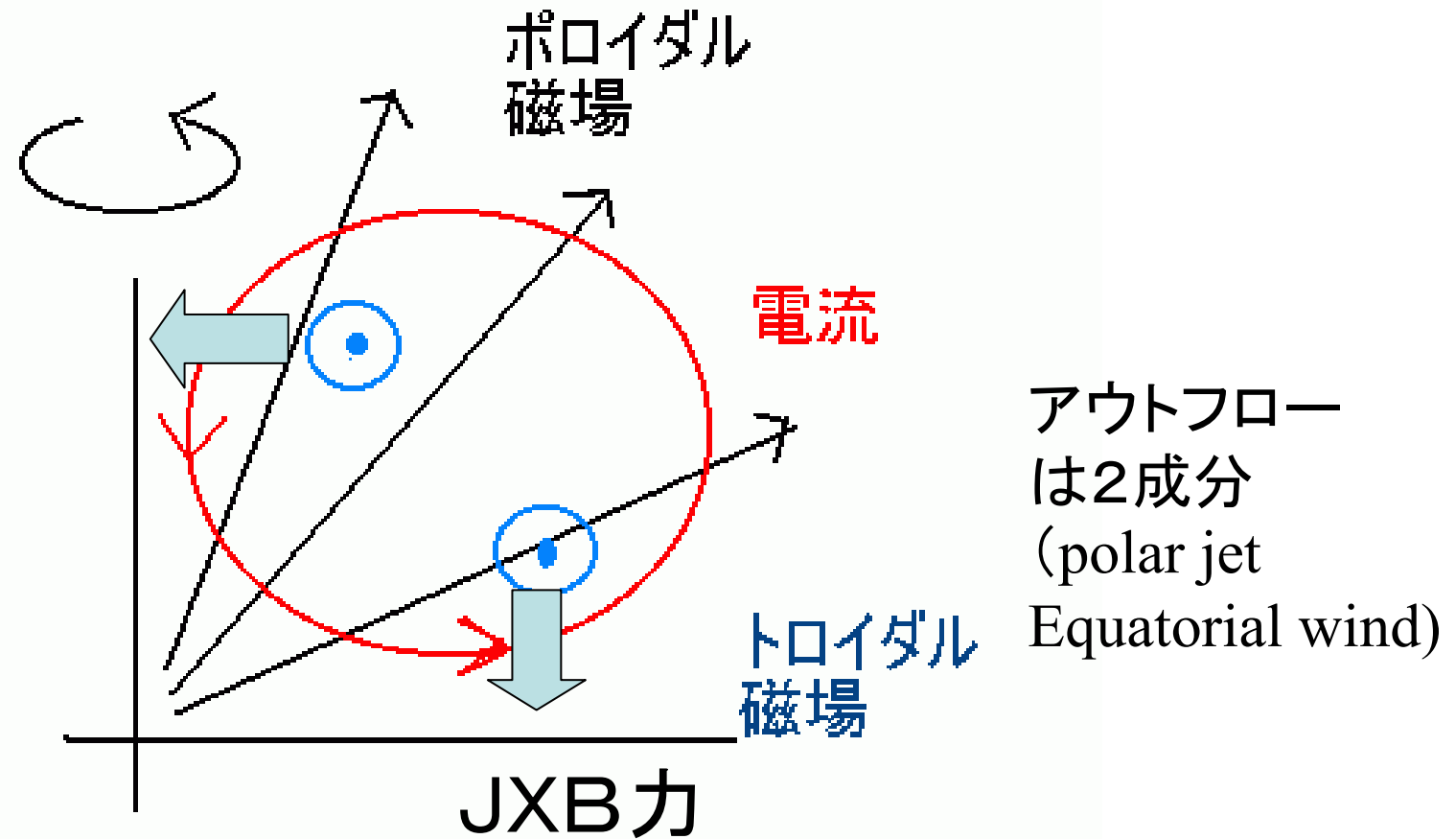


遠方

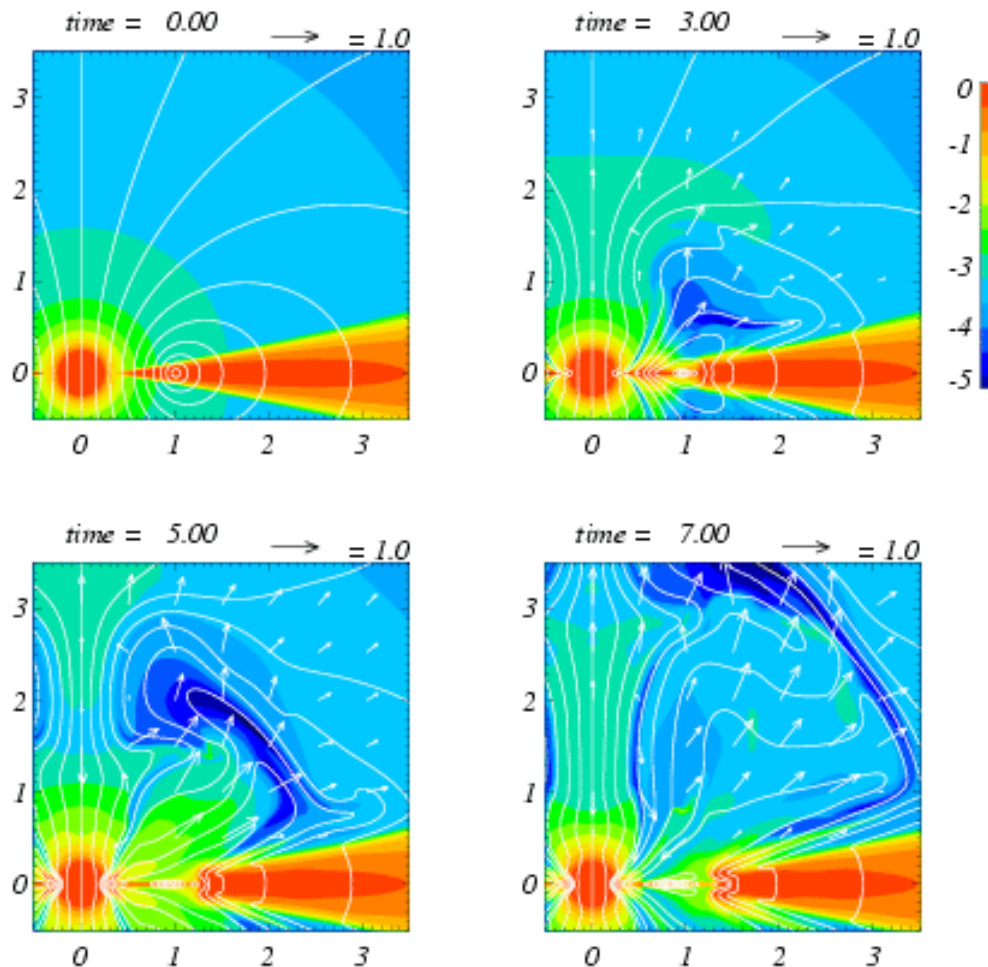
12



岡本説の論拠



ダイポール磁場の場合 (Kudoh et al. 2001)



2成分

Polar jet

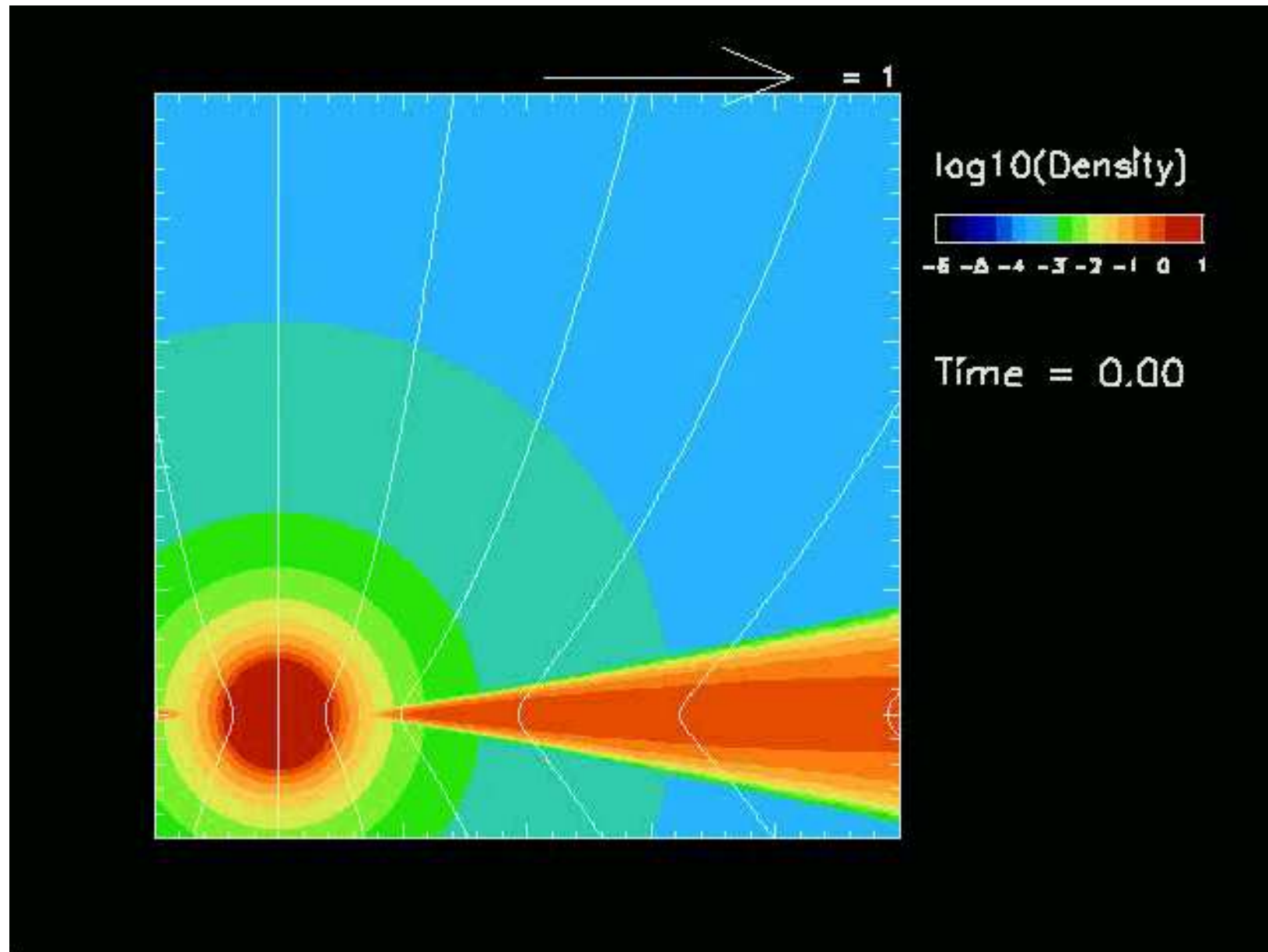
Equatorial wind

(ただし、非定常
過程?)

岡本説への反論 (天文月報別冊)

- 桜井：ダイポール磁場も、十分時間がたつとスプリットモノポール磁場になる(ただし、その証明はまだない)
- その他の反論(新田、内田、工藤、他)

コリメーションの証拠(Kudoh et al. 2001)



$E(\text{粒子}) \gg E(\text{磁場})$
という観測をどう考えるか？

ジェット中の磁場は弱いので 磁場仮説は困難？

これまでの多くの研究では、降積円盤が強い磁場を持っていて、この磁場によってジェットの加速が起こるという仮説を採用していた。降積円盤がこのような強い磁場を持っているということは理論的にはありそうもないことであるが、他の加速機構も多くの困難を抱えているため磁場による加速という仮説が一定の支持を受けてきたのである。しかし、磁場による加速でも、ローレンツ因子が10というような加速を起こすのに成功している例は皆無に近いということは多くの人には認識されていないのではなかろうか。数値シミュレーションできれいな絵をみせられると何となく納得してしまうという悪い例の一つであろう。近年の観測の進展によって相対論的ジェット中の磁場はかなり弱いことが判明し、磁場仮説は観測的にも問題を抱えることになってきた。またジェットの組成も電子陽子プラズマよりは電子陽電子対が主成分であることも強く示唆されている。

高原：観測によればAGNジェット
では、粒子エネルギーが磁気エネ
ルギーより桁違いに大きい。

工藤、柴田：それでもジェットは磁気
的に加速できる

観測事実: AGN jet 中の粒子エネルギー $\gg$ 磁気エネルギー

- 解決策
- 1) 磁気チューブの断面積が急激に広がっている (Kudoh et al. 1998)
- 2) 磁気リコネクションにより、磁気エネルギー $= \gg$ 粒子エネルギー (Blandford 2000)

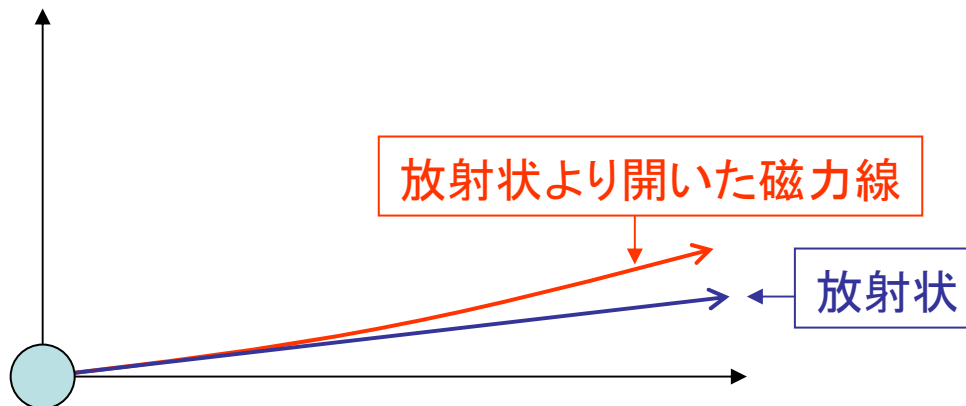
MHDアウトフローの性質

Michel(1969)

放射状の磁場を仮定すると、磁場のエネルギーが、十分運動エネルギーに変換されずに無限遠方に達する。
(fast point が無限遠方。)

Begelman & Li (1994)

放射状よりも開いた磁束管の中を流れるアウトフローは、すべての磁場のエネルギーを運動エネルギーに変換できる。



アウトフローの
コリメーションとも
関係している。

磁力管の開き具合は、アウトフローのコリメーションをきちんと求めないとわからない。しかし、それを解くのは難しい。

そこで、磁力管の開き具合を適当な関数で与えて、磁力管に沿った流れのみを求めるという研究方針をとる。

Takahashi & Shibata (1998)

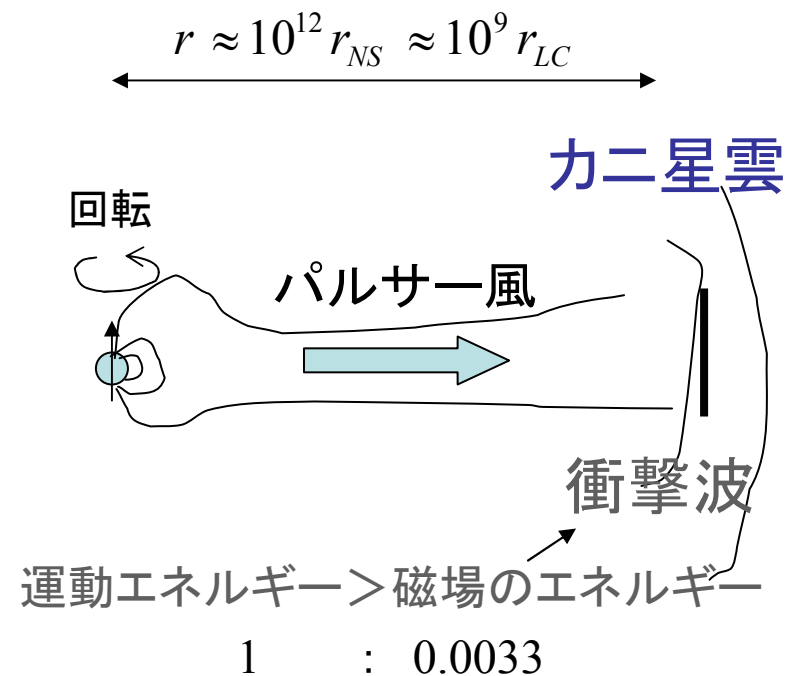
流線に沿って

$$r^2 B_p \propto r^{-\alpha} \quad (\alpha = 0 \text{ が放射状})$$

と仮定し、赤道面の流れを解き

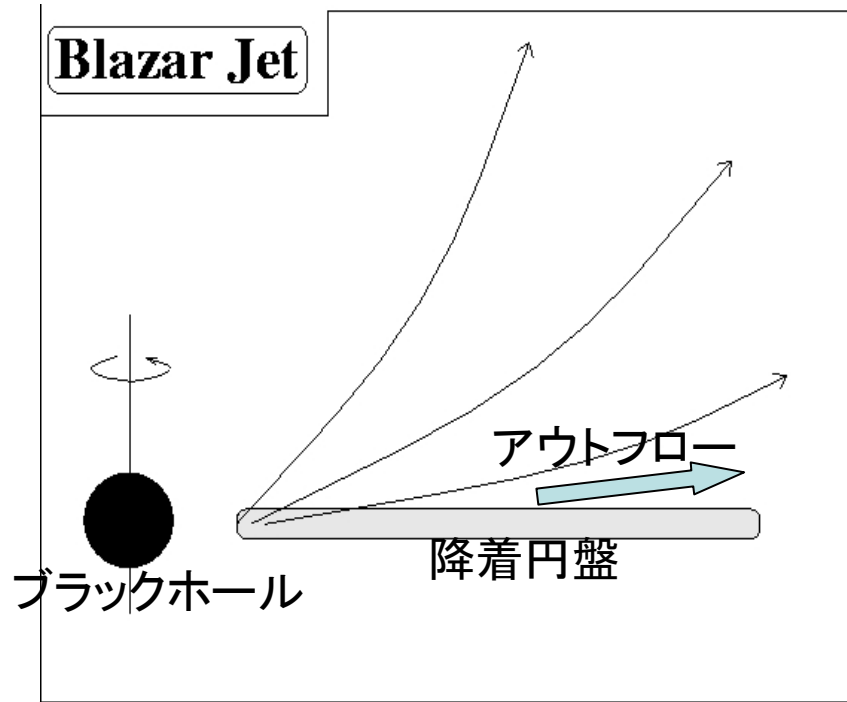
パルサー風の問題に応用した。

$\alpha \approx 0.4$ であれば観測を説明



Takahashi & Shibata (1998)の研究をAGNジェットに応用

降着円盤からのアウトフロー

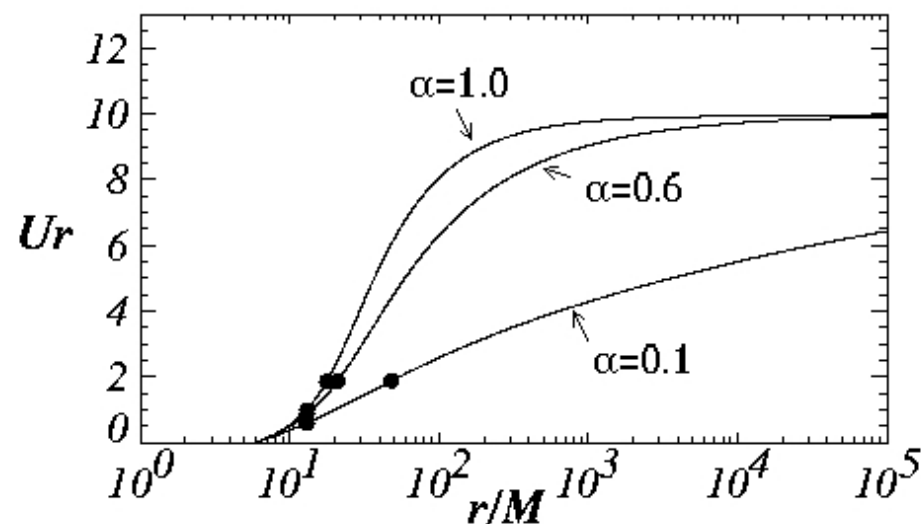


- 一般相対論的MHD方程式
(定常、軸対称、Cold)
- 流れは一次元。赤道面。
- ブラックホールの最内安定軌道からアウトフローが流れている。磁力線の角速度はそこでのケプラー角速度。
- 最終速度は $\gamma = 10$ 。

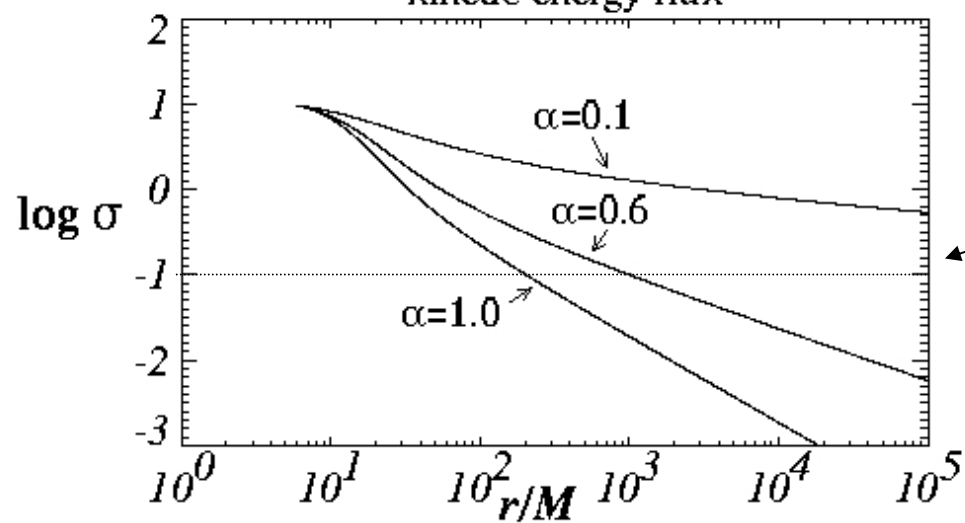
$$r^2 B_p \propto r^{-\alpha} \text{ を仮定。}$$

ブラックホール半径の100倍から1000倍の所で、磁場のエネルギーが運動エネルギーの10分の1以下になるための条件を調べる。

結果1

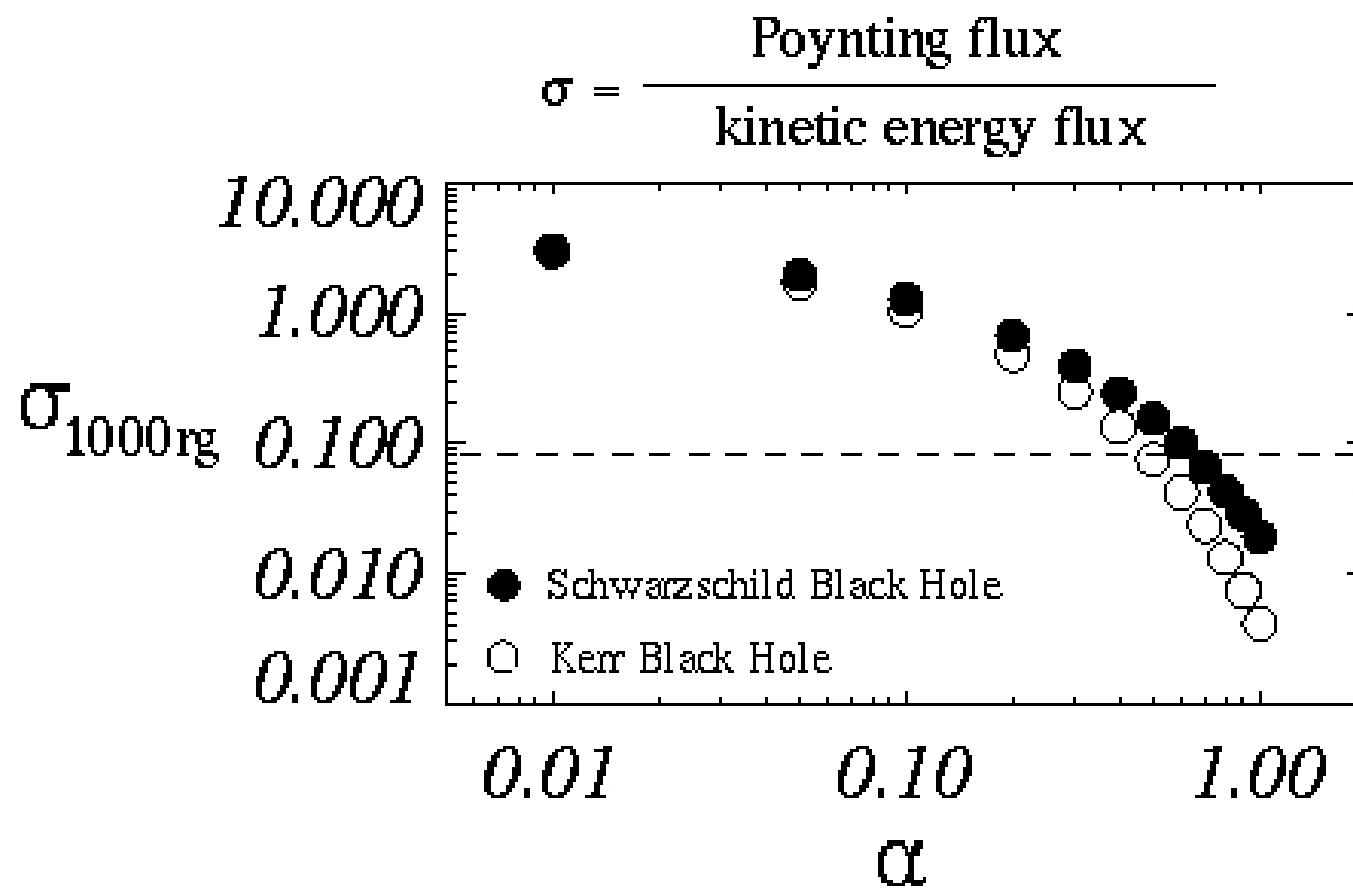


$$\sigma = \frac{\text{Poynting flux}}{\text{kinetic energy flux}}$$



ブレーザーの
磁場

結果2



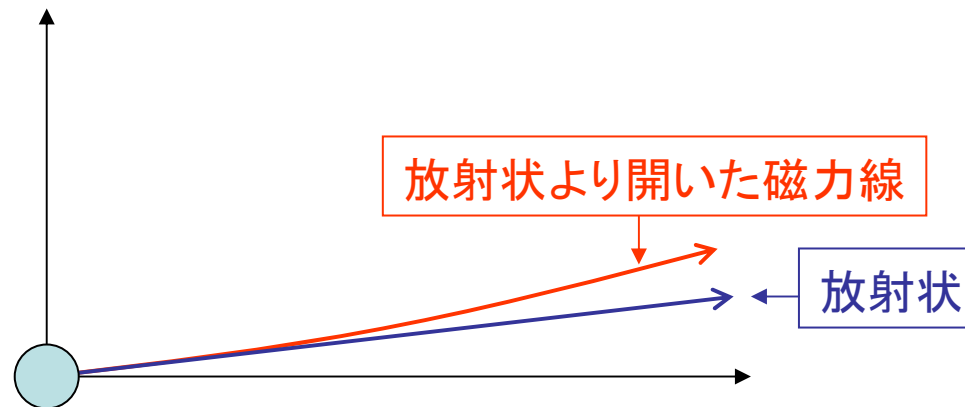
ブレーザーの条件を満たすためには、 $\alpha > 0.6$

議論

$\alpha > 0.6$ は現実的にありうる値か？

単純なMHDアウトフローの理論では現実的ではないと考えられている。

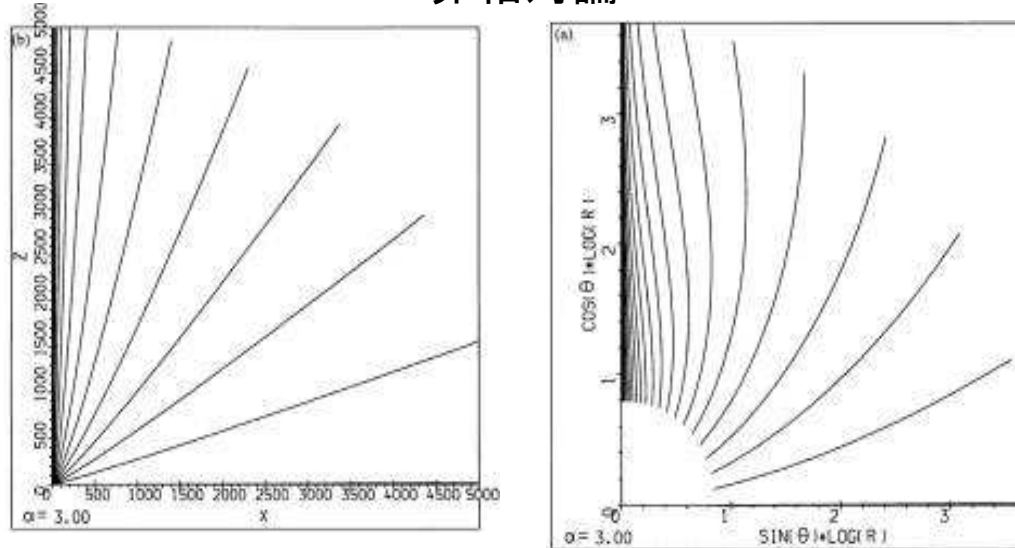
磁力管の開き具合を表すパラメータ α は、
アウトフローのコリメーションと関係している。



これまでのコリメーションの研究では、磁力線はもっとゆっくり、ログスケールでコリメーションするという結果が得られている。

Bogovalov & Tsinganos (1999)

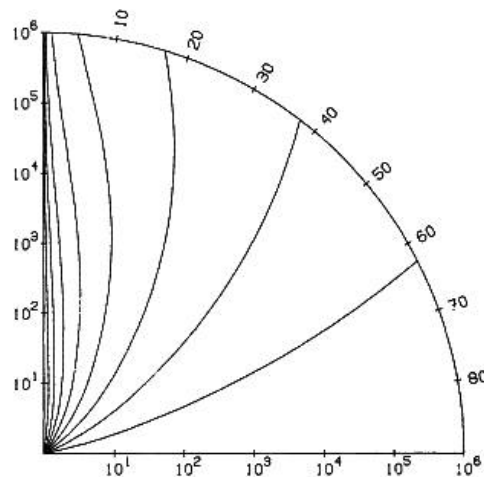
非相対論



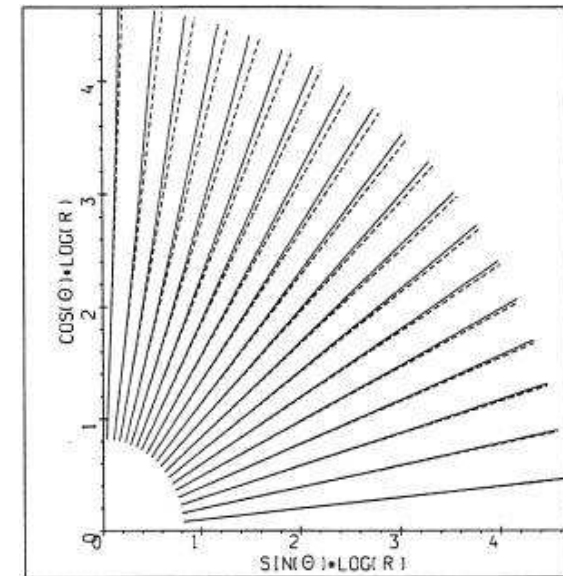
ログスケールでコリメーション

Sakurai (1985)

非相対論



相対論 $\gamma_0 = 30$



相対論的MHDアウトフローは
さらにコリメーションしにくい

磁場のエネルギーが運動エネルギー
に変換されにくい。

Li (1996), Bogovalov (2001)

今後の課題: 加速と構造

- ジェットの内部構造(ノット)の起源
- ジェットの3次元安定性(=>磁気リコネクション=>粒子加速)
- 相対論的ジェットの場合:
ローレンツ因子 >10 の高速ジェットはいかにして形成されるか?
=>ガンマ線バーストへの応用
- 電子陽電子磁氣的ジェットの物理?

今後の課題: コリメーション

- 回転星ダイポール磁場では、定常状態でどれだけの磁束が極方向にコリメートするか？
- 定常軸対称MHDアウトフローの数値解
(今までのところ、全空間をセルフコンシステントに解いたのは、桜井(1985)のみ)
=> 数理物理の超難問

今後の課題： 観測

- MHDジェットの観測的証拠をさがす
 - ジェットの回転とヘリカル磁場
 - ジェットの根本の降着円盤の磁場測定
- ジェットのコリメーションのスケールを観測的に解明
- ジェットとフレアの関係の検証

その後の進展 2001－2005

リコネクションを利用した エネルギー変換モデル

MHD model of GRBs

(Spruit et al. 2001 A&A 369, 694)

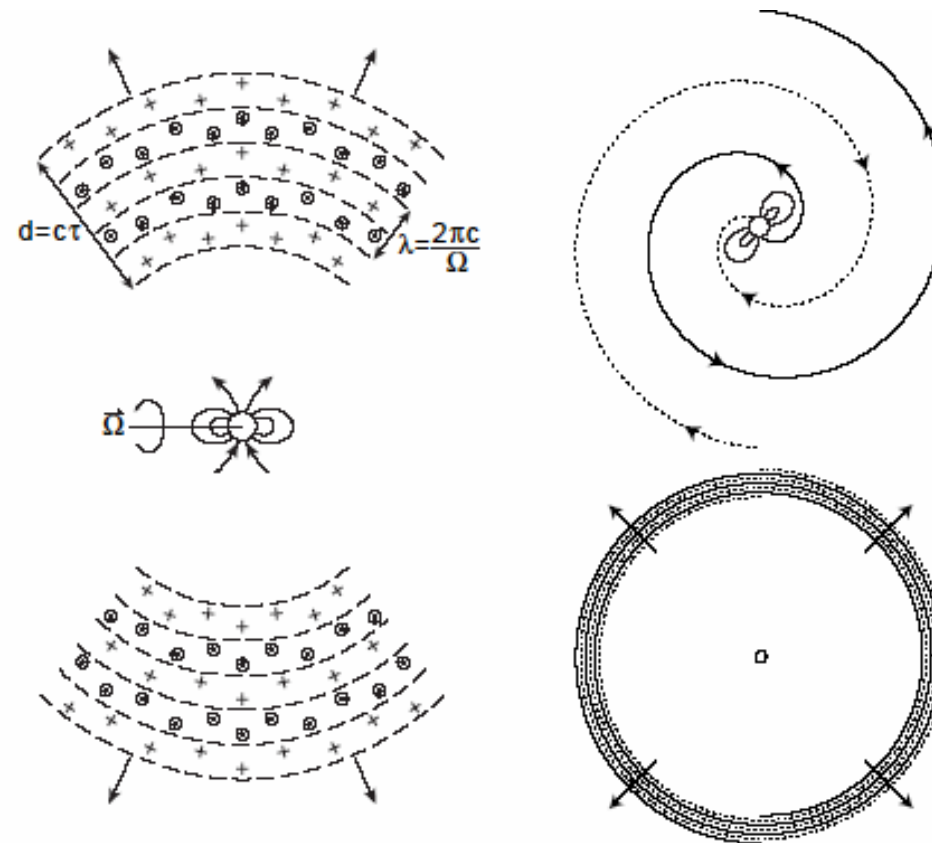
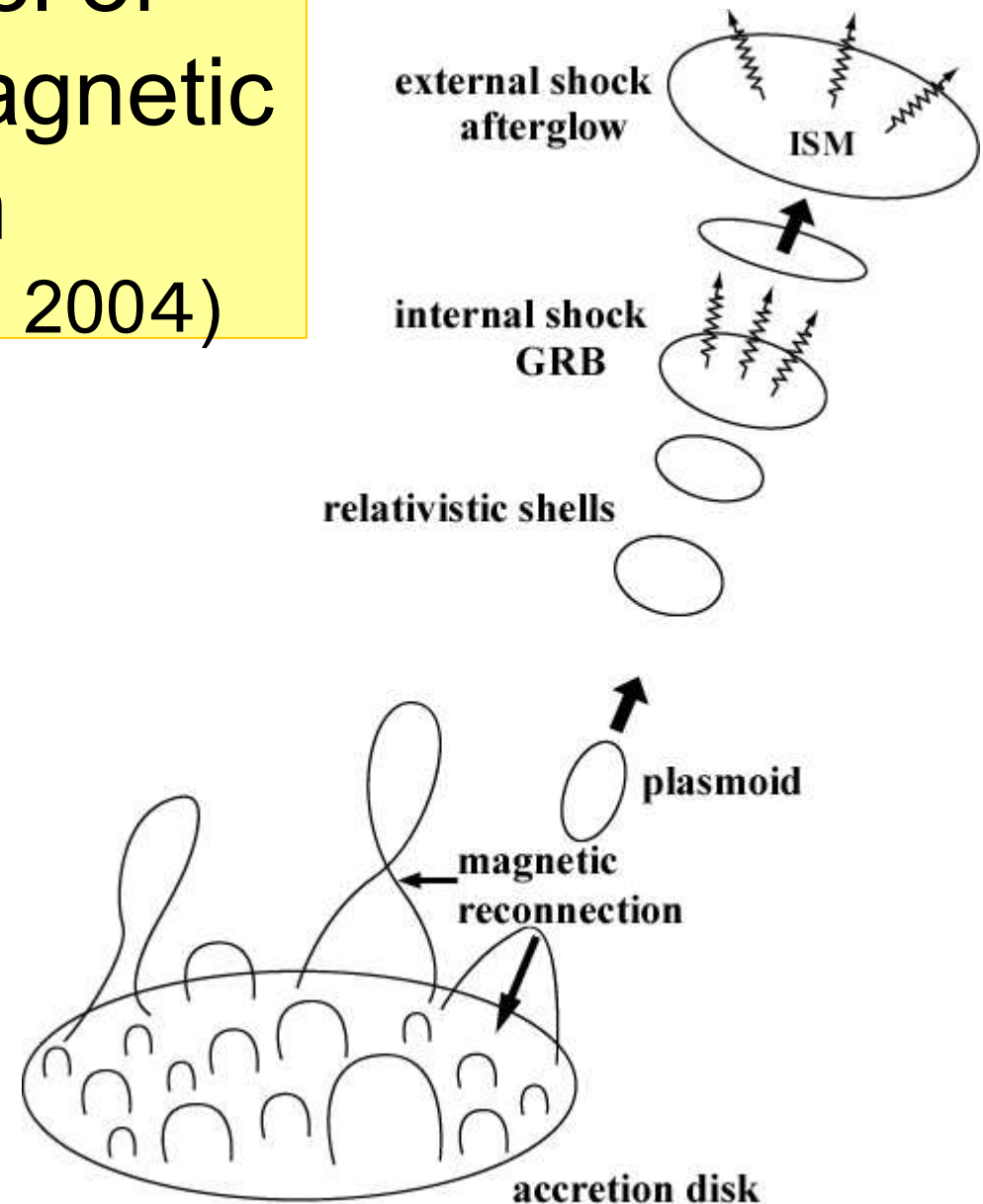


Fig. 2. Field configuration in quasi-spherical magnetic outflow driven by a perpendicular rotator (“pulsar-like” case) (schematic). Left: view in the equatorial plane, with dots and pluses indicating field lines into and out of the plane of the drawing. Right: top view from the rotational pole. Bottom

Flare/CME model of GRBs driven by magnetic reconnection

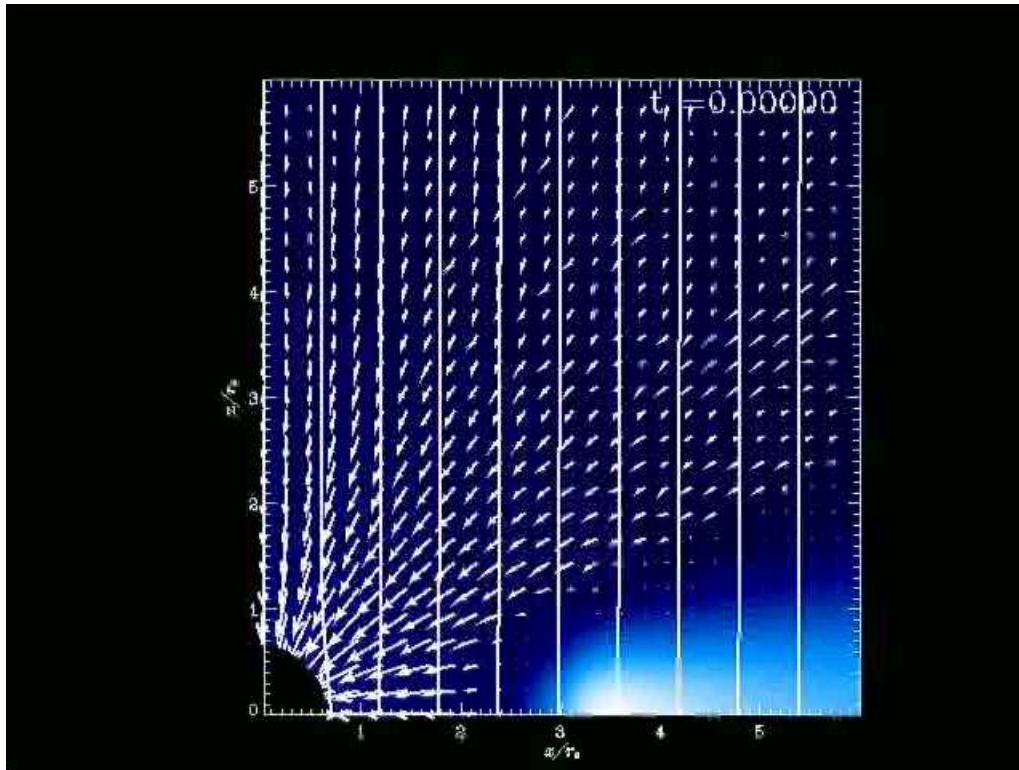
(Aoki, Yashiro, Shibata 2004)

Only large flares can produce large plasmoids that have enough energy to escape from magnetosphere of the central engine of a GRB (cf. Negoro and Mineshige 2002)

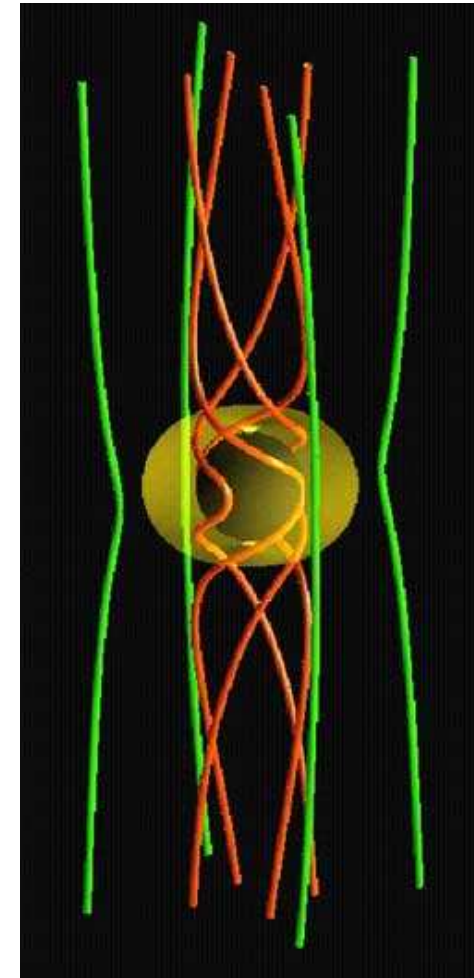


一般相対論的 MHDシミュレーション

MHD jets from Kerr hole magnetosphere



Koide, Meier, Kudoh,
Shibata (2000)



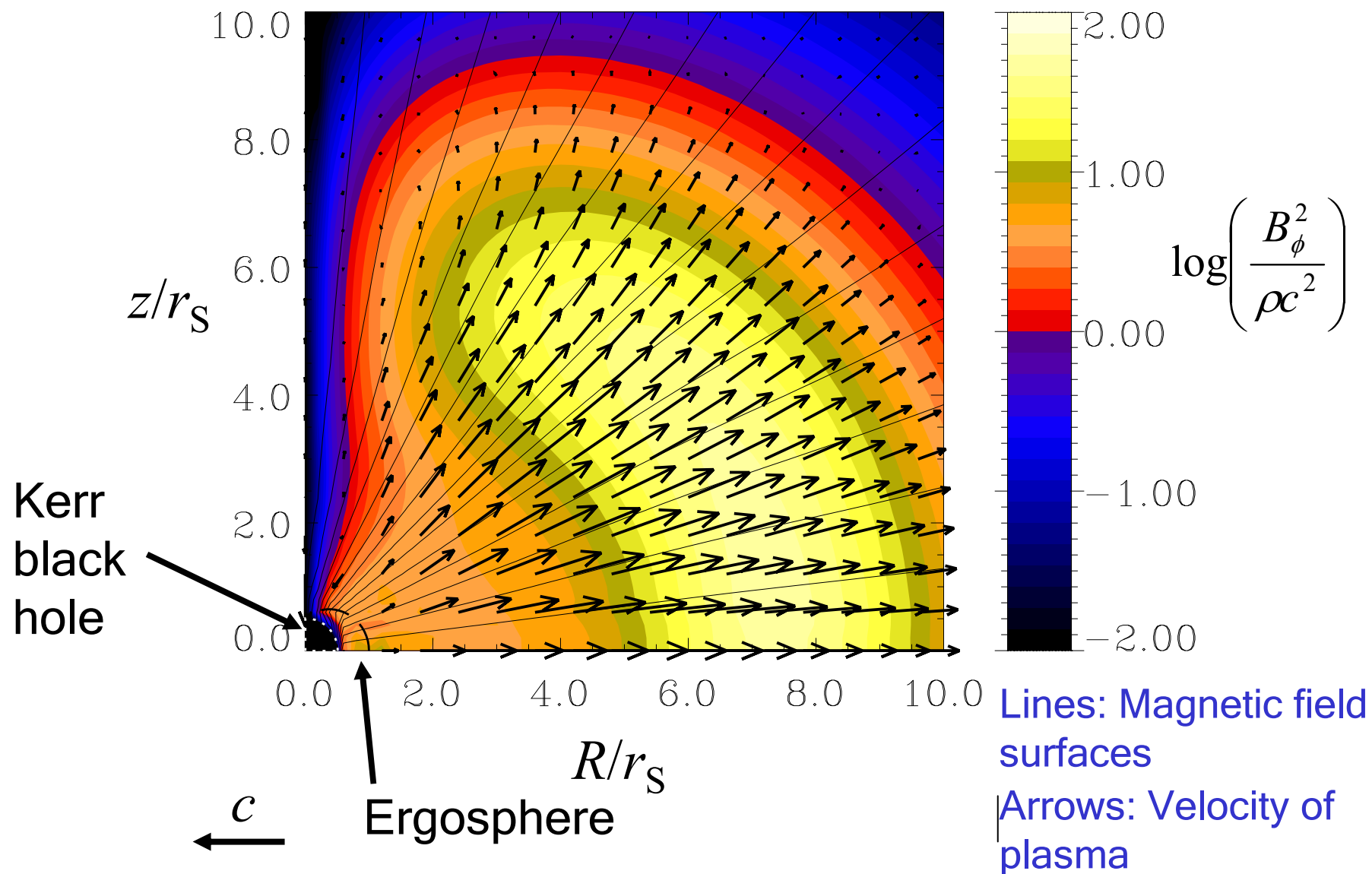
Koide et al. 2002 Science

$V_{\max}=0.86c$
(Lorentz factor 2.0)

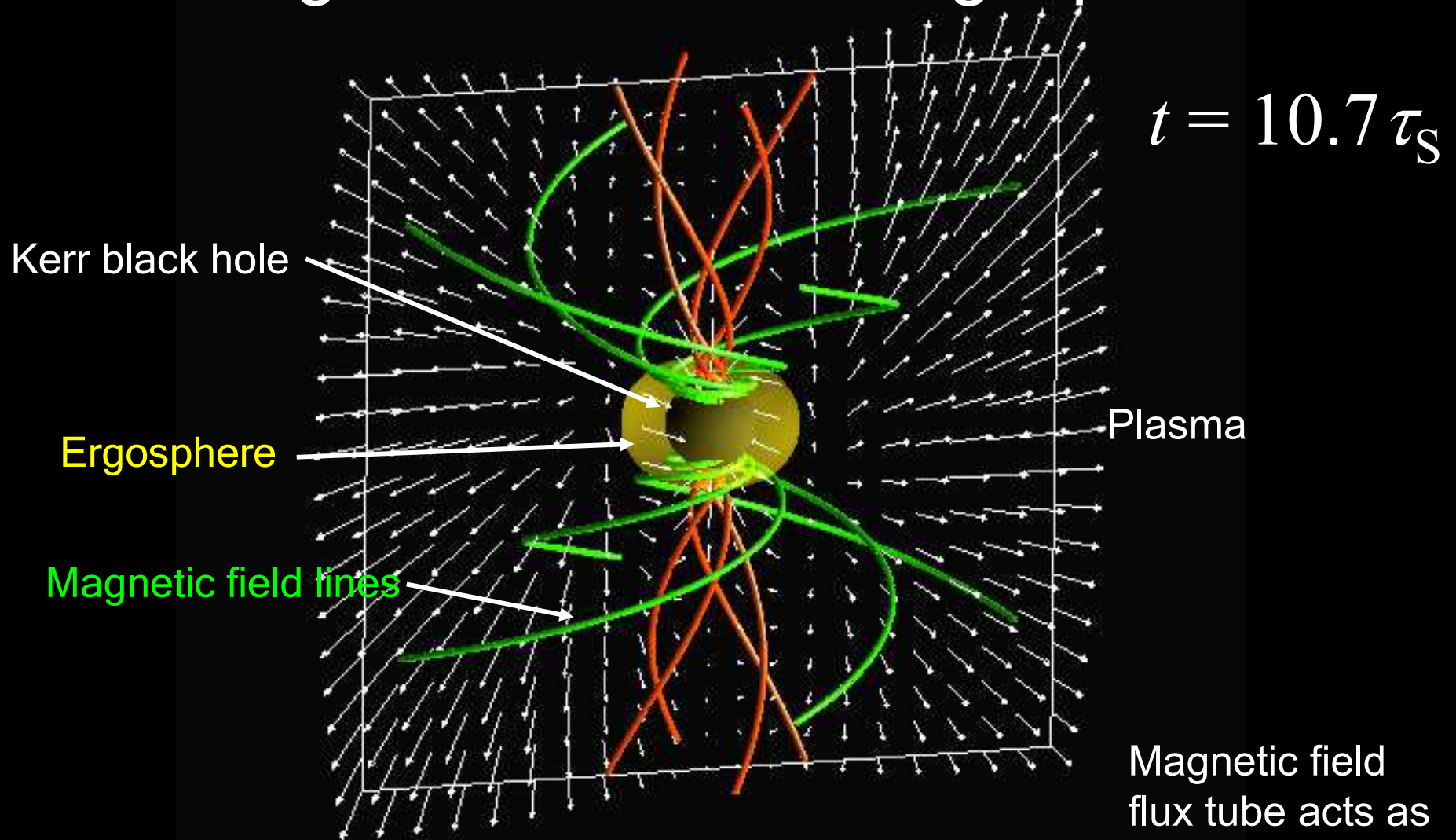
Koide (2004)

$\tau_s=r_s/c$
(Unit of time)

$$t = 10.7 \tau_s$$



Relativistic Outflow driven by Magnetic Field from Ergosphere



Magnetic field
flux tube acts as
propeller screw!

ジェットの3次元安定性

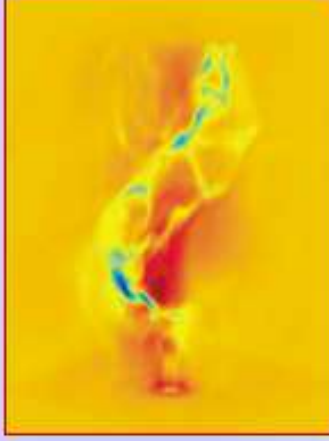
3D stability

- MHD jets are linearly unstable for helical KH instability, but nonlinearly stable (Ouyed and Pudritz 2002)
- MHD jets show non-axisymmetric structure because of unstable character of accretion disk. Nevertheless, the basic characteristics of jet velocity and its parameter dependence are the same as those in 2.5D (Kato. S et al., Kigure et al. 2005).

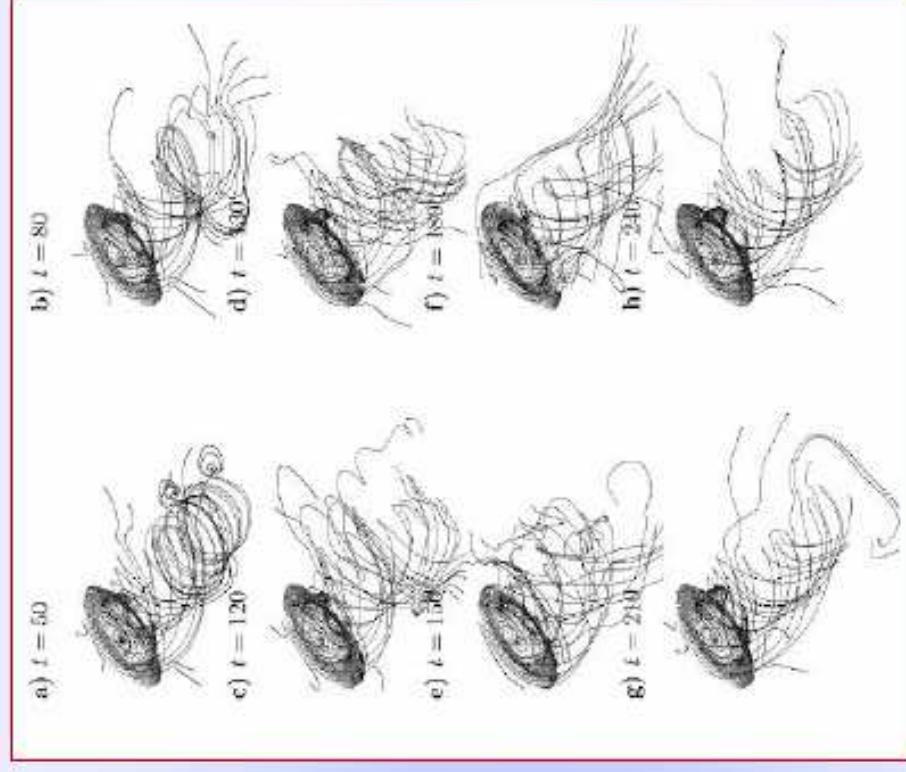
- Stability of MHD jets launched from Keplerian accretion disks

Ouyed et al 2003, ZEUS

- 3-D MHD simulations

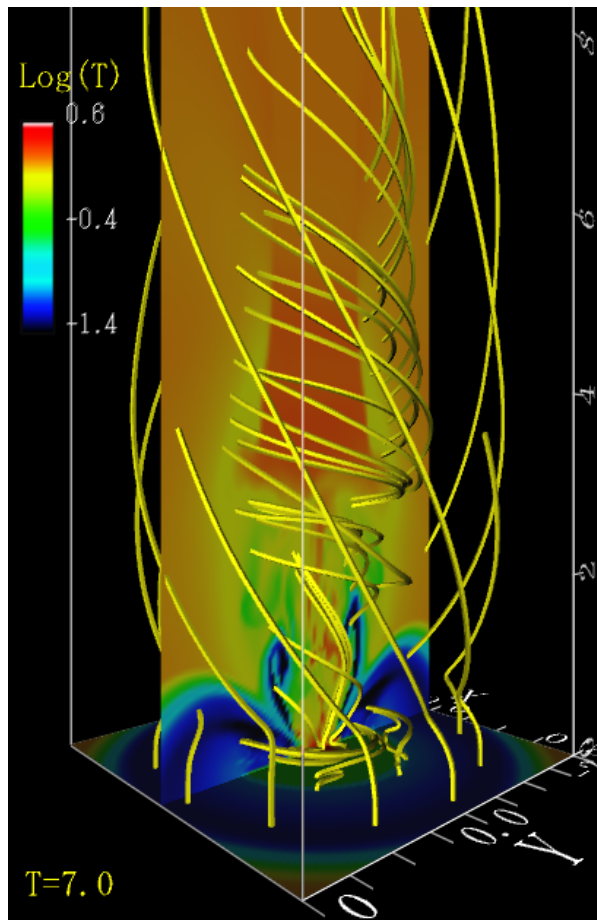


- Morphologies from K-H unstable modes: corkscrews, wobbles, knots, twists, etc.

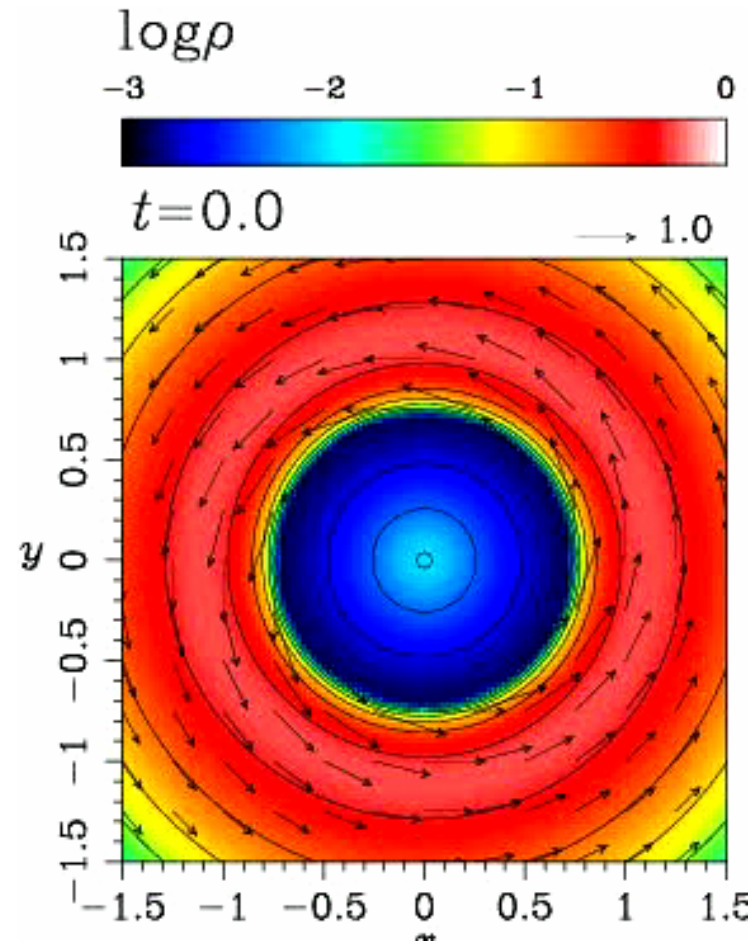


Instability saturation: energy transfer from large scale to small scale modes

3D non-axisymmetric structure of a jet produced by non-axisymmetric MHD instability of the disk (Kigure-Shibata 2005)

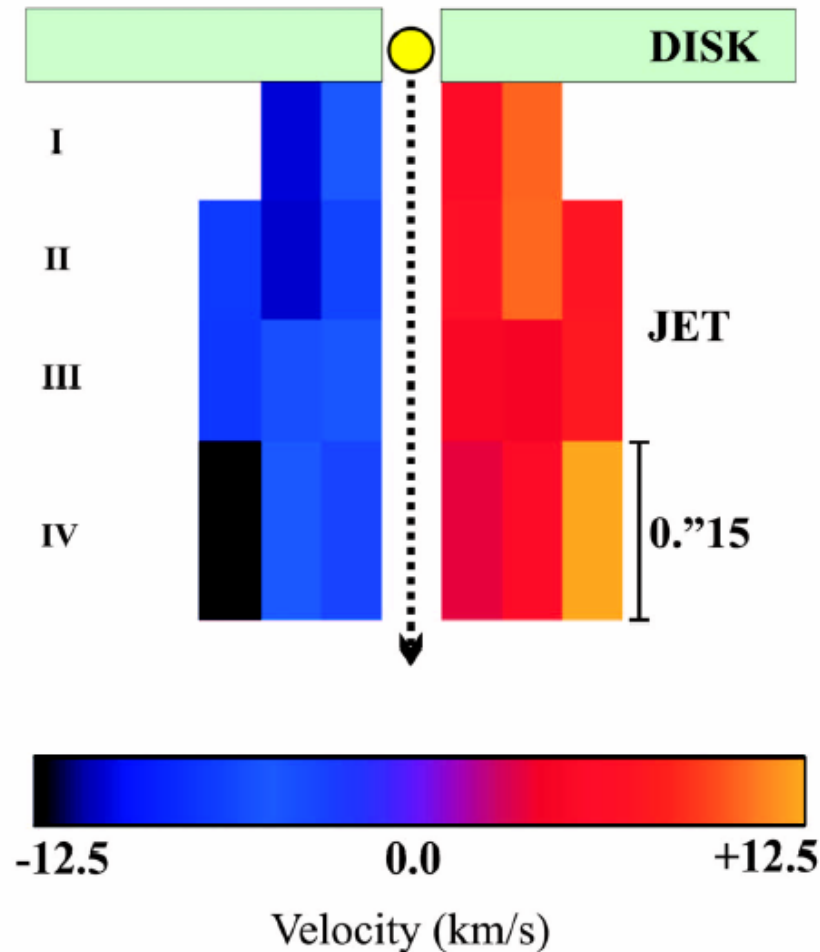


Model R6



MHDジェットの観測的証拠

Spinning jets have finally been
observed by HST (Bacciotti et al. 2002)

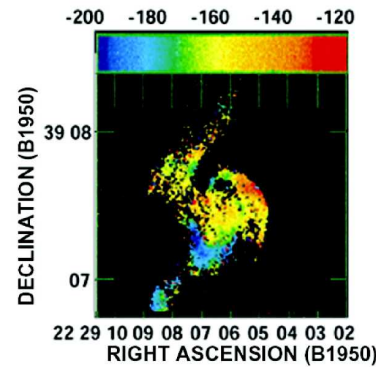
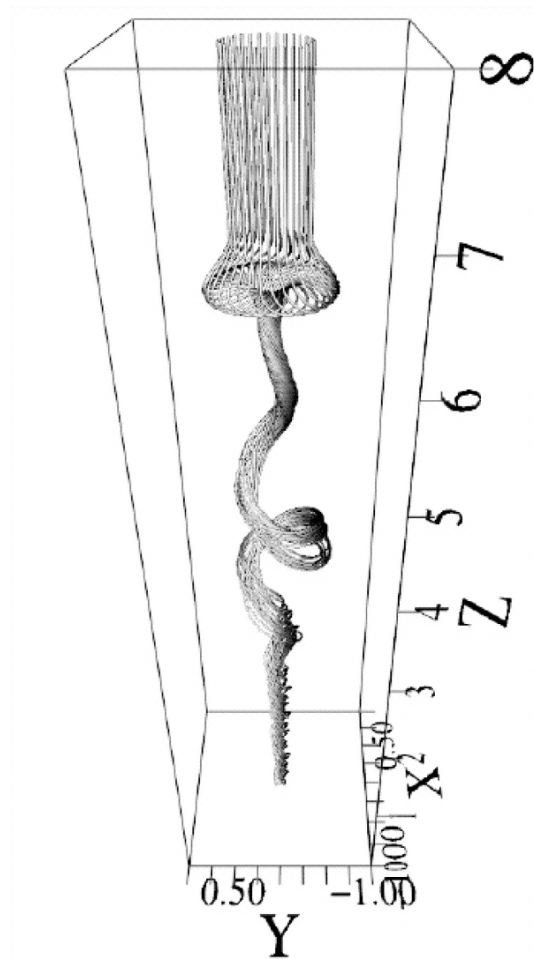


0.5'' = 110 AU

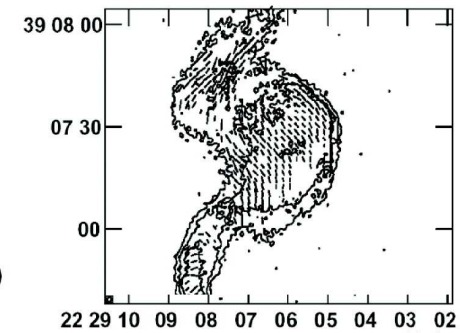
Optical jet from
DG Tau

FIG. 7.—Schematic map of the radial velocity shifts in the southeastern and northwestern sides of the flow (projected onto the plane of the sky), derived from Table 1. Here the flow is assumed to be axially symmetric. The velocity scale is linear.

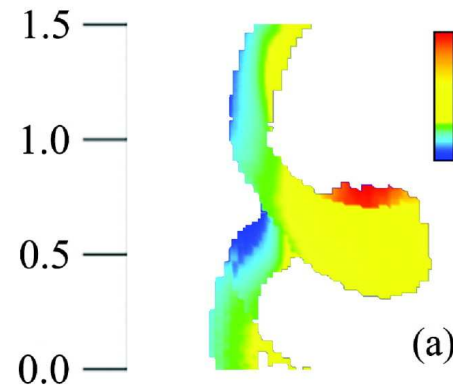
Modeling Faraday rotation measure of AGN jet (Kigure et al. 2004)



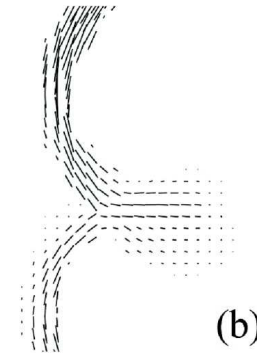
(a)



(b)



(a)

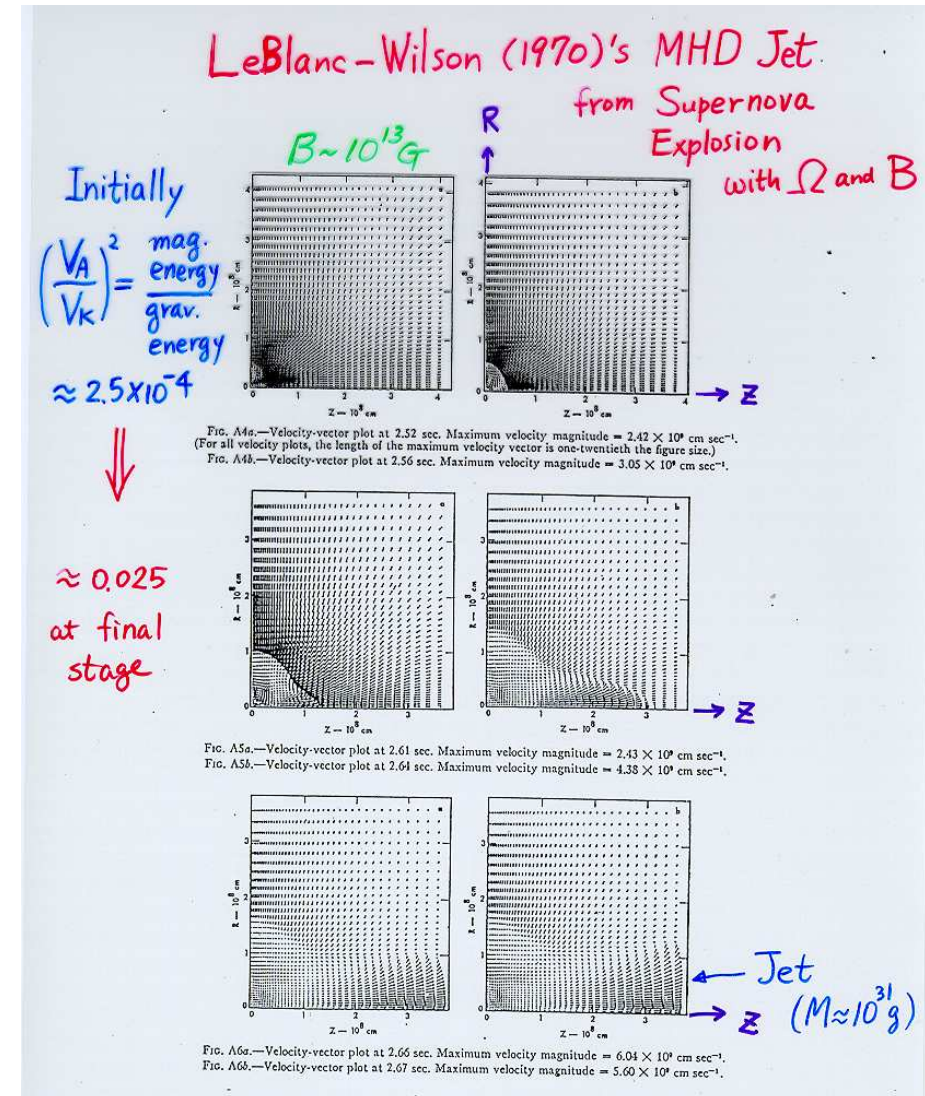


(b)

Case of collapsing
magnetized rotating star

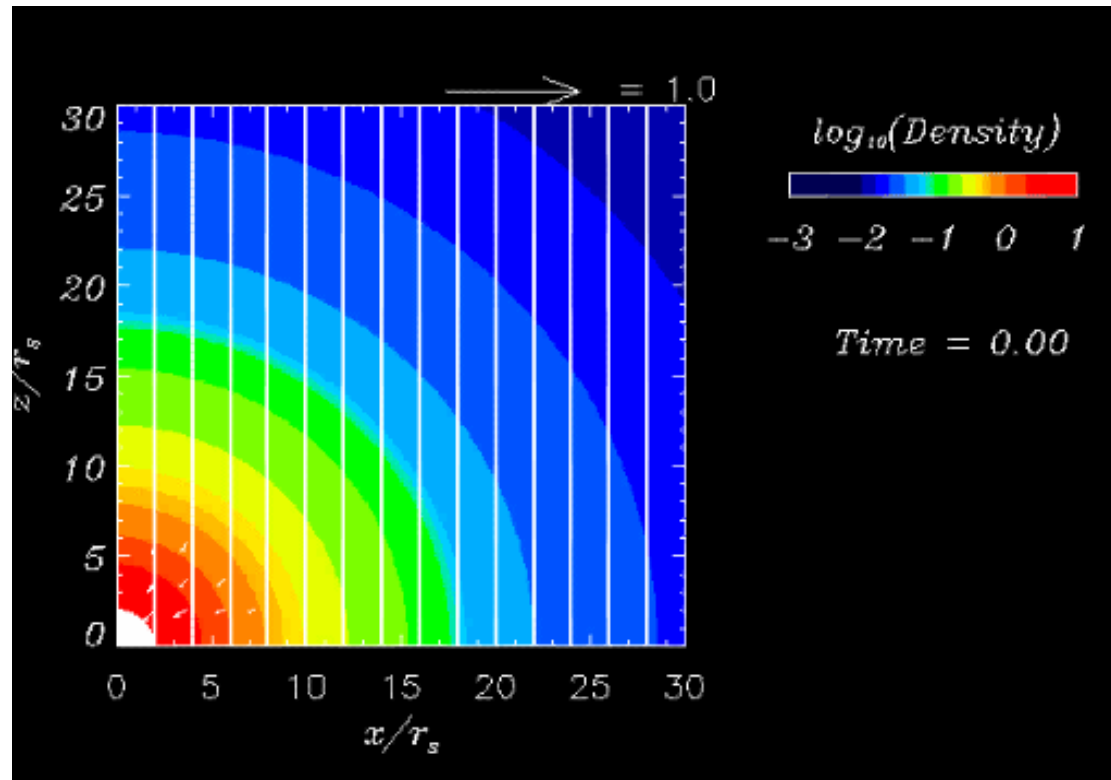
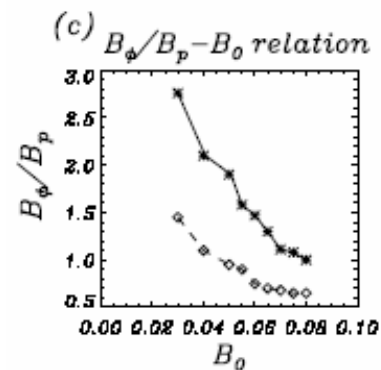
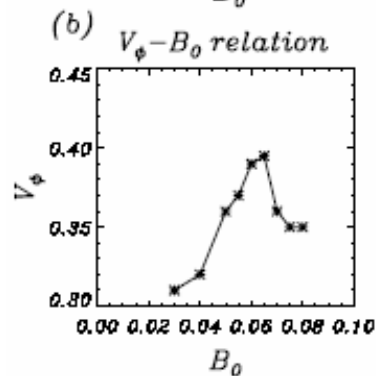
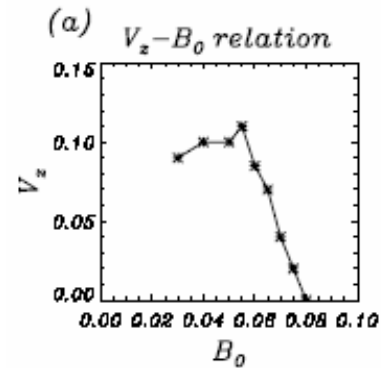
Case of Collapsing cloud/star

- Supernova/collap sar
 - Lebranc-Wilson, Symbalicity
 - Proga et al., Mizuno et al.
- Star formation
 - Tomisaka



MHD simulation of collapsar

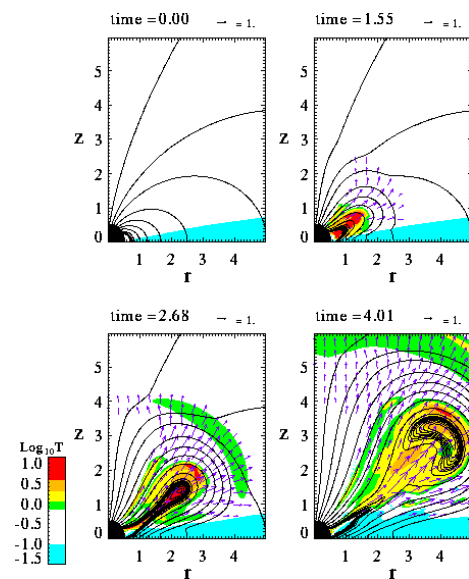
Mizuno et al. (2004) ApJ



general relativistic MHD simulation with
Schwarzschild black hole
 $V_{\text{jet}} \sim 0.2c$

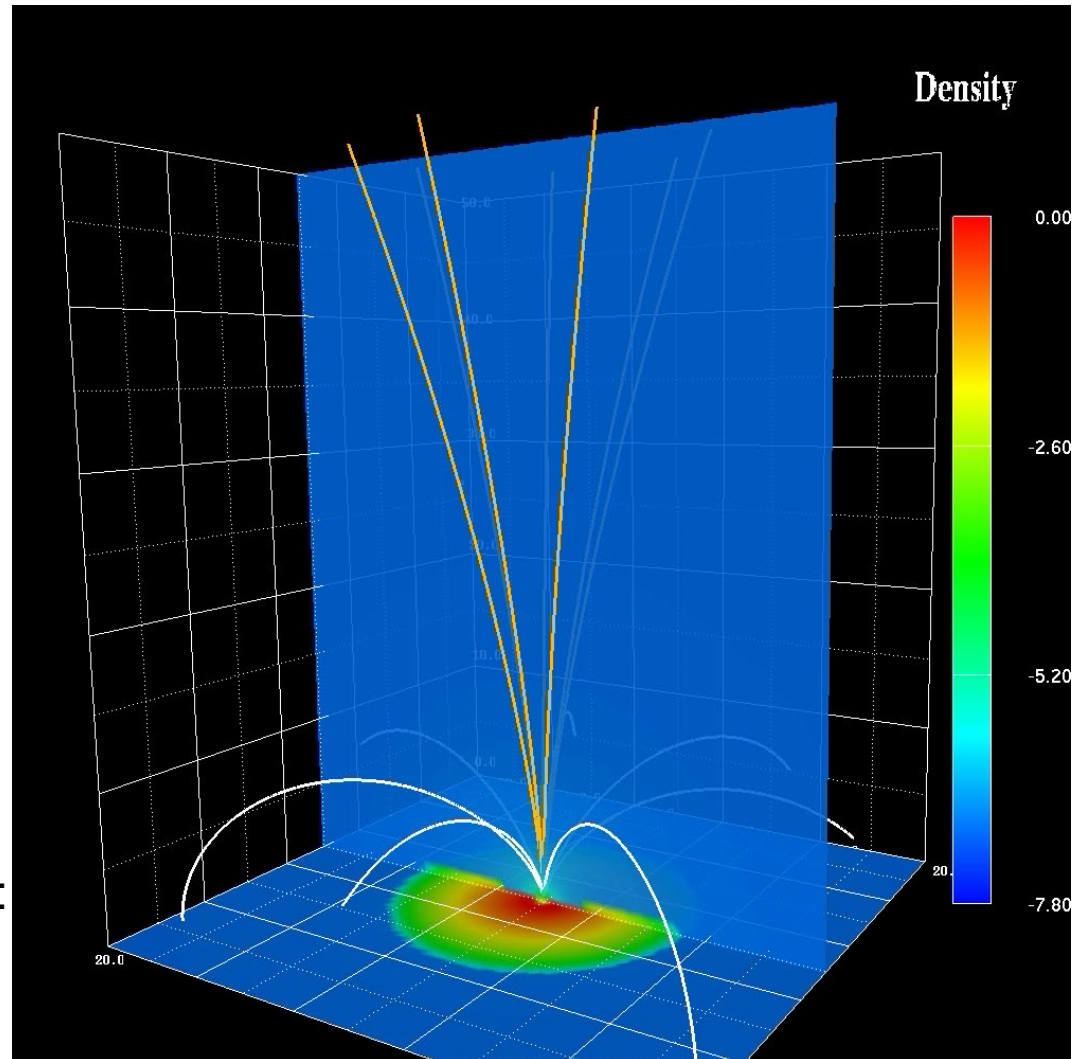
中心星磁気圏と円盤の相互作用によるジェット形成

MHD model of protostellar jets as an extention of Hayashi et al (1996) model (Uehara et al. 2005)



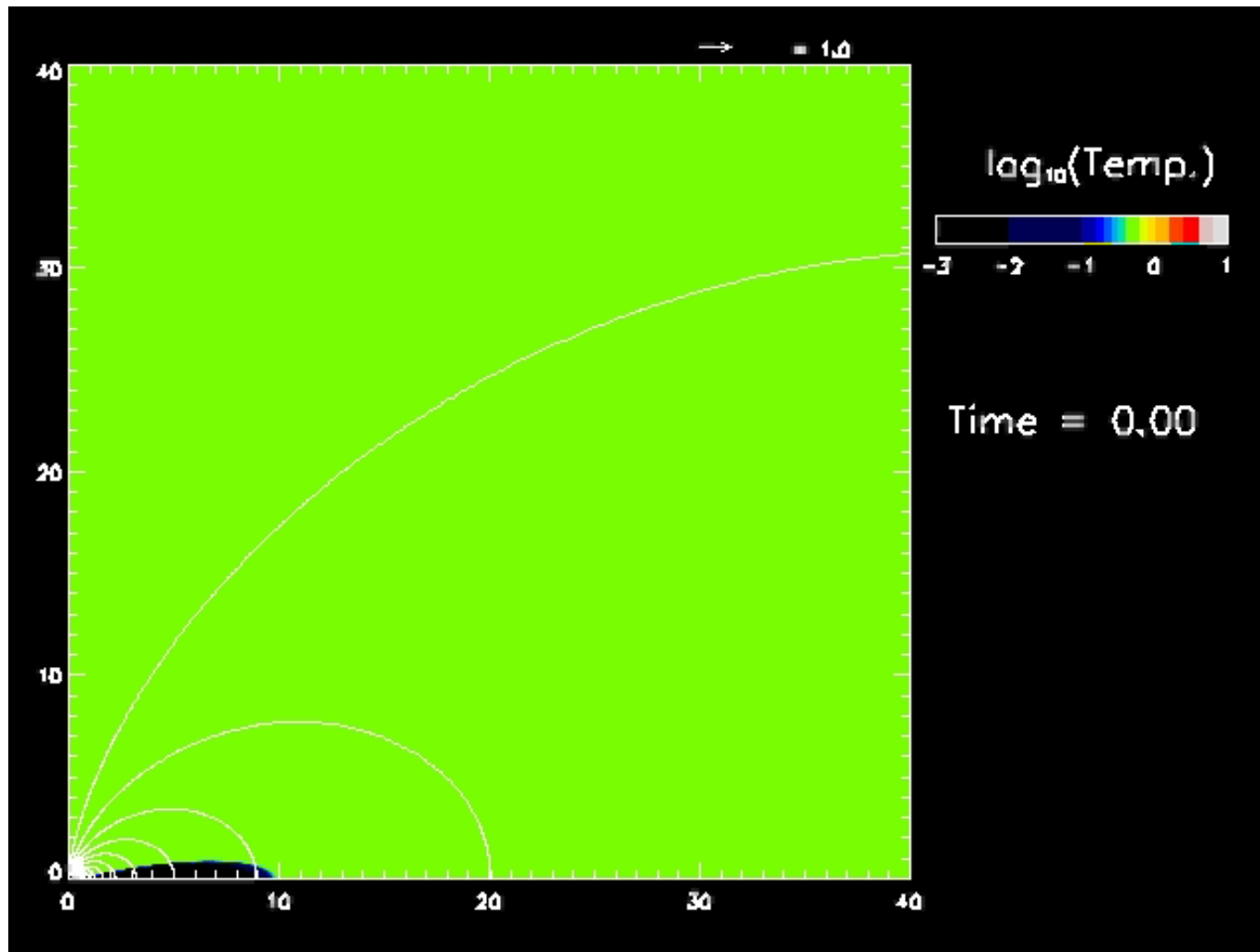
Hayashi et al (1996)

A jet consists of two component:
reconnection outflow and
disk wind



Long term evolution of dipole case

Uehara et al. 2005. to be submitted



1 orbit = 6.28

Knots
Are formed
By sausage
Instability ?

Jet velocity in the case of dipole field

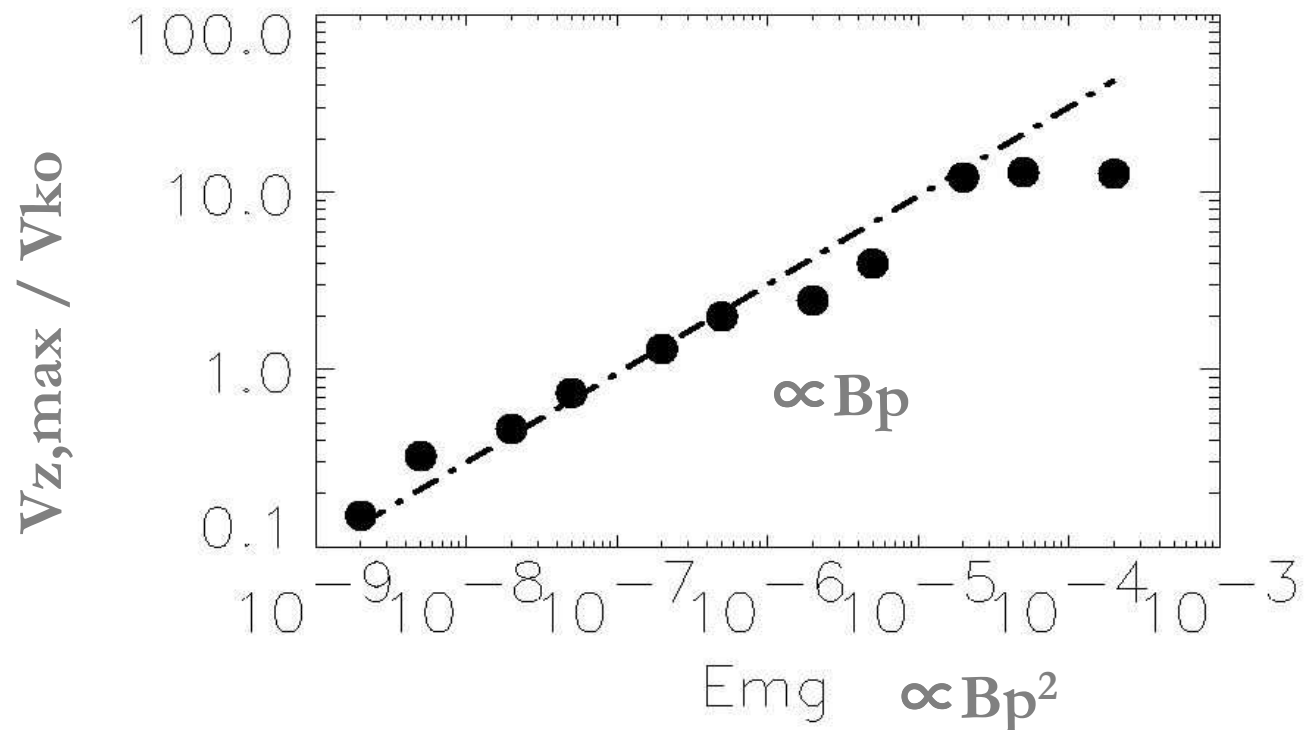
(Uehara et al. 2005, submitted)

■ Maximum Velocity of Jet ($V_{z,\max}$)

■ $\propto B_p$ for dipole field

($\propto B_p^{1/3}$ for uniform field)

This is
due to **reconnection-**
related-acceleration
of coronal outflow

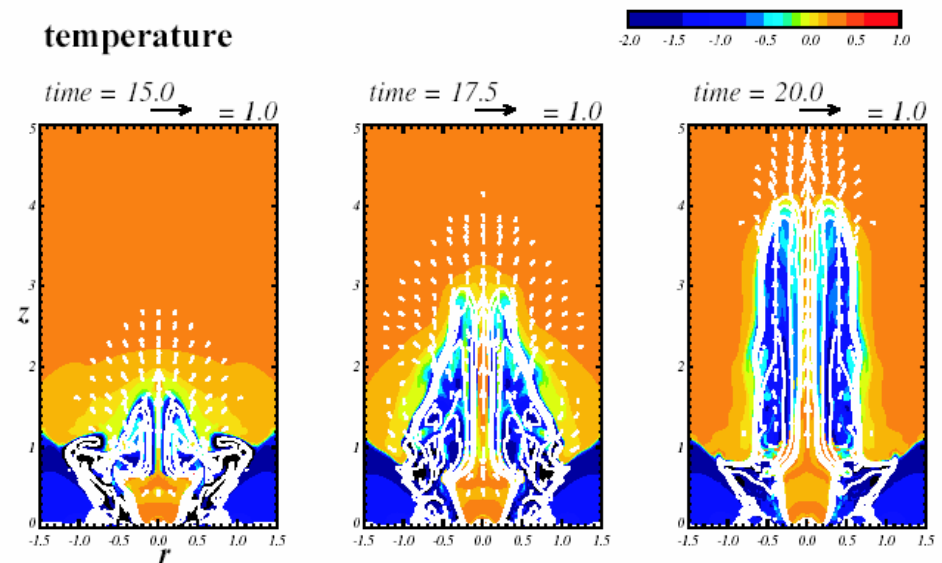
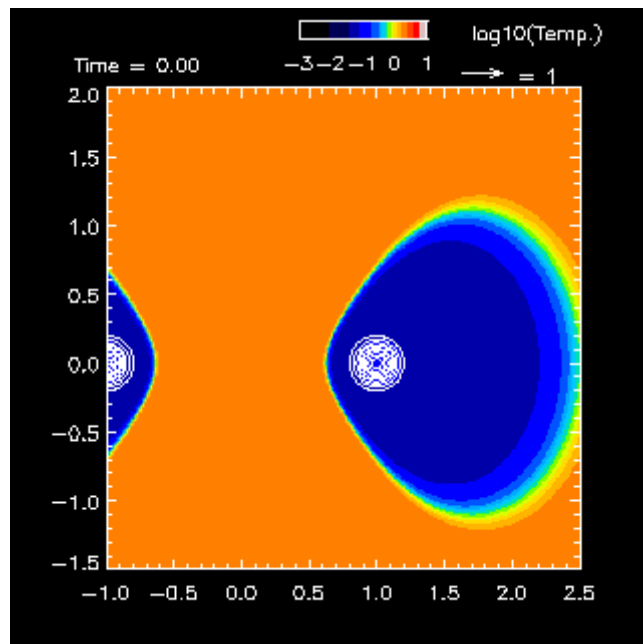


局所磁場をもつ円盤から
噴出するジェット

Case of Initially **Localized weak field**

(Kudoh, Matsumoto, Shibata 2002, PASJ)

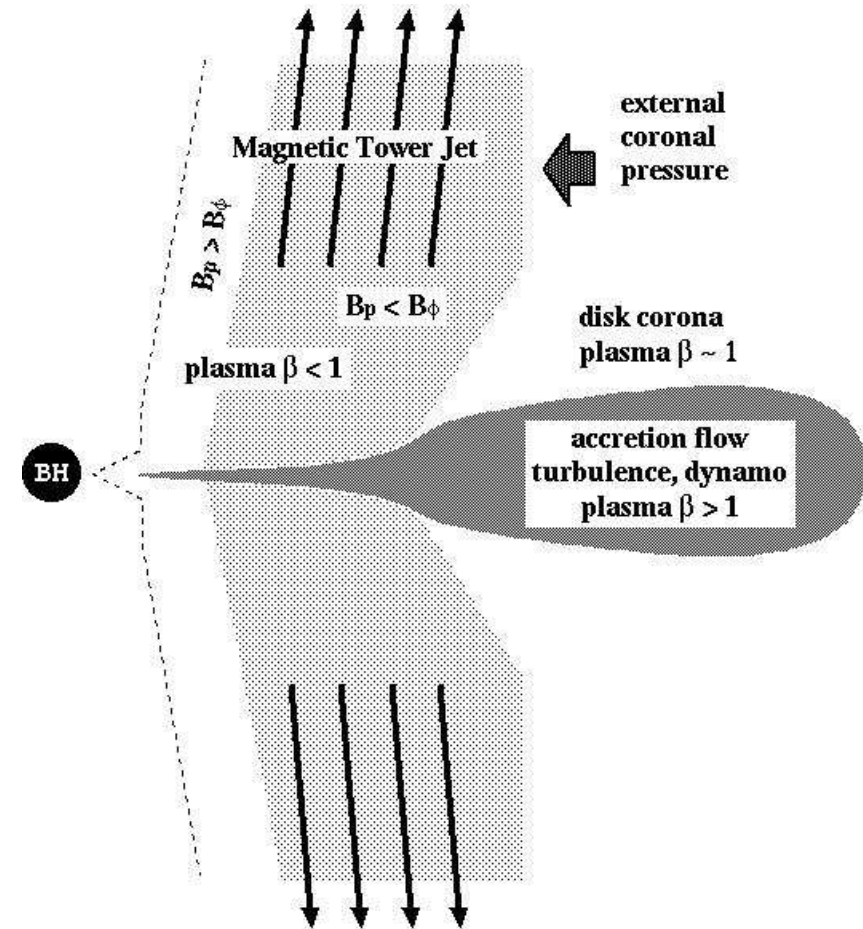
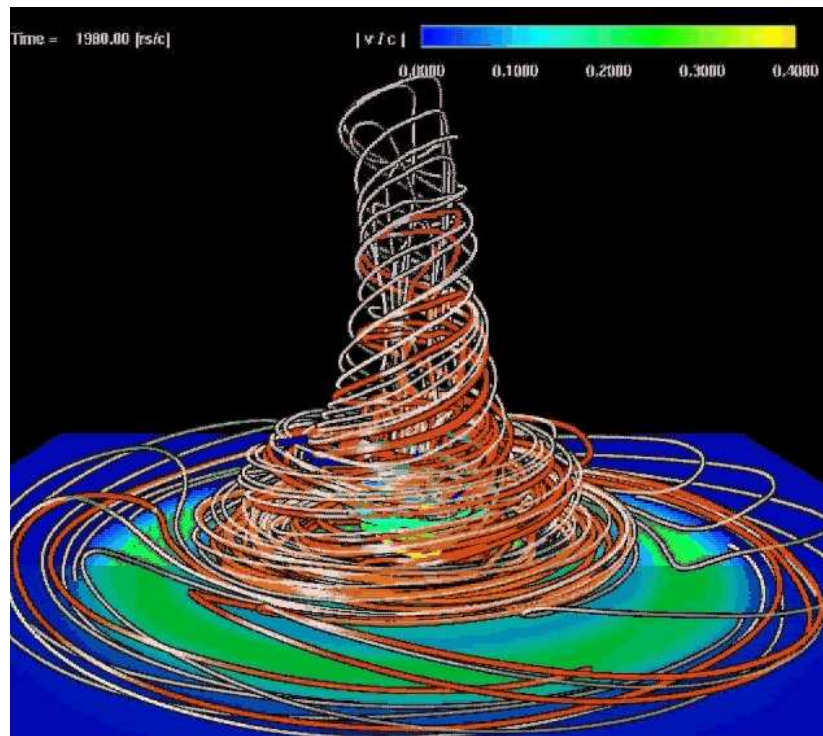
Magnetorotational Instability (Balbus and Hawley 1991)
leads to turbulence and reconnection



If external gas pressure is low,
Strong jet is formed

KatoY, Mineshige, Shibata (2004)

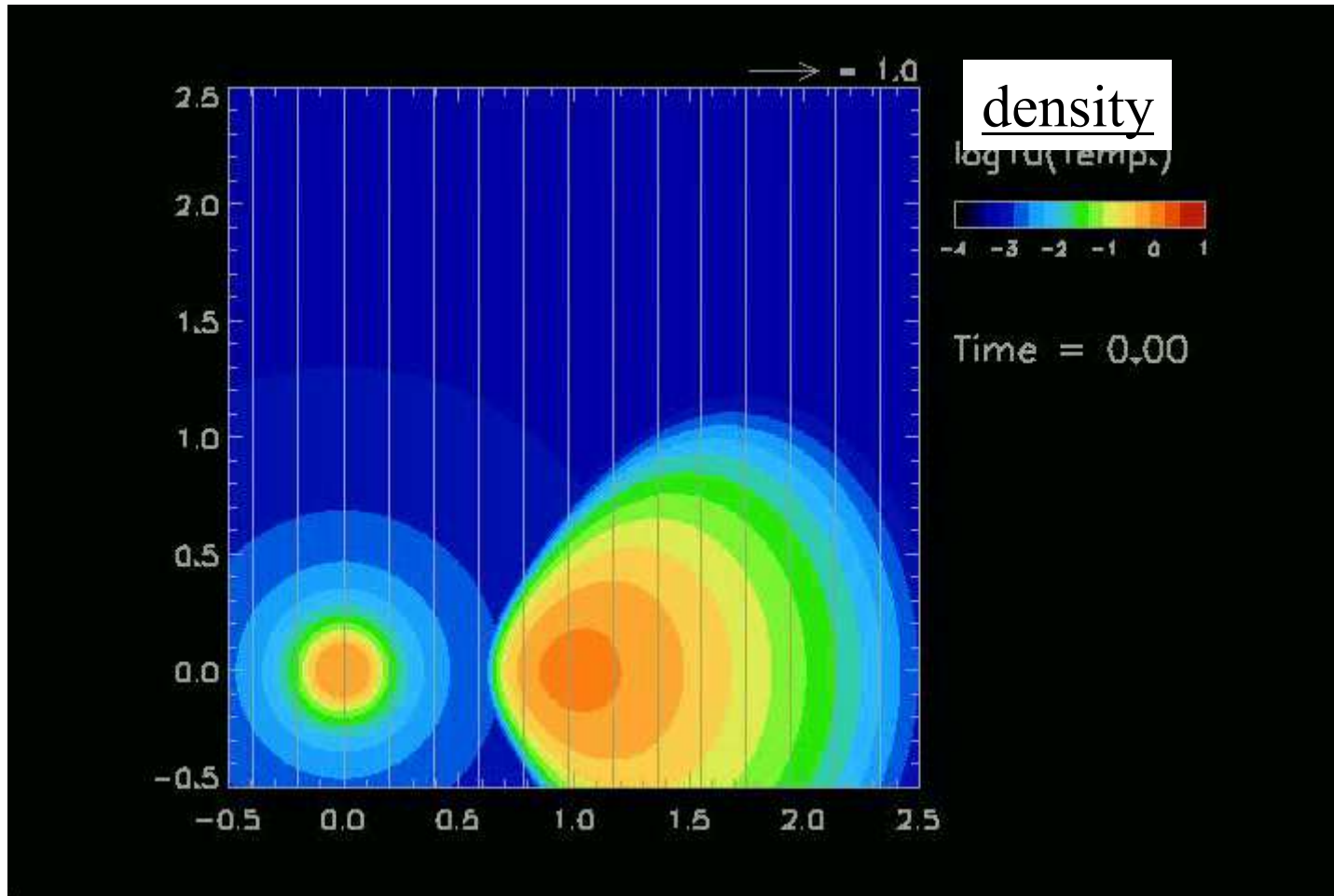
3D sim. (ApJ)



This toroidal field dominated jet is launched by **magnetic pressure** (similar to Shibata and Uchida 1985, Turner et al. 1999, Kudoh et al. 2002), and is also Similar to “**magnetic tower**” of Lynden-Bell (1996)

磁気回転不安定性の効果と 長期時間変動

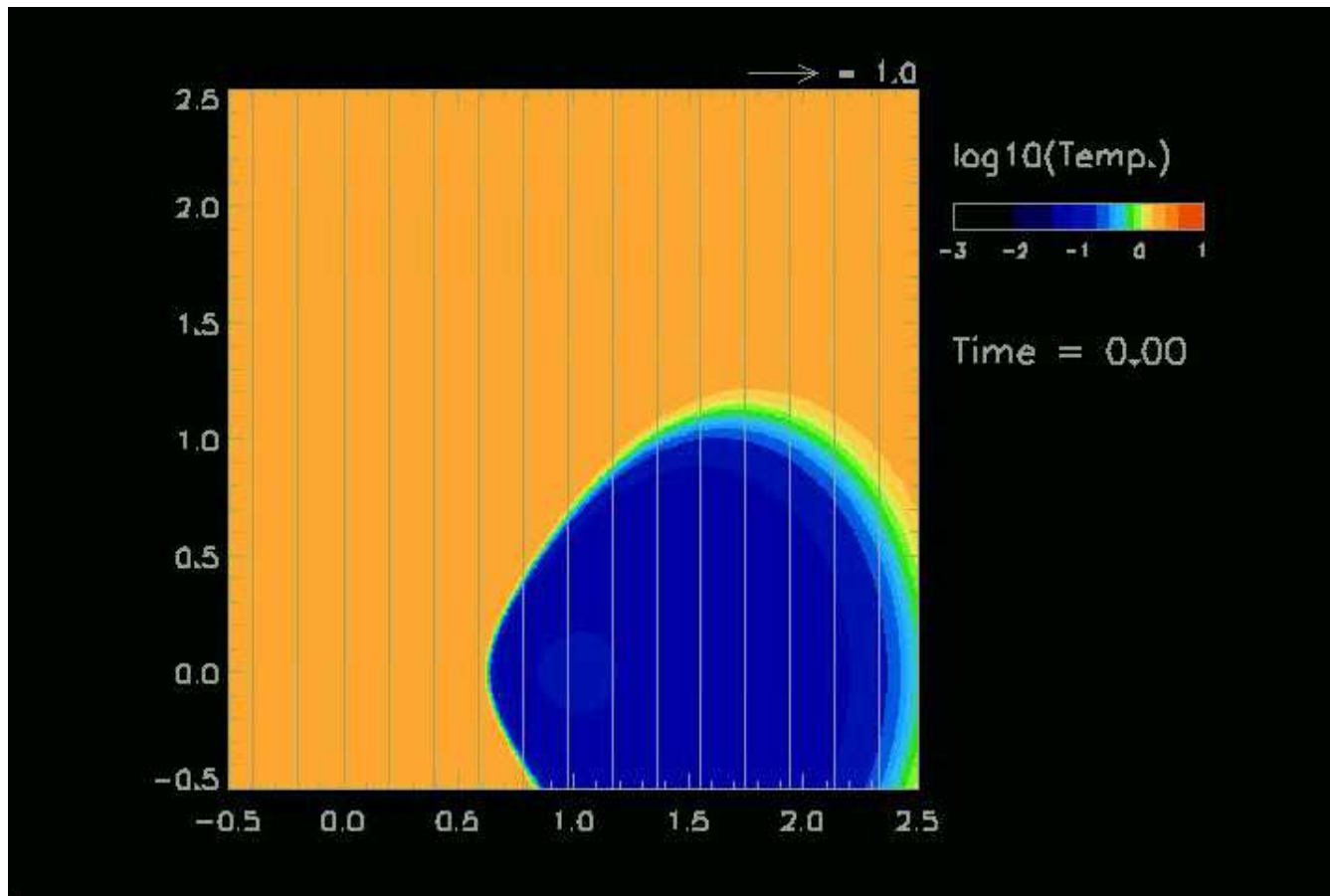
Long term evolution – nonsteady, intermittent ejection of jets with many reconnection events



- Sato et al. 2005 I brahim et al. 2005
in prep

Why do jets and disks can never reach steady state ?

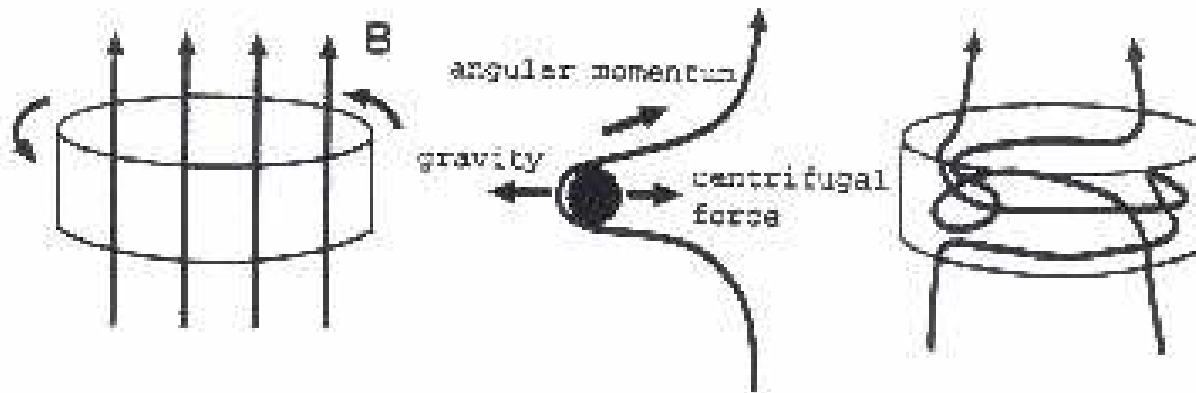
Because Magnetorotational Instability is so powerful (Balbus and Hawley 1991)



Kudoh et al
2002 PASJ

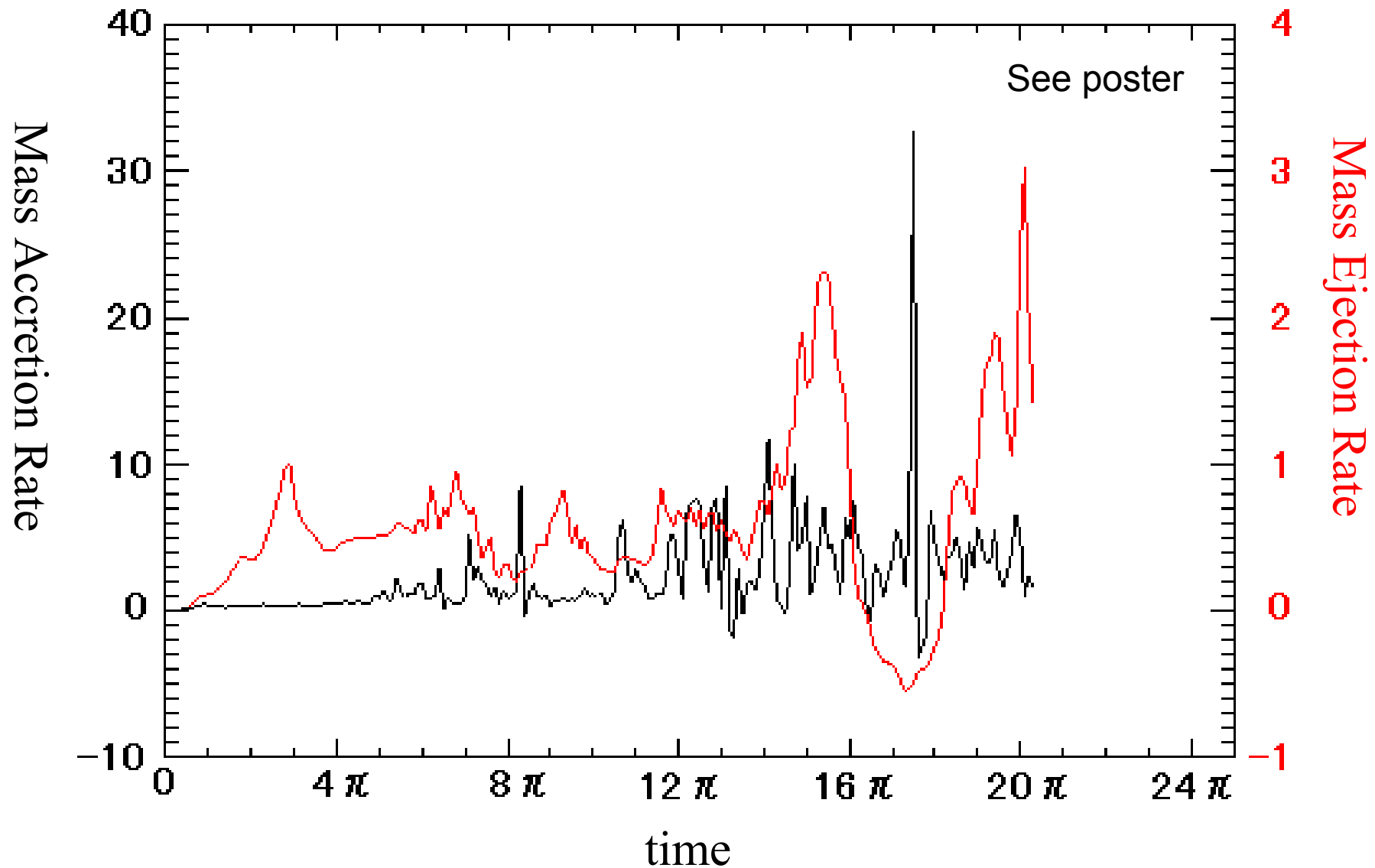
Magneto-rotational instability

- Balbus-Hawley (1991)
- [Chandrasekhar (1961), Velikhov (1959)]
- Explains viscosity of accretion disks

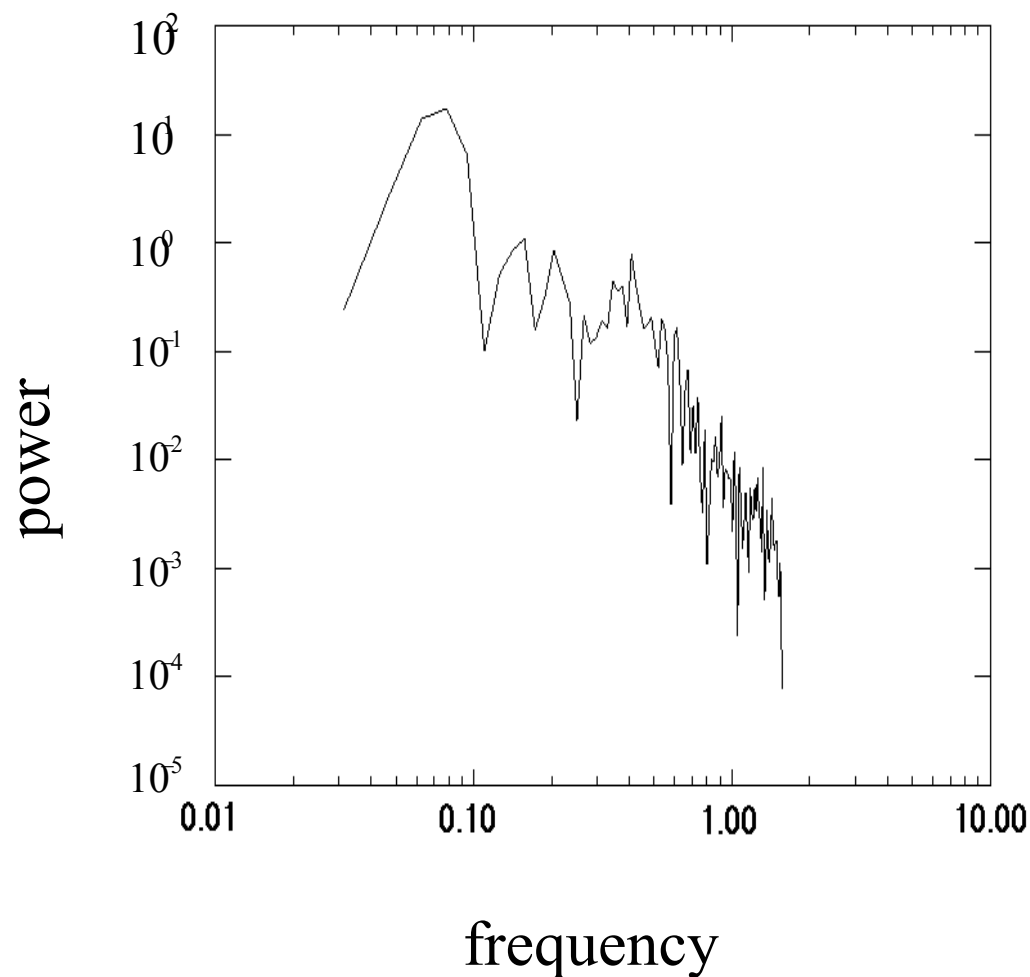


Mass Accretion Rate vs Mass Ejection Rate

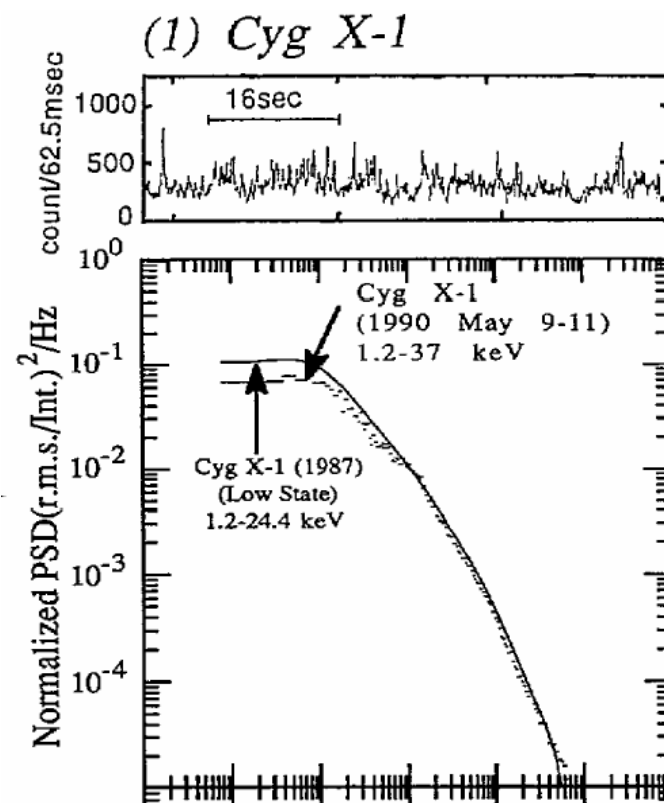
(Sato et al, Ibrahim et al. .2005, to be submitted)



Power spectrum of mass ejection rate from MHD simulations

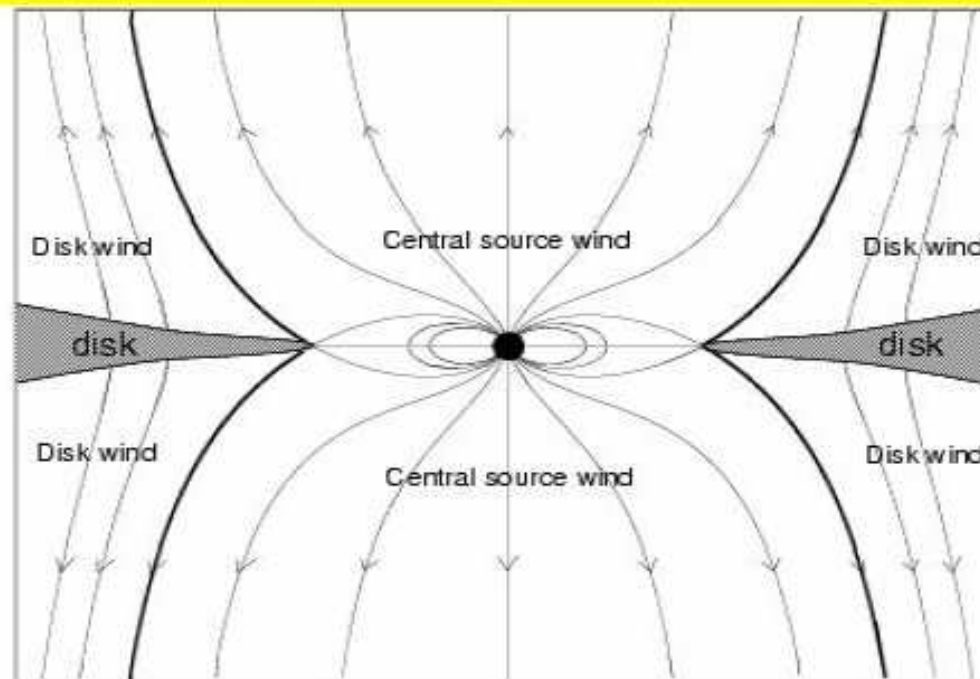


Observations of Time variability
of X-rays from BH accretion disk
(Miyamoto, Kitamoto, Negoro)



コリメーション

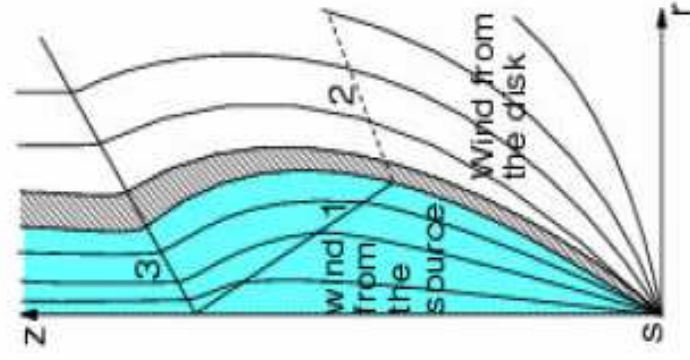
A two-component model for jets from source+disk



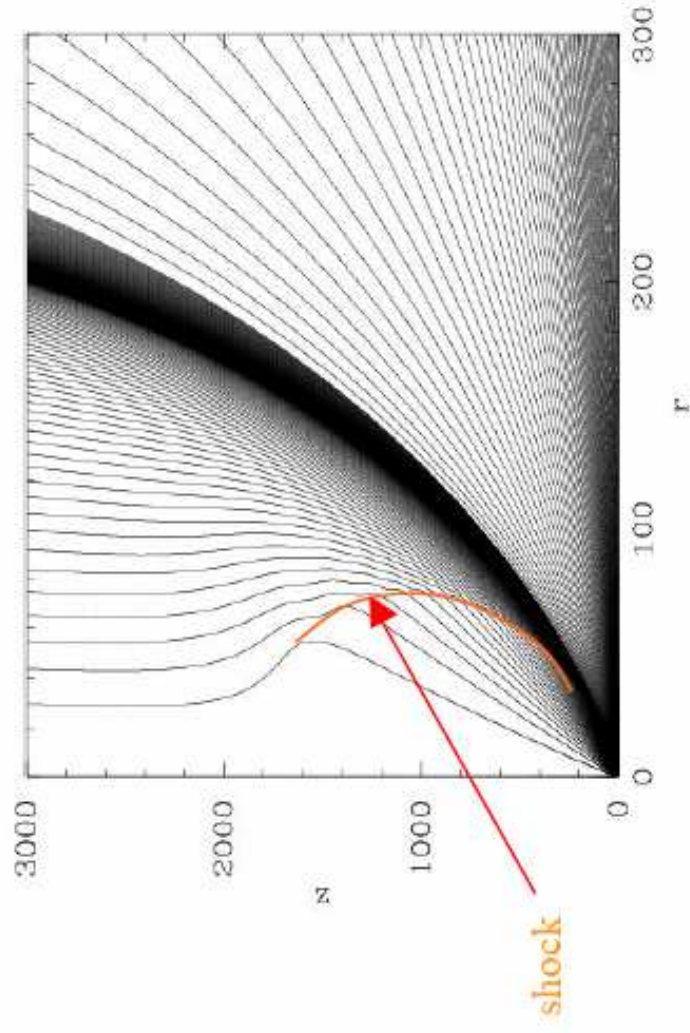
Tsinganos
(2003)

Recent numerical simulations and analytical models of magnetically collimated plasma outflows from a uniformly rotating central gravitating object and/or a Keplerian accretion disk have shown that relatively low mass and magnetic fluxes reside in the produced jet. Observations however indicate that in some cases, as in jets of YSO's, the collimated outflow carries higher fluxes than these simulations predict. A solution to this problem is proposed by the above model where jets with high mass flux originate in a central source which produces a noncollimated outflow provided that this source is surrounded by a rapidly rotating accretion disk. The relatively faster rotating disk produces a collimated wind which then forces all the enclosed outflow from the central source to be collimated too. This conclusion is confirmed by self-consistent numerical solutions of the full set of the MHD equations.

Confinement of stellar wind by a disk-wind



Collimation of the inner flow with the formation
of a shock.



今後の課題: 加速と構造

- ジェットの内部構造(ノット)の起源
- ジェットの3次元安定性(=>磁気リコネクション=>粒子加速)
- 相対論的ジェットの場合:
ローレンツ因子 >10 の高速ジェットはいかにして形成されるか?
=>ガンマ線バーストへの応用
- 電子陽電子磁氣的ジェットの物理?

今後の課題: コリメーション

- 回転星ダイポール磁場では、定常状態でどれだけの磁束が極方向にコリメートするか？
- 定常軸対称MHDアウトフローの数値解
(今までのところ、全空間をセルフコンシステントに解いたのは、桜井(1985)のみ)
=> 数理物理の超難問

今後の課題： 観測

- MHDジェットの観測的証拠をさがす
 - ジェットの回転とヘリカル磁場
 - ジェットの根本の降着円盤の磁場測定
- ジェットのコリメーションのスケールを観測的に解明
- ジェットとフレアの関係の検証