

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

- 宇宙ジェットの形成: 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
 - $E(\text{粒子}) >> E(\text{磁場})$ 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

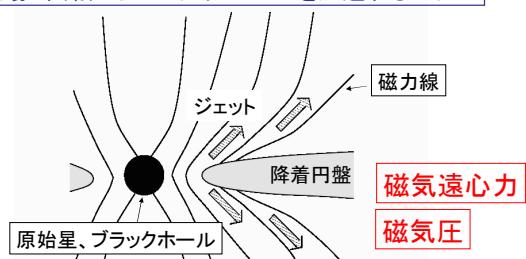
~~ガス圧加速モデル~~ 音速 $<<$ ジェットの速度

~~放射圧加速モデル~~ 放射の運動量
 $<<$ ジェットの運動量

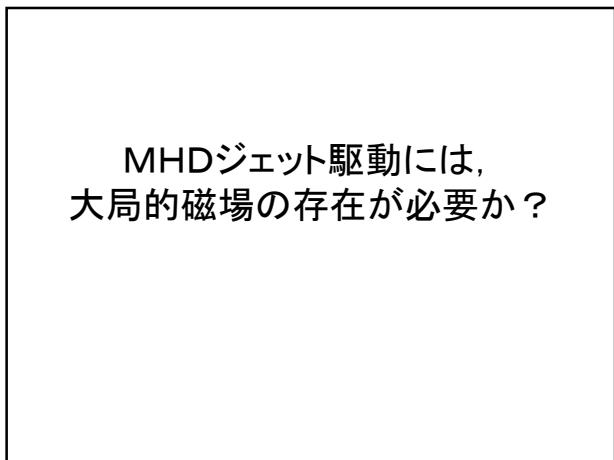
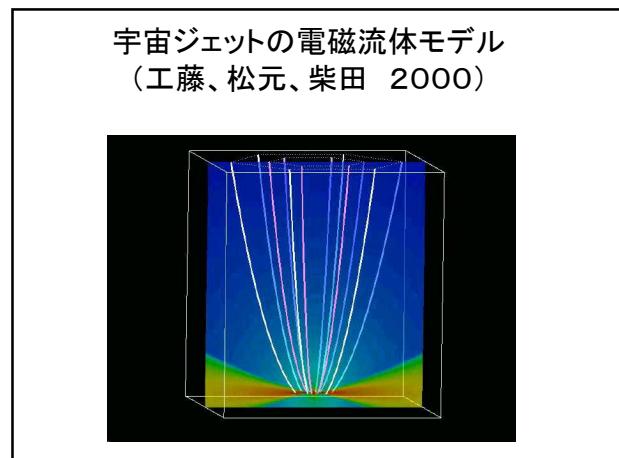
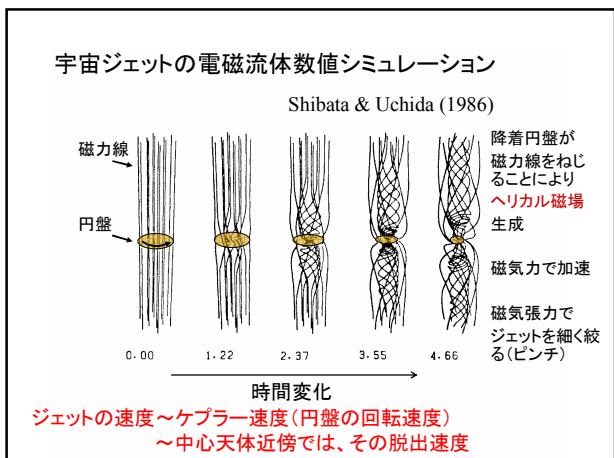
磁気力で加速するモデル
(磁気流体モデル)

宇宙ジェットの磁気流体モデル

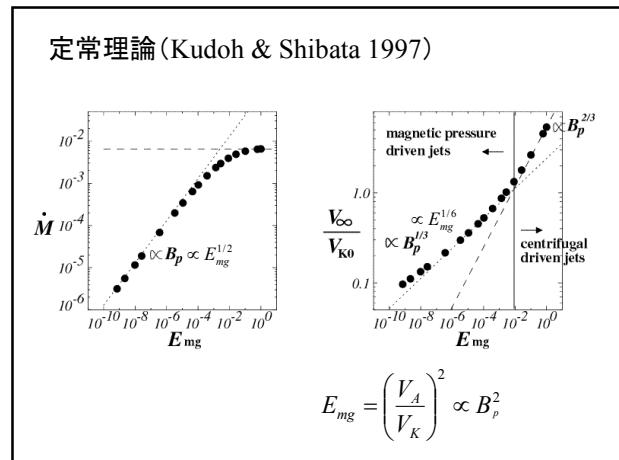
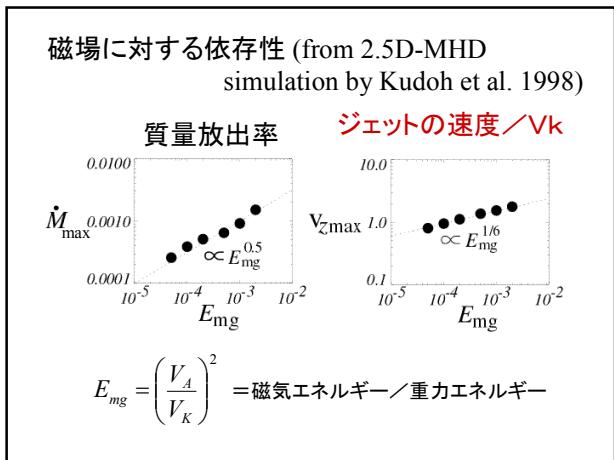
磁場と回転によってアウトフローを加速するモデル



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



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！



Jet velocity

$$V_{jet} \approx B_\phi / (4\pi\rho)^{1/2}$$

$$\approx \left(\frac{\Omega^2 B_p^2 r^4}{\dot{M}} \right)^{1/3} \quad \text{Michel (1969) velocity}$$

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

V_k:ケプラー速度
(円盤回転速度)

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

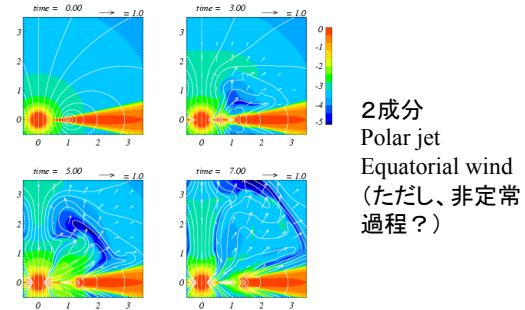
磁気遠心力 vs 磁気圧

- ・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 $E_{mg,c} < E_{mg} < 1$ $E_{mg} < E_{mg,c}$
- $E_{mg} \equiv \text{磁気エネルギー} / \text{重力エネルギー}$ $E_{mg,c} \equiv \rho_s / \rho_d$

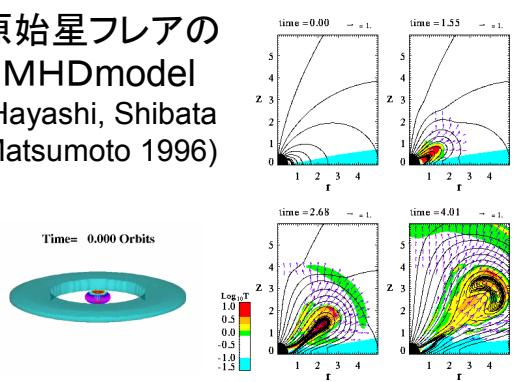
局所的磁場でも、ジェットは 加速できる

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)



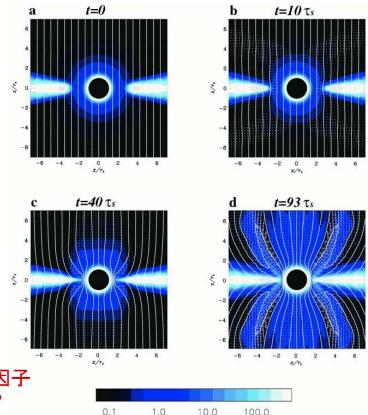
原始星フレアの
MHDmodel
(Hayashi, Shibata
Matsumoto 1996)



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、降着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る。降着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1.0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々には認識されていないのではないか。数値シミュレーションで可能な限りの絵を見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。

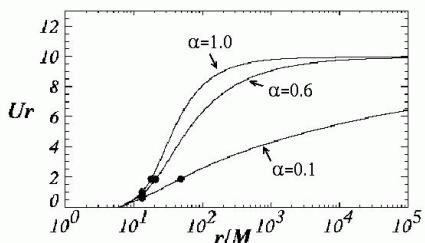
一般相
対論的
MHD
ジェット
(Koide,
Shibata,
Kudoh
1998、
1999,2000,
Aoki et al.)
最大のローレンツ因子
 $\sim 2 \Rightarrow$ real limit ?



ローレンツ因子の大きなジェットを作るのはどうすれば良いか？

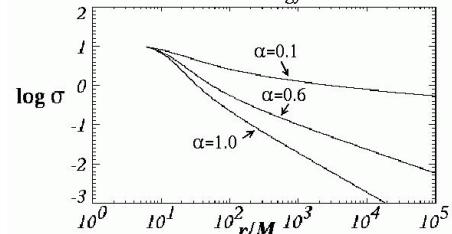
- ・パルサー風と良く似た状況設定を作る
 - 急激に広がる FLOW TUBE(磁場)
 - 非常に希薄なコロナ(ジェット)
- =>ダイポール磁場
電子・陽電子プラズマ

ローレンツ因子



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

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



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

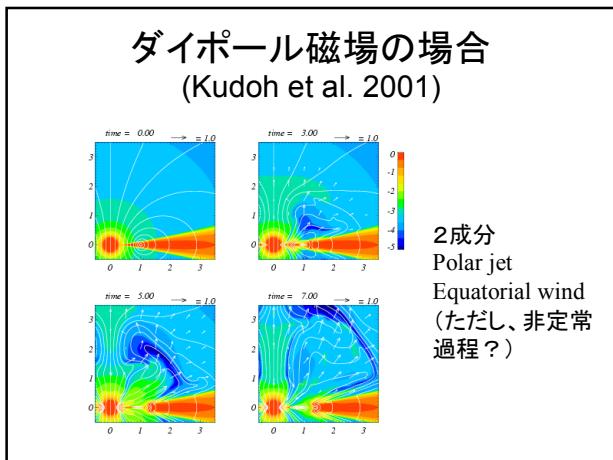
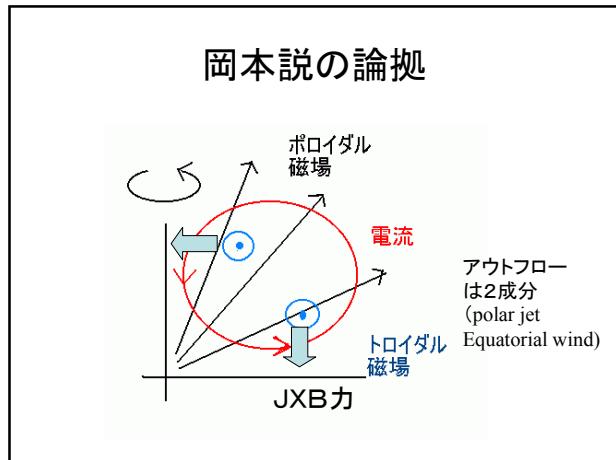
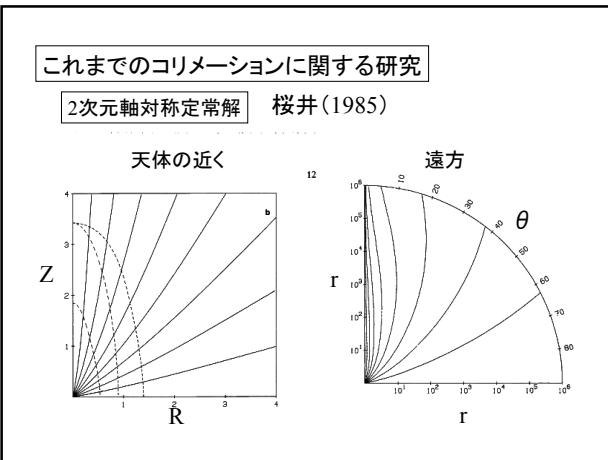
岡本論争について

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」

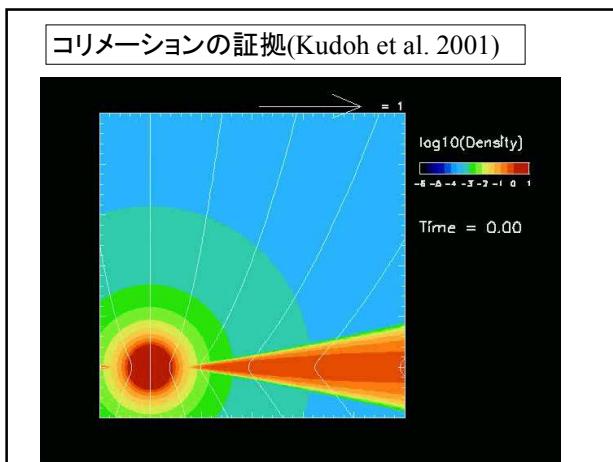
宇宙ジェットは磁場によってコリメートできるか？

「定常・軸対称MHDアウトフローはセルフコリメイトしない」



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）



$E(\text{粒子}) >> E(\text{磁場})$
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1.0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いかと思う。数値シミュレーションできれいな線を見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 > 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 => 粒子エネルギー (Blandford 2000)

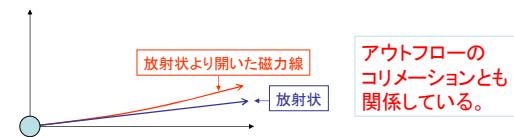
MHDアウトフローの性質

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。



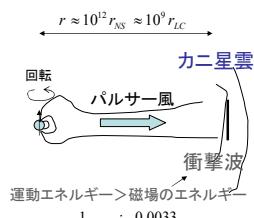
磁力管の開き具合は、アウトフローのコリメーションをきちんと求めないとわからない。しかし、それを解くのは難しい。

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)

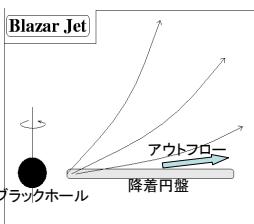
流線に沿って
 $r^2 B_p \propto r^{-\alpha}$ ($\alpha = 0$ が放射状)
 と仮定し、赤道面の流れを解き
 パルサー風の問題に応用した。

$\alpha \approx 0.4$ 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)

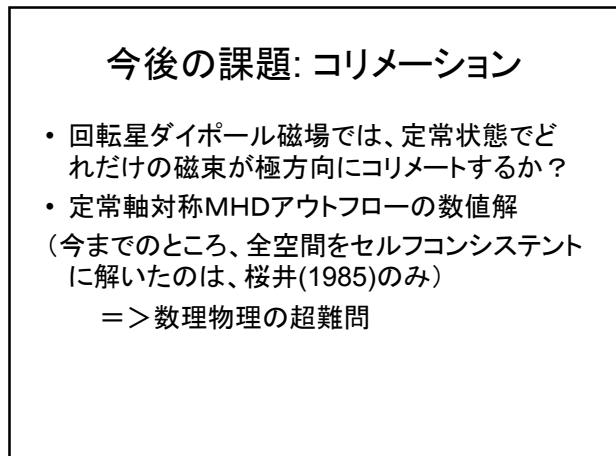
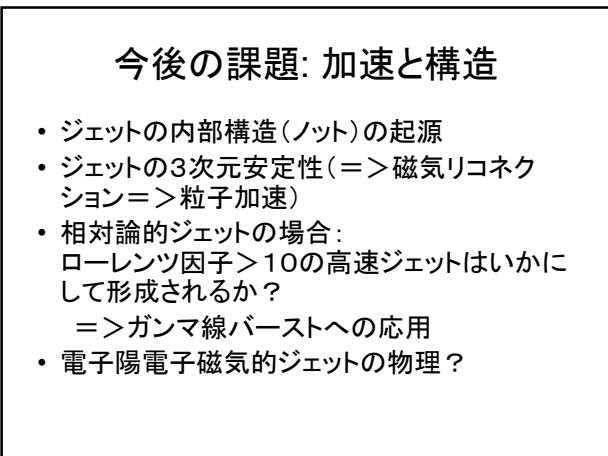
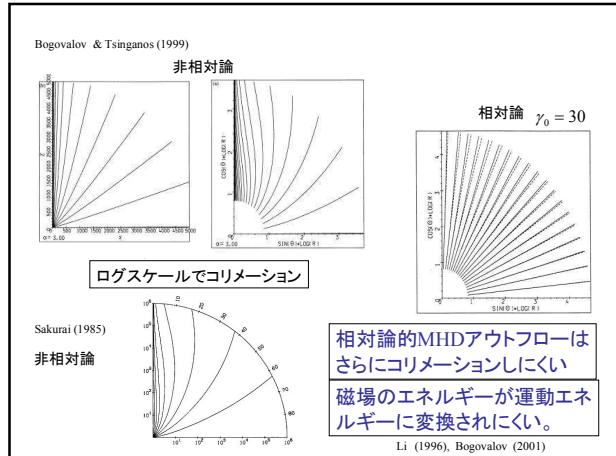
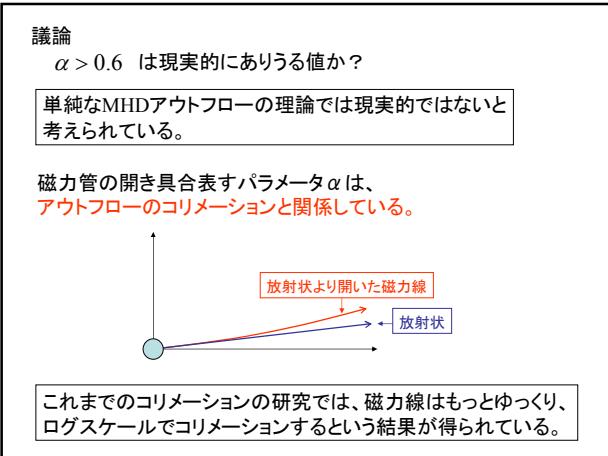
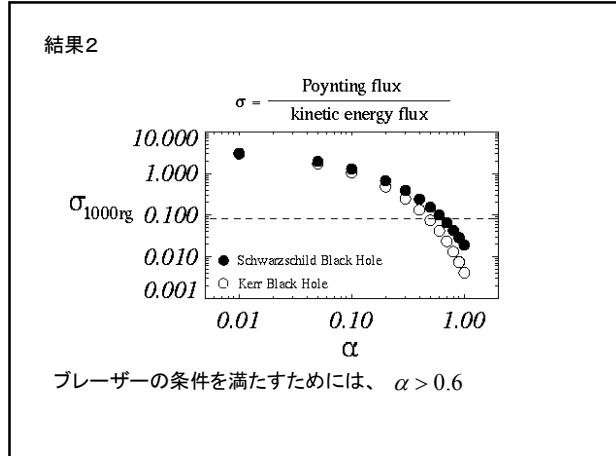
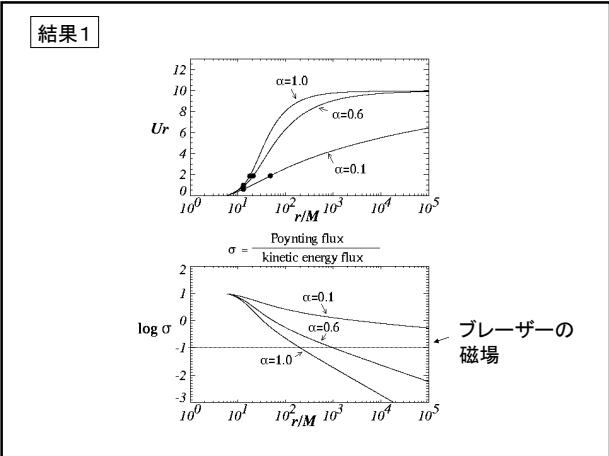
- ・流れは一次元。赤道面。

- ・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。



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 helical 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)

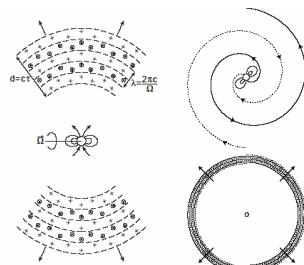
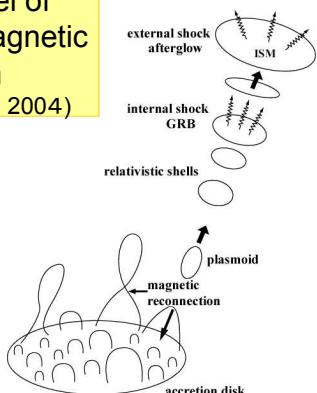


Fig. 2. Field configuration in quasi-spherical magnetic outflow driven by a perpendicular rotator ("pulsar-like" case) (schematic). Left: view in the equatorial plane, with dots and pluses indicating field lines into and out of the plane of the drawing. Right: top view from the rotational pole. Bottom:

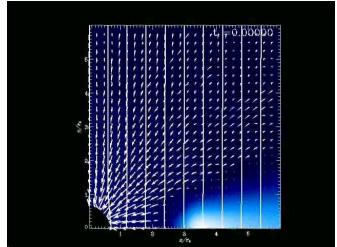
Flare/CME model of GRBs driven by magnetic reconnection (Aoki, Yashiro, Shibata 2004)

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)

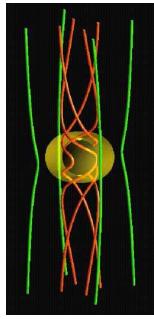


一般相対論的 MHDシミュレーション

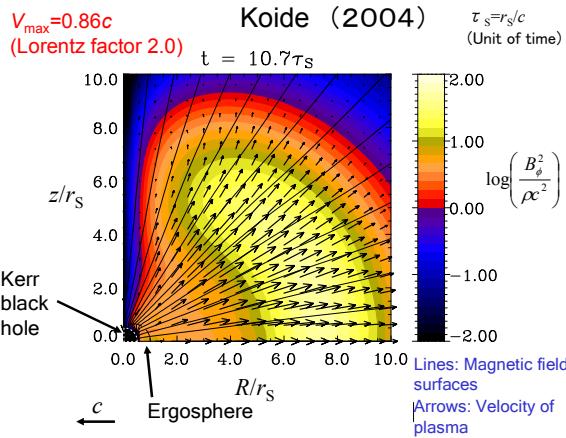
MHD jets from Kerr hole magnetosphere



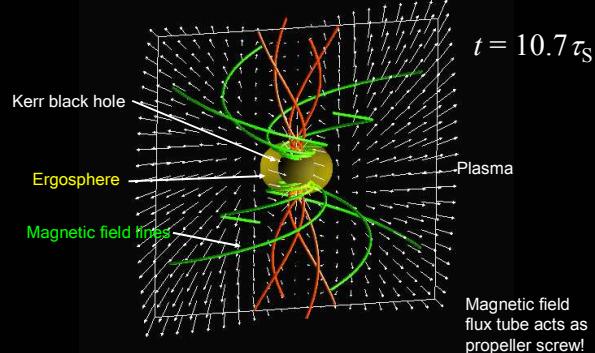
Koide, Meier, Kudoh,
Shibata (2000)



Koide et al. 2002 Science



Relativistic Outflow driven by Magnetic Field from Ergosphere



Koide 2004

ジェットの3次元安定性

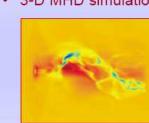
3D stability

- 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).

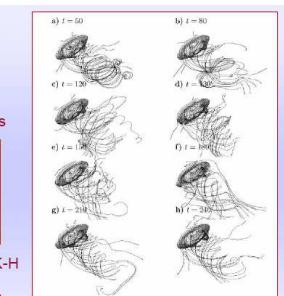
- Stability of MHD jets launched from Keplerian accretion disks

Ouyed et al 2003, ZEUS

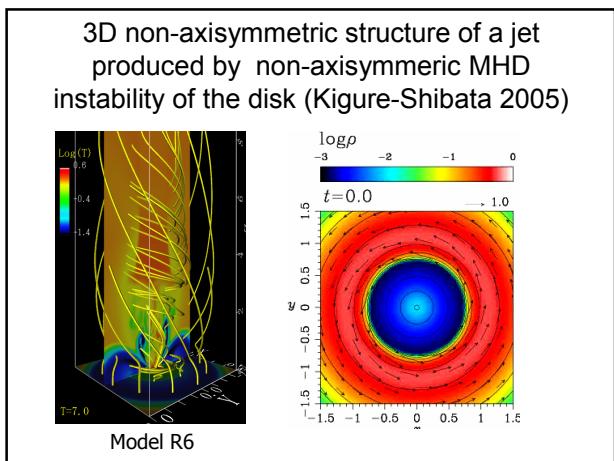
- 3-D MHD simulations



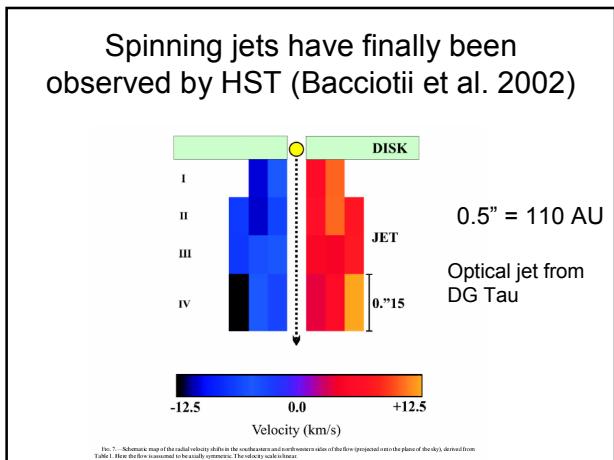
- Morphologies from K-H unstable modes: corkscrews, wobbles, knots, twists, etc.



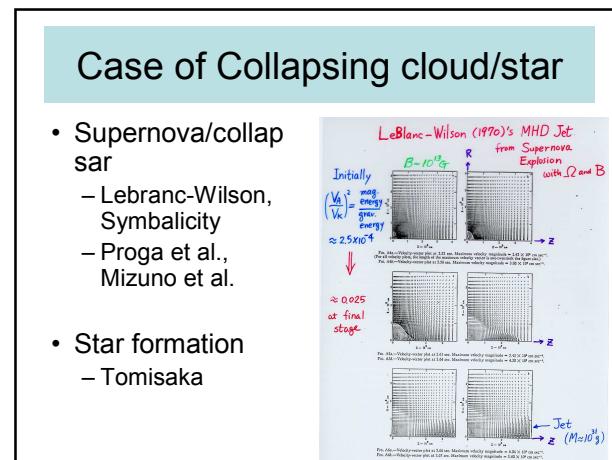
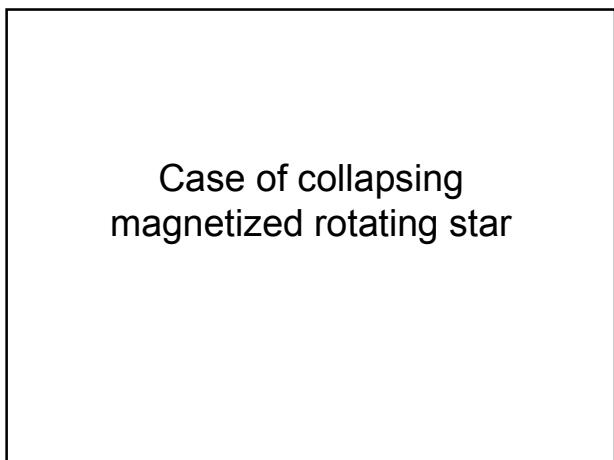
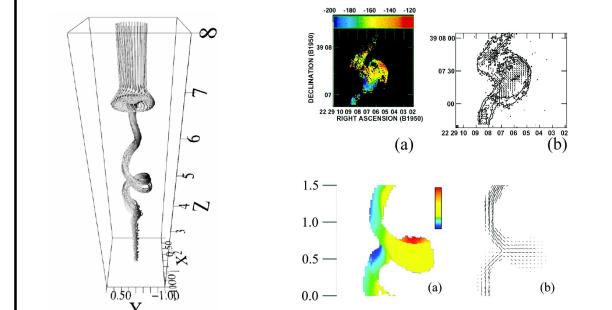
Instability saturation: energy transfer from large scale to small scale modes

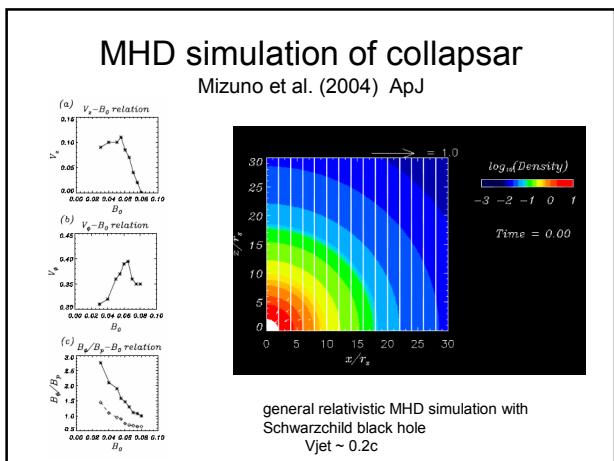


MHDジェットの観測的証拠

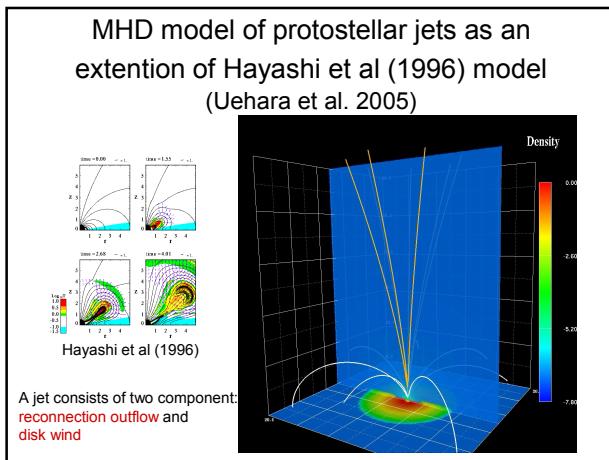


Modeling Faraday rotation measure of AGN jet (Kigure et al. 2004)



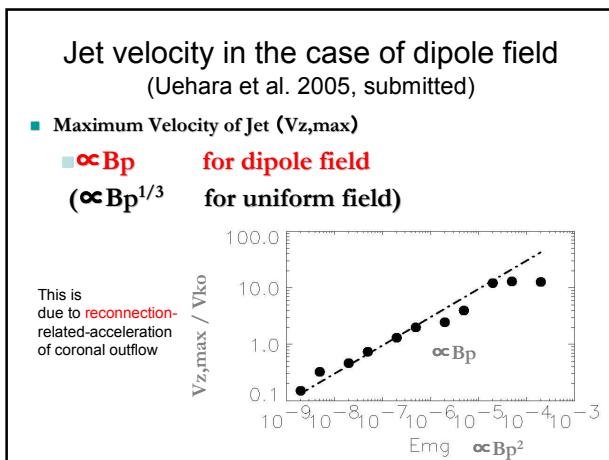
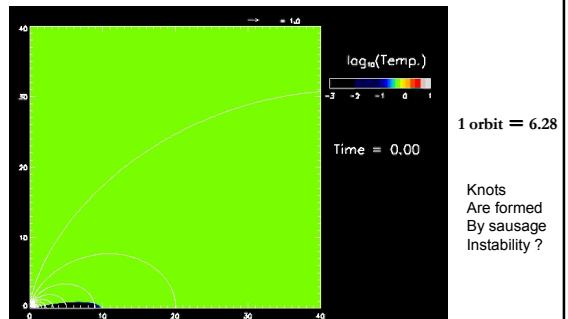


中心星磁気圏と円盤の相互作用によるジェット形成



Long term evolution of dipole case

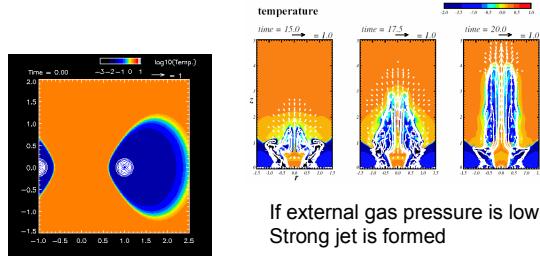
Uehara et al. 2005. to be submitted



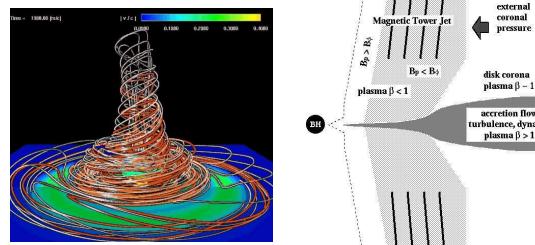
局所磁場をもつ円盤から噴出するジェット

Case of Initially Localized weak field (Kudoh, Matsumoto, Shibata 2002, PASJ)

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



KatoY, Mineshige, Shibata (2004) 3D sim. (ApJ)

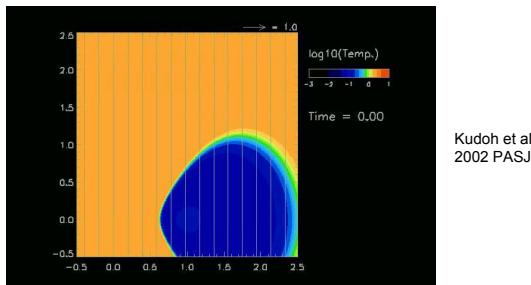


This toroidal field dominated jet is launched by **magnetic pressure** (similar to Shibata and Uchida 1985, Turner et al. 1999, Kudoh et al. 2002), and is also Similar to "magnetic tower" of Lynden-Bell (1996)

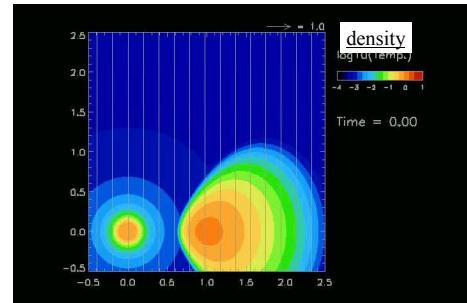
磁気回転不安定性の効果と 長期時間変動

Why do jets and disks can never reach steady state ?

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



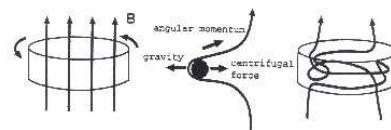
Long term evolution – nonsteady, intermittent ejection of jets with many reconnection events

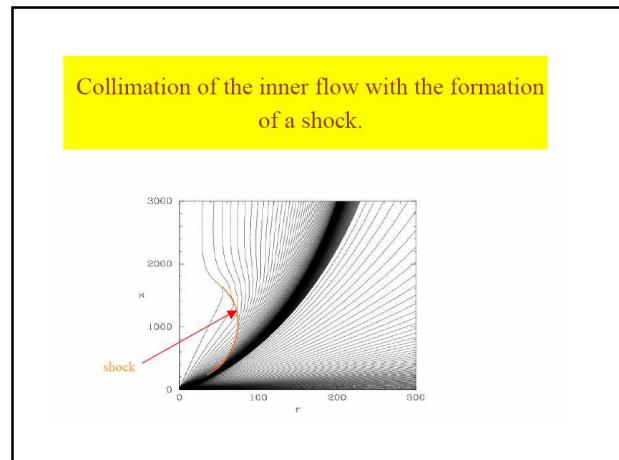
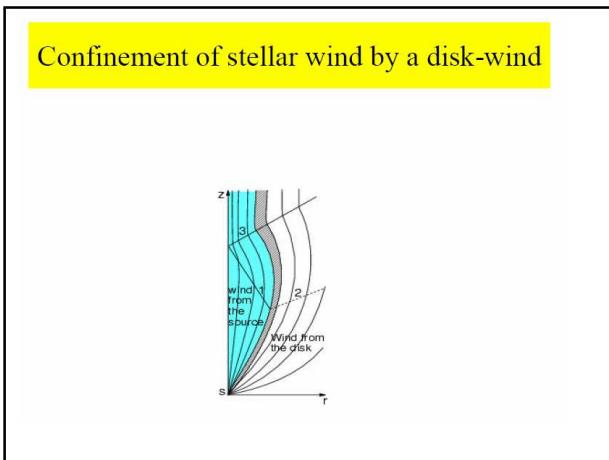
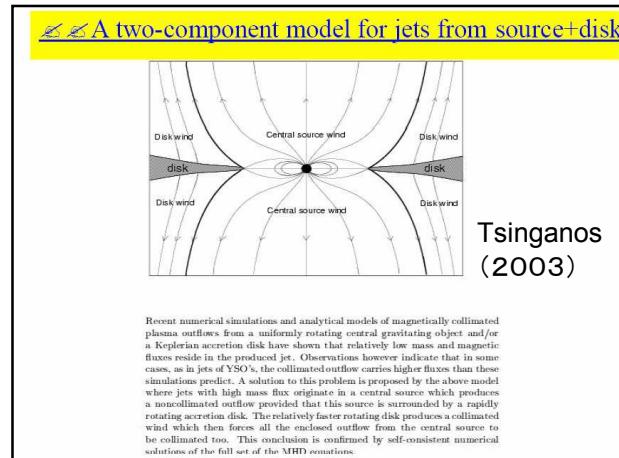
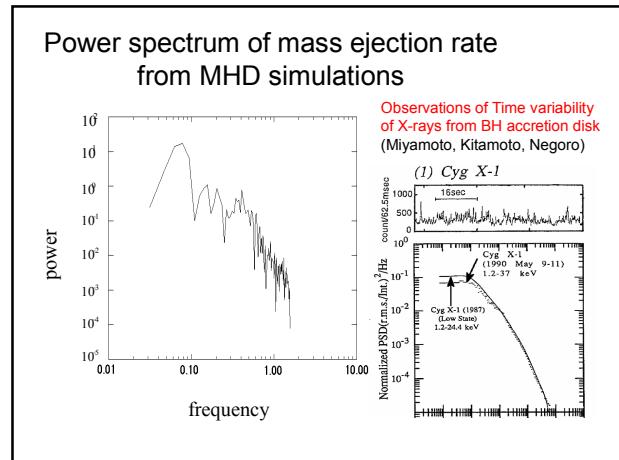
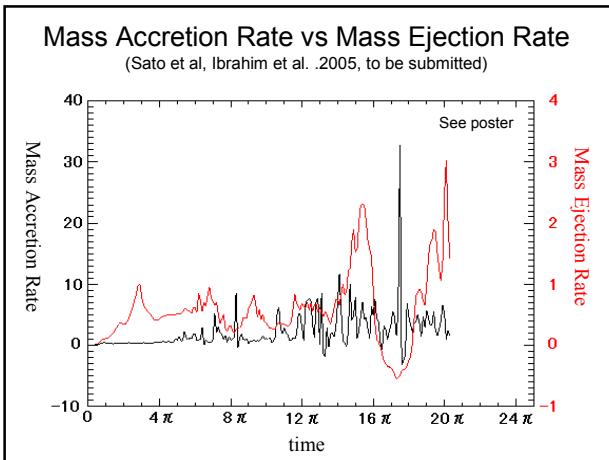


- Sato et al. 2005 | Ibrahim et al. 2005 in prep

Magneto-rotational instability

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





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**
- 電子陽電子磁気的ジェットの物理?

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ィントに解いたのは、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