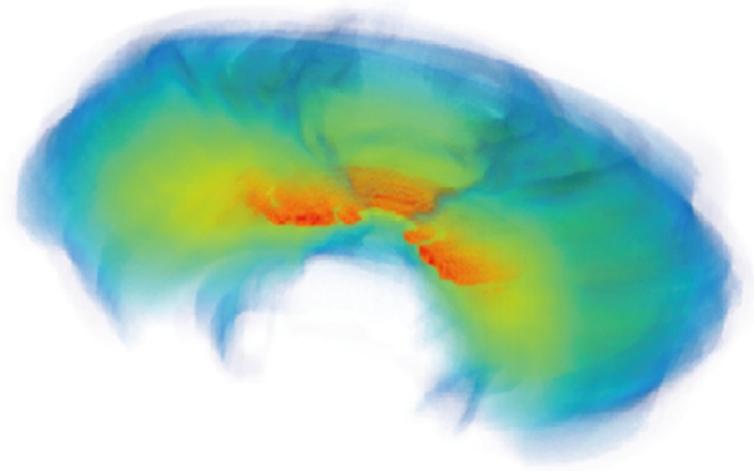
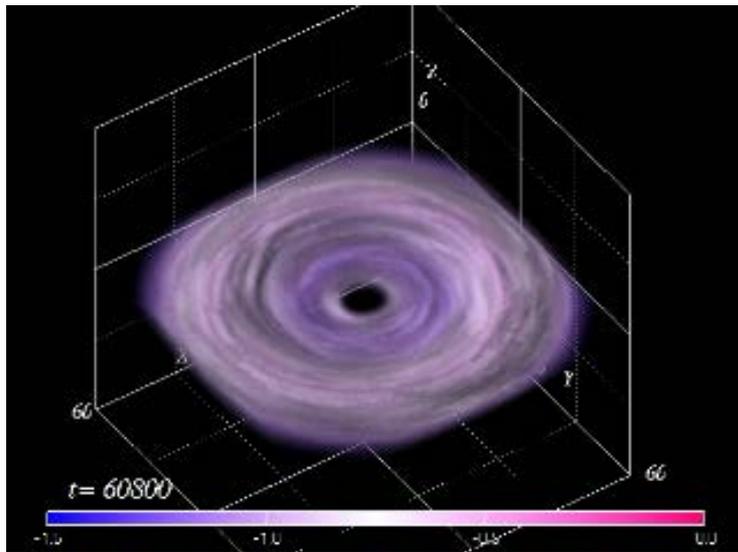


# 天体プラズマの磁気流体 数値シミュレーション



松元亮治(千葉大理)

# 講演予定

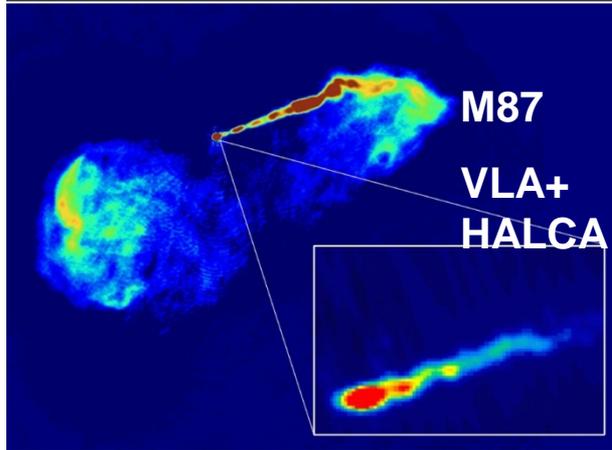
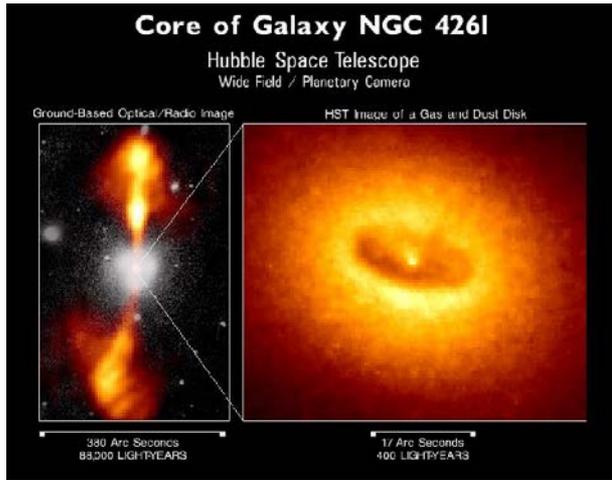
- 私の磁気流体計算クロニクル
- 降着円盤モデルへの磁場の導入
- パーカー不安定性の非線形時間発展
- 磁気流体ジェット形成のシミュレーション
- 磁気回転不安定性の3次元シミュレーション
- 円盤ダイナモシミュレーション
- 降着円盤の状態遷移シミュレーション
- 降着円盤の輻射磁気流体シミュレーション

# 私の磁気流体計算クロニクル

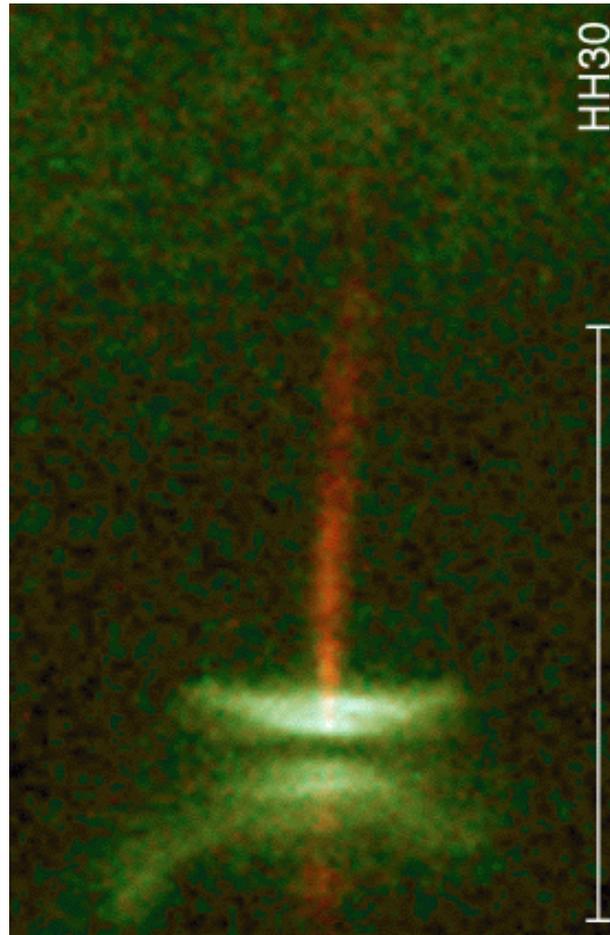
- ・ 1980 大学院入学。柴田一成さんと同室に。  
FCT(Flux Corrected Transport)スキームを用いた  
1次元磁気流体コードの実装。JCP愛読。
- ・ 1985頃 2次元MHDコードをベクトル計算機用にチューニング  
(20倍高速化)
- ・ 1986 パーカー不安定性の2次元磁気流体計算を実施
- ・ 1988 磁気流体ジェット形成の2次元磁気流体計算を実施
- ・ 1992 テキサス大学オースチン校に1年間滞在。  
田島俊樹先生と共同研究。太陽浮上磁場、磁気回転  
不安定性等の3次元MHD計算。磁気流体コードの並列化。
- ・ 1995 原始星フレアの磁気流体計算を実施(Hayashi+ 96)
- ・ 1997 回転トーラスの大局的3次元磁気流体計算を実施。
- ・ 1999 JST計算科学プロジェクトに採択。CANS開発。
- ・ 2011 HPCI戦略プログラム分野5に参画。CANS+開発
- ・ 2016 ポスト「京」重点課題9本格実施。輻射磁気流体計算。

# 降着円盤モデルへの磁場の導入

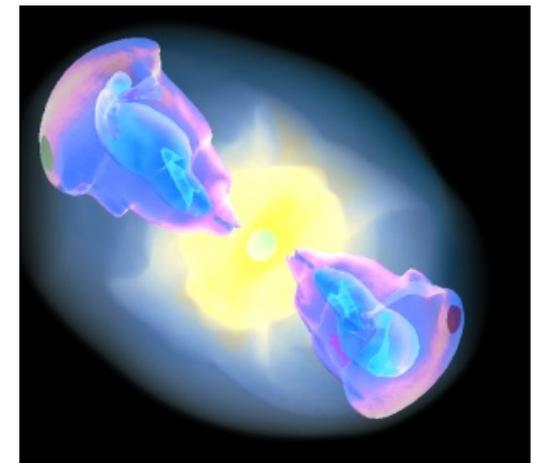
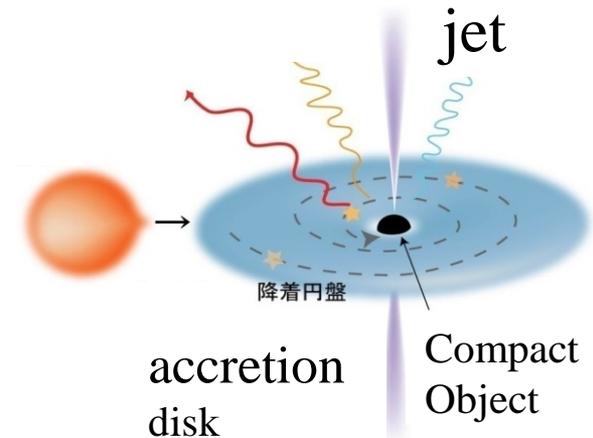
# 降着円盤は宇宙の活動現象を駆動する



活動銀河中心核

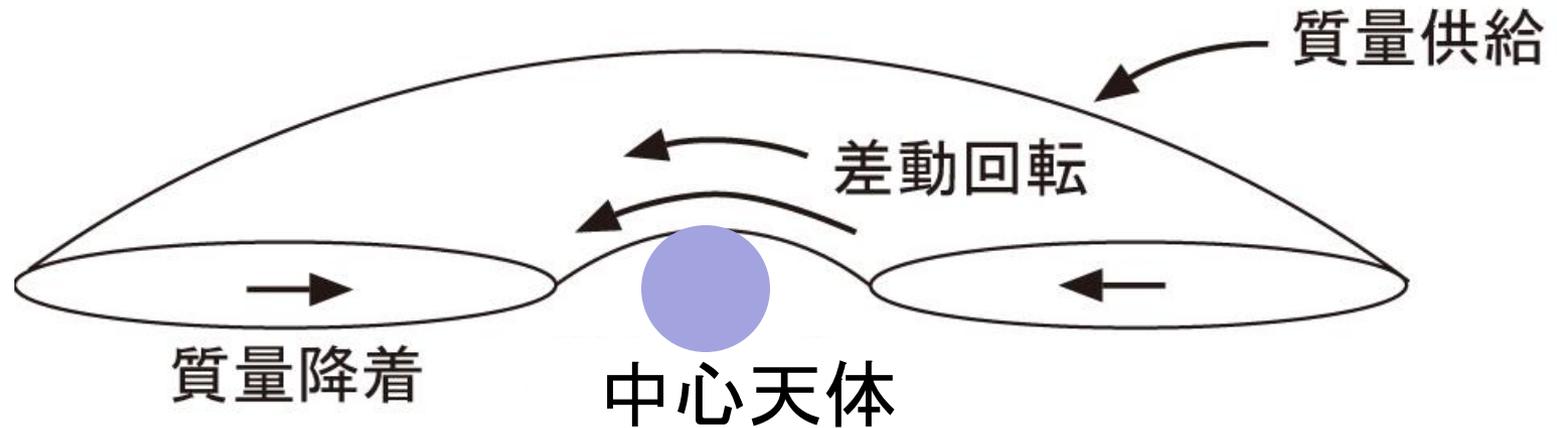


原始星円盤とジェット  
(Burrows 1995)



ガンマ線バースト

# 降着円盤モデル

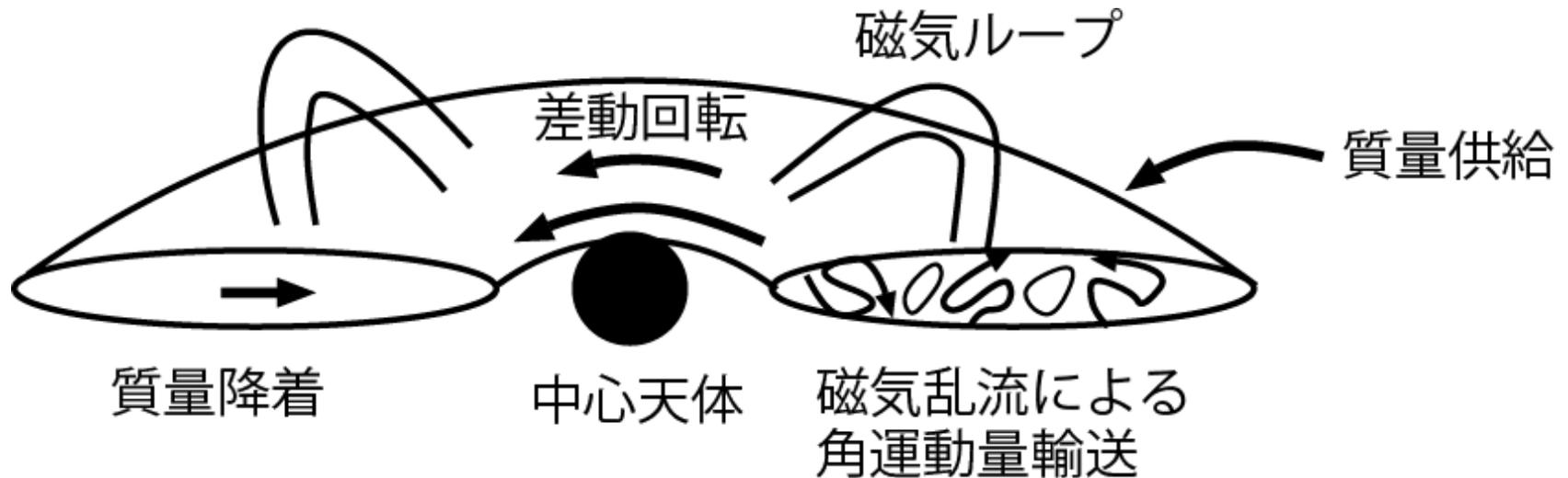


回転物質が落下するためには角運動量を失う必要がある。

標準モデルでは粘性ストレス  $T_{r\phi} = \alpha P$  と仮定

- Shakura and Sunyaev 1973: 幾何学的に薄い定常軸対称モデル
- 観測とモデルの比較から  $\alpha = 0.01 \sim 0.1$

# 磁気降着円盤のモデル



- 降着円盤が磁気乱流状態にあれば、Maxwell Stress  $\langle BrB\phi/4\pi \rangle$  による角運動量輸送が可能
- Shakura and Sunyaev (1973)においても角運動量輸送機構の候補とされていた。

# 降着円盤の磁気乱流モデル

Publ. Astron. Soc. Japan 38, 313–333 (1986)

Kato and Horiuchi 1986

## A Model of Hydromagnetic Turbulence in Differentially Rotating Disks

Shoji KATO and Toshiro HORIUCHI

*Department of Astronomy, University of Kyoto, Sakyo-ku, Kyoto 606*

(Received 1985 April 30; accepted 1986 January 4)

### Abstract

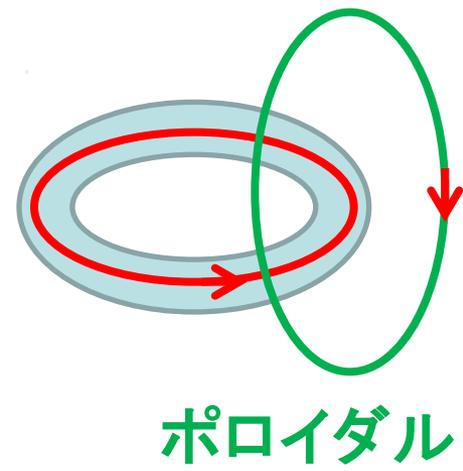
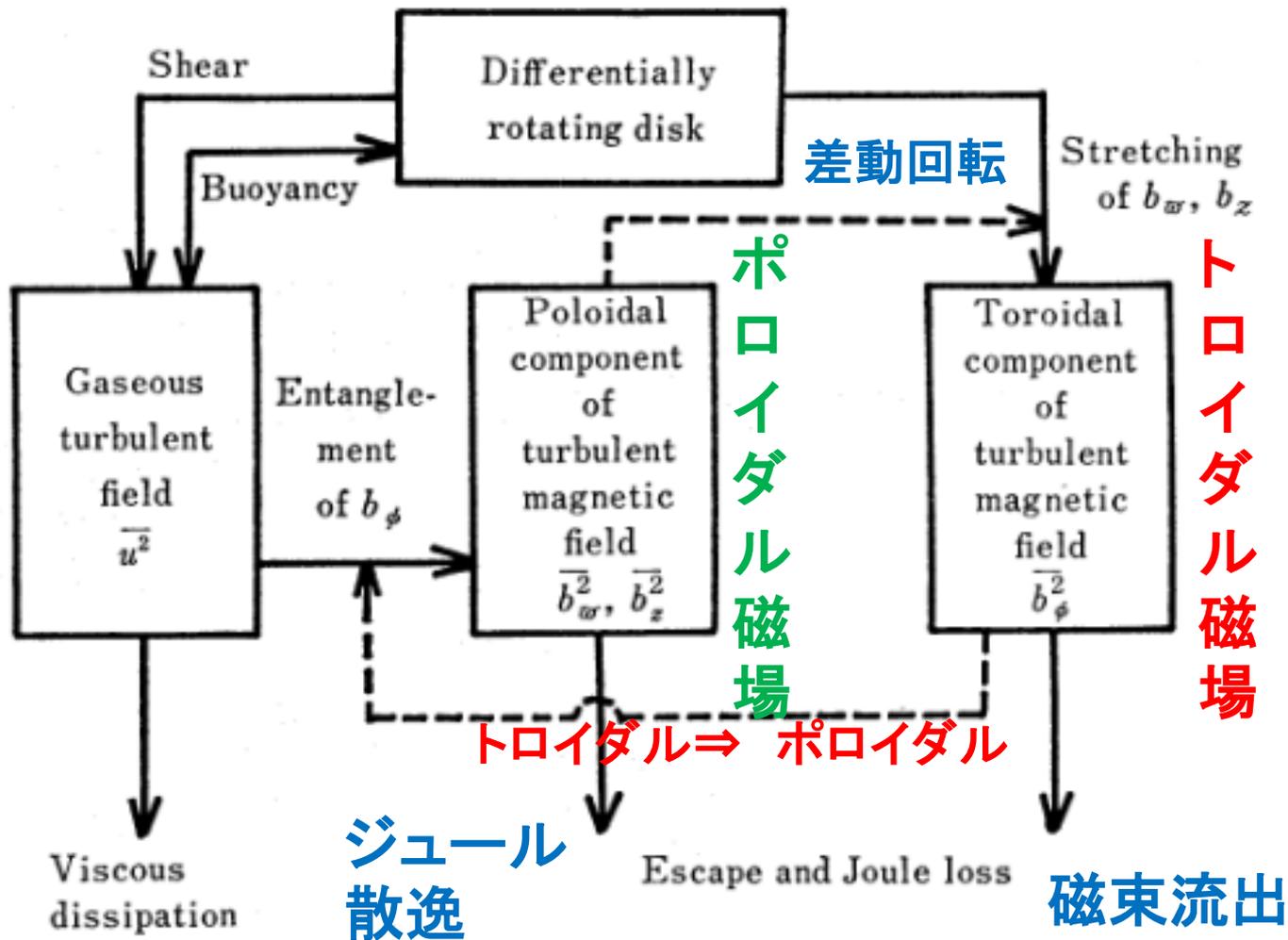
The structure of hydromagnetic turbulence in differentially rotating disks is examined in order to determine the so-called  $\alpha$ -value in accretion disks. This examination is made by considering energy interactions among the turbulent gas, turbulent magnetic field, and thermal and kinetic states of differentially rotating disks. The turbulent magnetic field is assumed to be stretched much in the longitudinal direction by the differential rotation of disks. The field is further assumed to escape from the disk by magnetic buoyancy in addition to being dissipated by turbulent magnetic diffusivity. To specify the efficiency of energy transfer from gaseous

降着円盤内の磁気乱流をモデル化することにより、角運動量輸送パラメータ $\alpha$ の値を見積もった論文

$$\alpha_A = 0.1-0.3$$

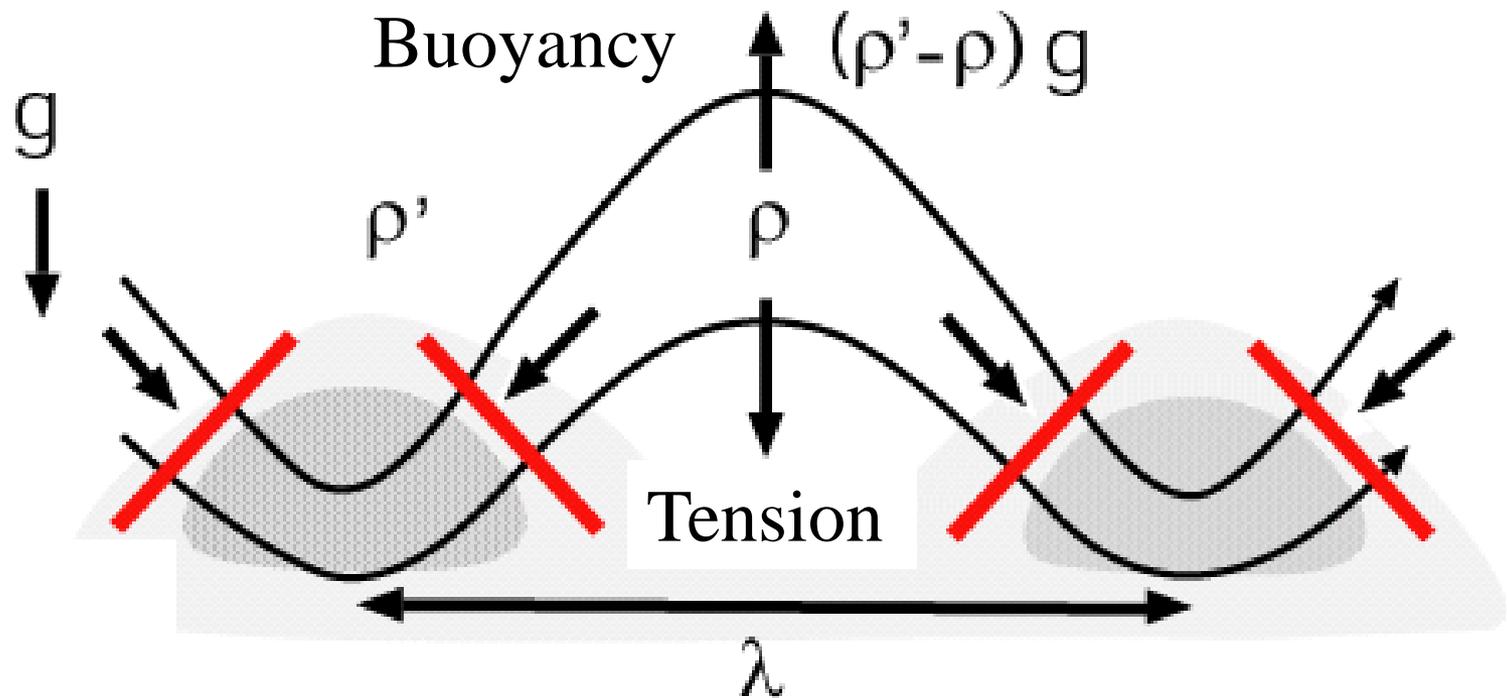
円盤の加熱率等は磁束浮上速度に依存することを示した。

# 磁気乱流の生成・維持モデル (Kato and Horiuchi 1986)



# パーカー不安定性の 非線形時間発展

# パーカー不安定性



# 磁気流体方程式

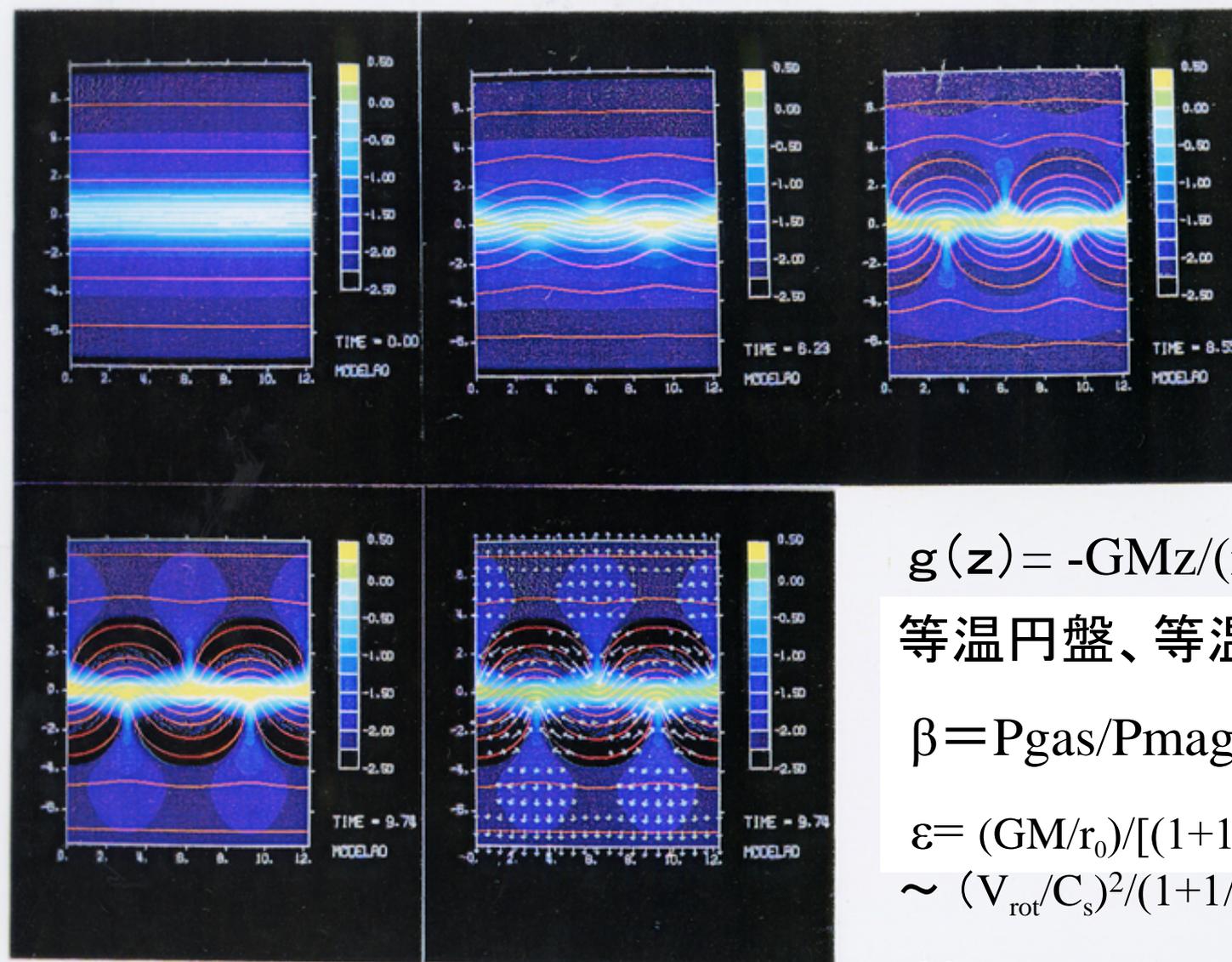
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{4\pi} + \rho \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \eta \nabla \times \mathbf{B})$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{v}) + p \nabla \cdot \mathbf{v} = Q_J + Q_{vis} + Q_{rad}$$

# パーカー不安定性の2次元MHD数値実験



$$g(z) = -GMz / (r_0^2 + z^2)^{3/2}$$

等温円盤、等温変化

$$\beta = P_{\text{gas}} / P_{\text{mag}} = 1$$

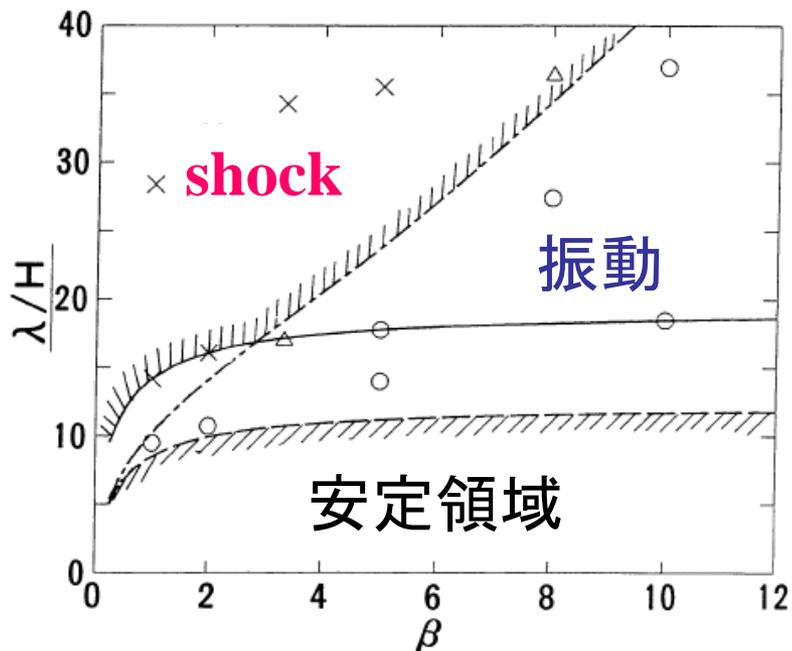
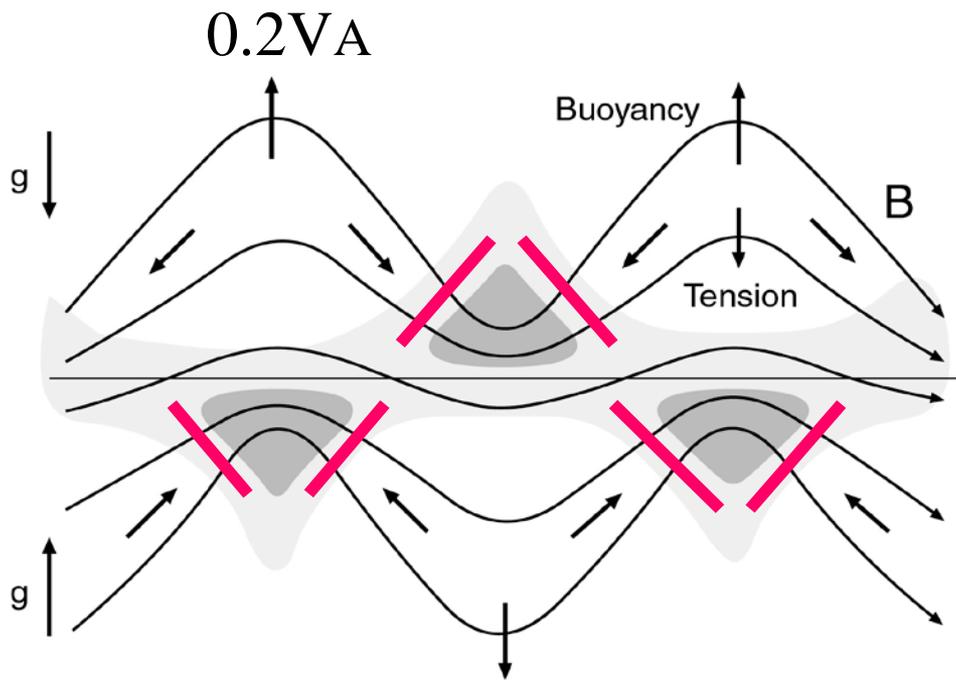
$$\varepsilon = (GM/r_0) / [(1+1/\beta) C_s^2]$$

$$\sim (V_{\text{rot}}/C_s)^2 / (1+1/\beta) = 6$$

Matsumoto et al. 1988

# 落下流による衝撃波の形成

Matsumoto et al. 1990, ApJ 356, 259

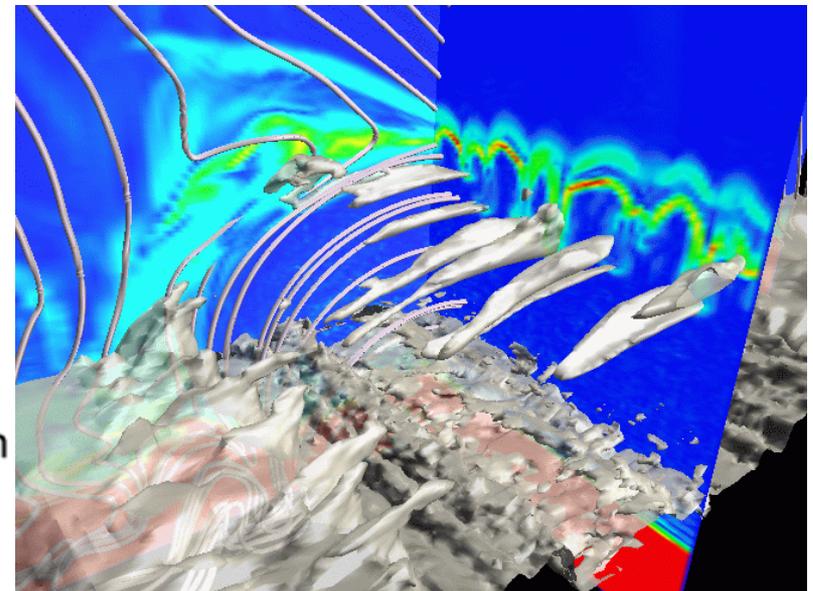
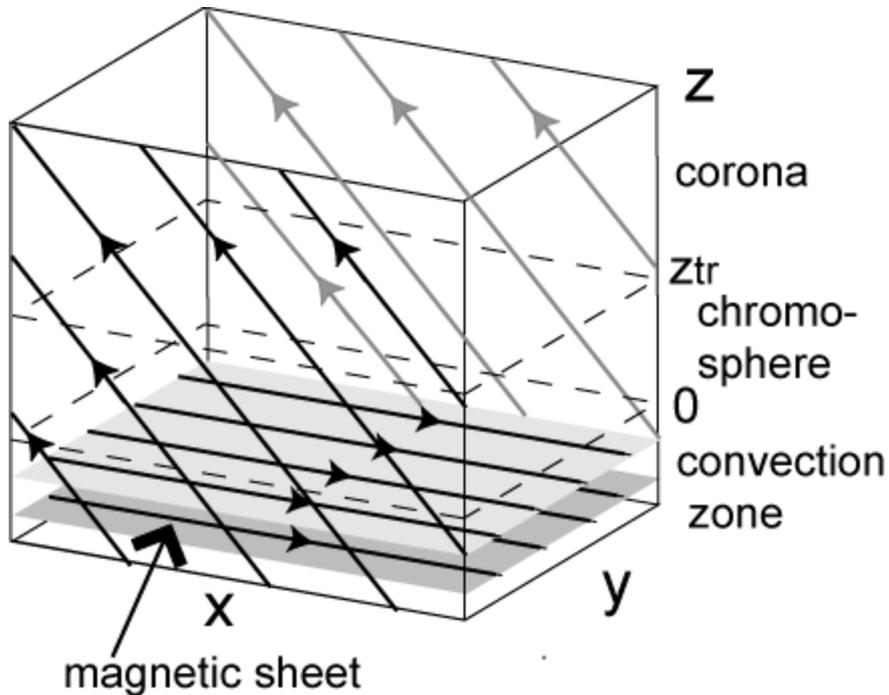
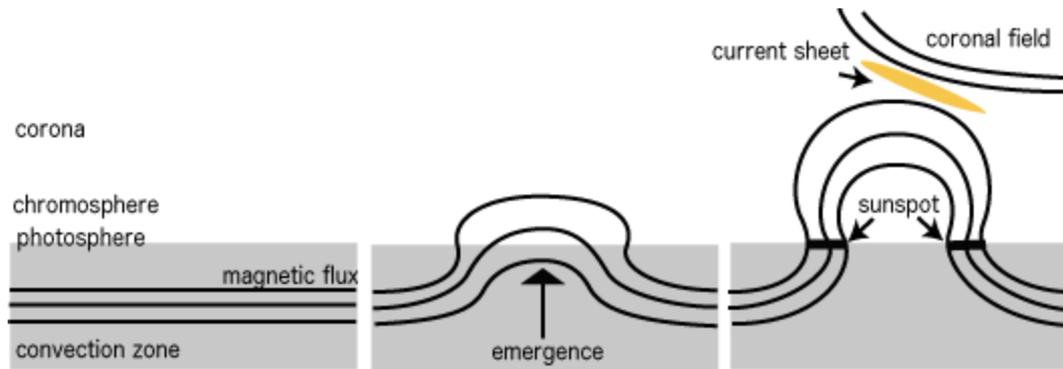


最大成長波長では  $V_x \sim V_A \Rightarrow V_A > C_s$  なら衝撃波発生

$V_x = v_x \exp(\omega t)$   
 $B_z = b_z \exp(\omega t) \sim B_0 \Rightarrow V_x = v_x / (b_z / B_0) > C_s$  なら衝撃波発生

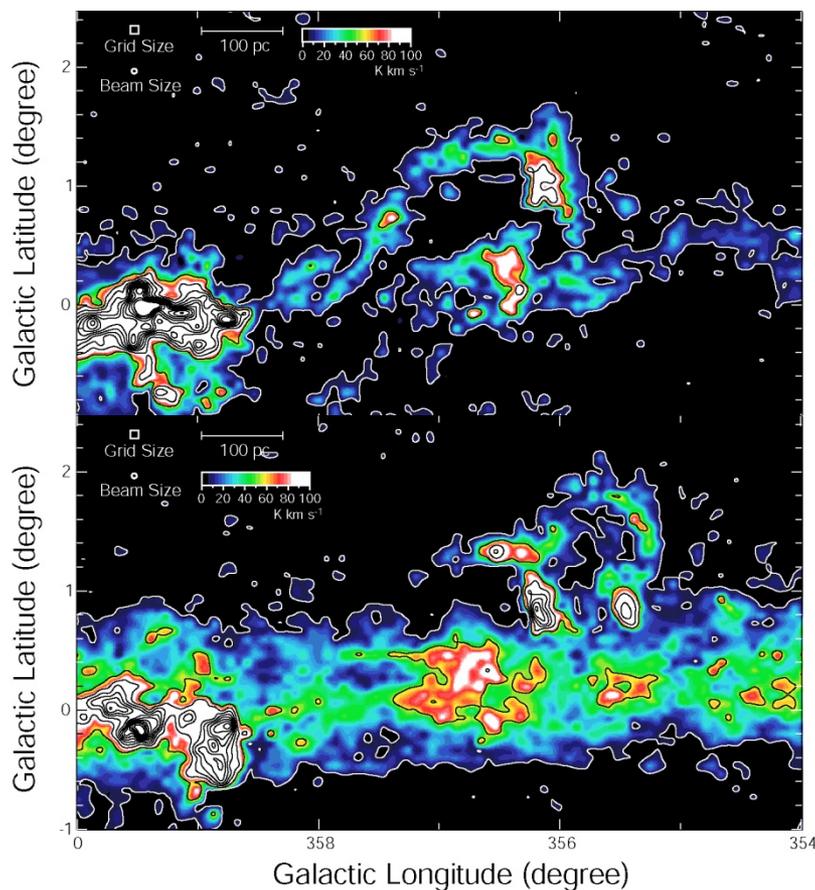
→ 円盤表面を加熱

# 太陽浮上磁場の3次元MHDシミュレーション

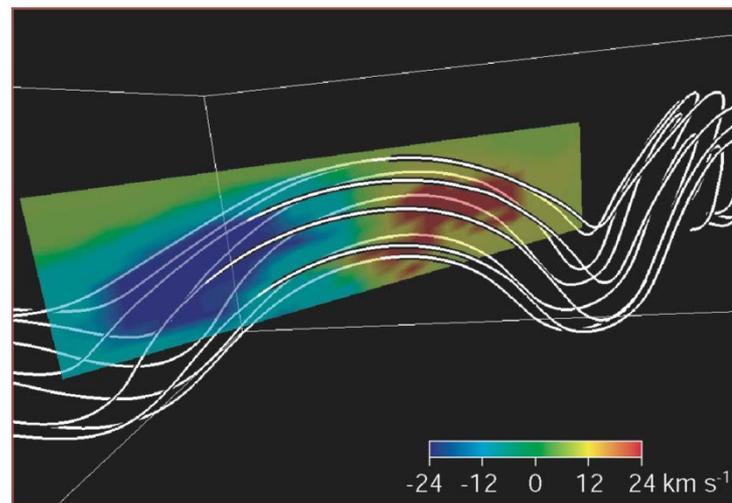
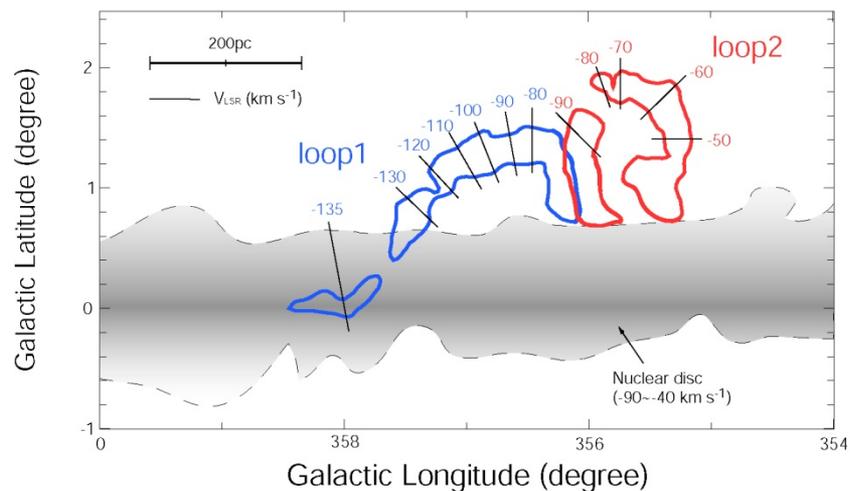


Isobe et al. 2006

# 銀河系中心の分子ループ構造



NANTENにより、銀河系中心で発見されたCO分子のループ構造  
(Fukui et al. 2006)



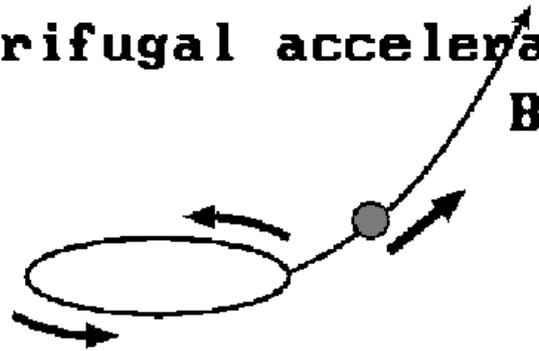
2次元磁気流体シミュレーション結果

# 磁気流体ジェット形成 シミュレーション

# 宇宙ジェットの磁氣的加速機構

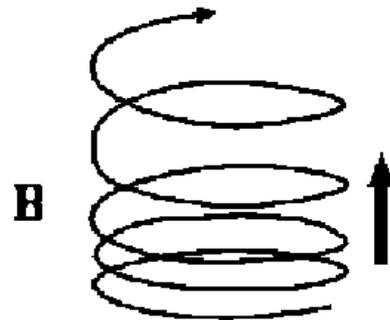
遠心力加速

centrifugal acceleration

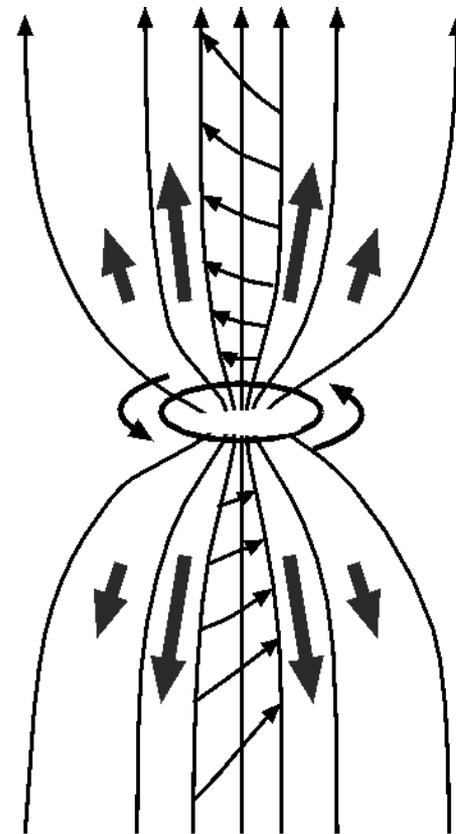
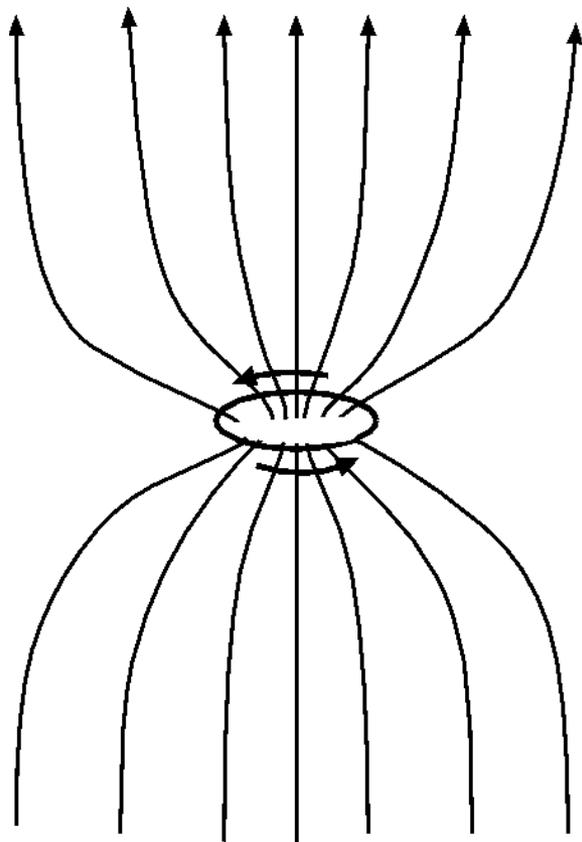


磁気圧加速

magnetic pressure acceleration



# 宇宙ジェット形成の内田・柴田機構



# 軸対称2次元磁気流体 シミュレーション結果

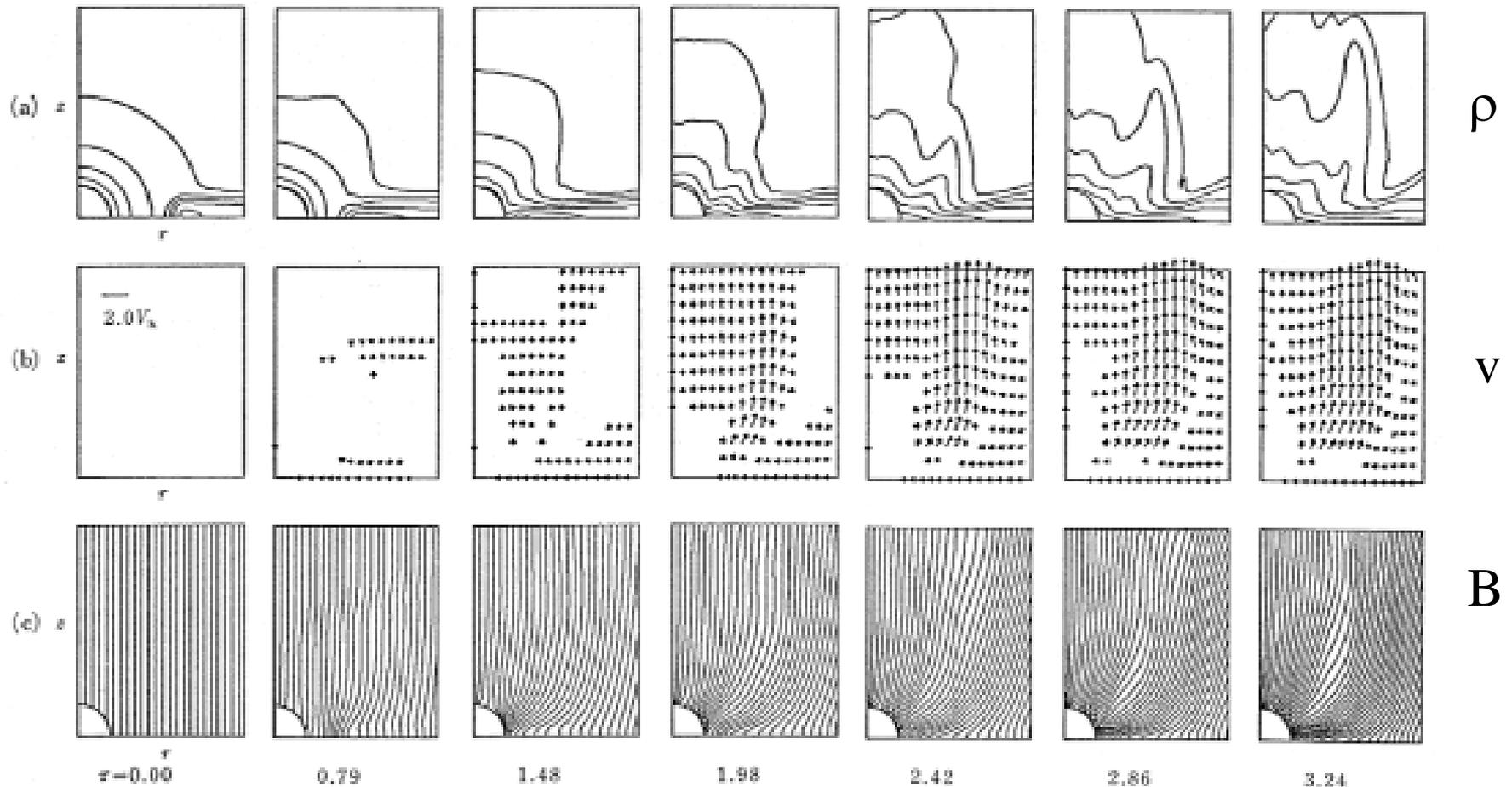
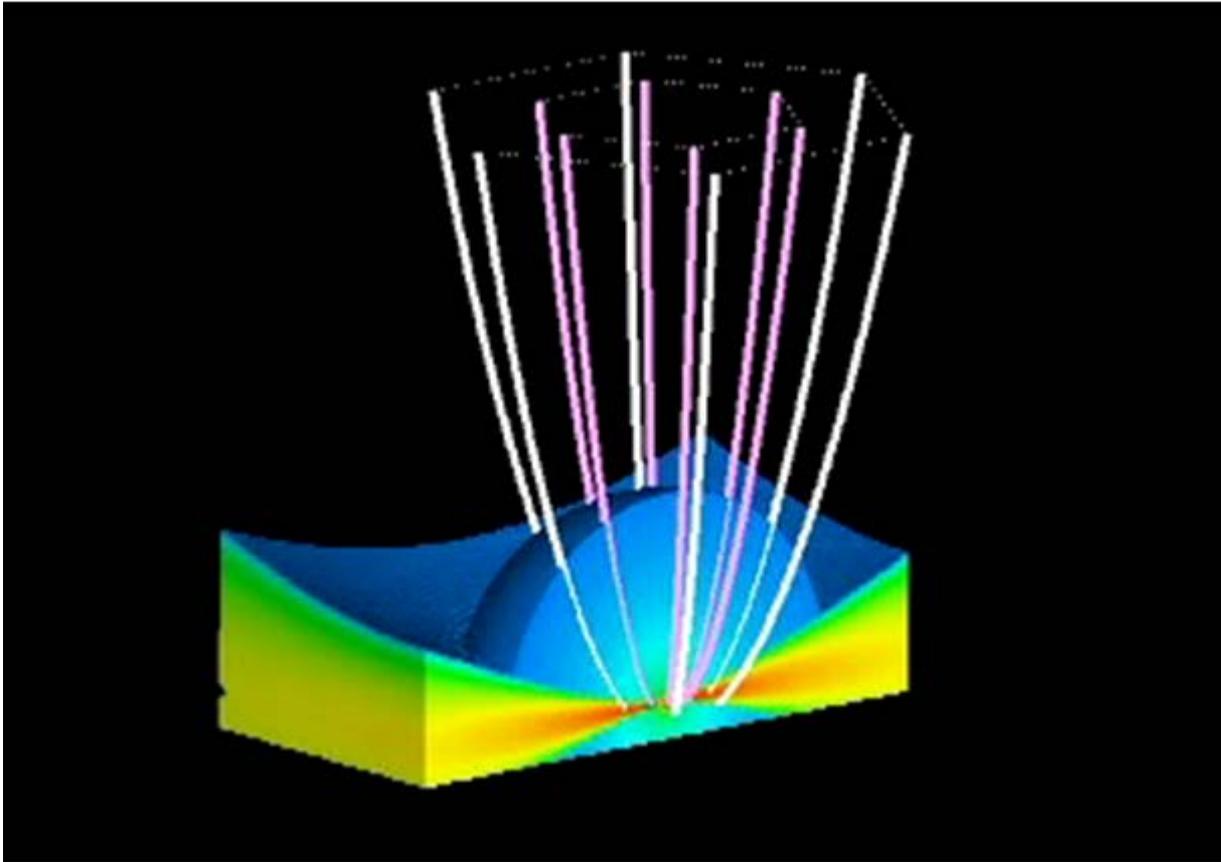


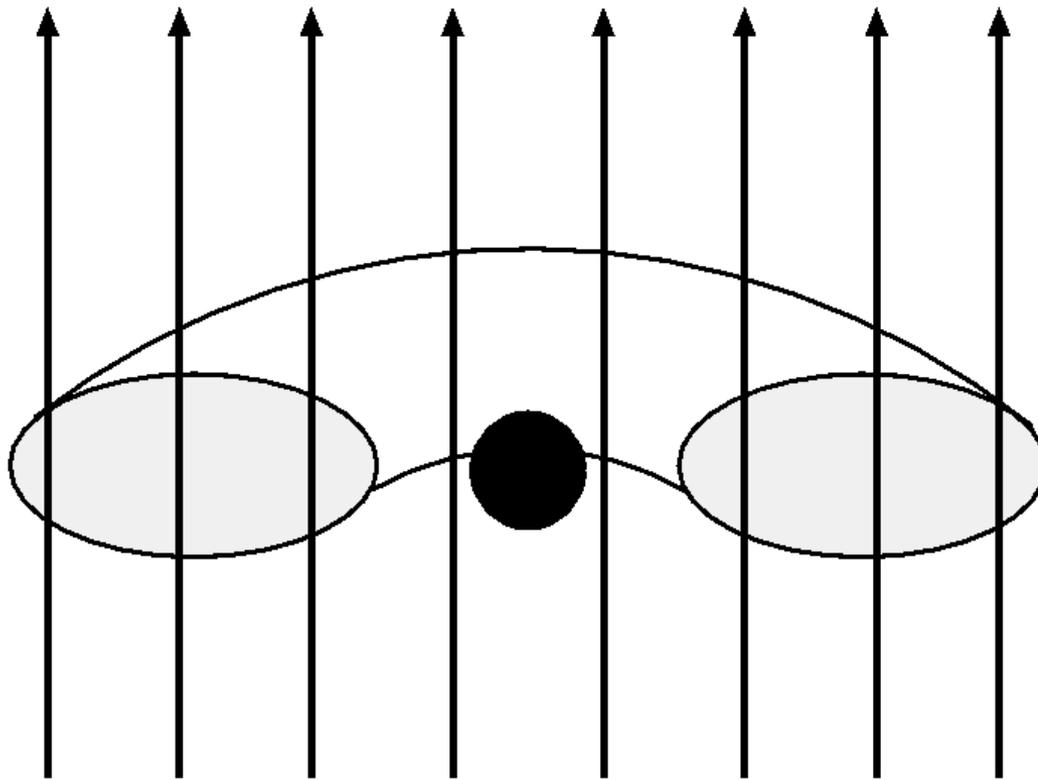
Fig. 1a-1c. See the caption on the next page.

# 密度分布と磁力線形状の変化



Kodoh et al. 2002

# 鉛直磁場に貫かれた回転トーラスの 磁気流体シミュレーション



# 1. Basic components of the model

- Rotating torus

- Angular momentum distribution  $L = L_0 r^a$
- Polytropic equation of state  $P = K \rho^{1+1/n}$
- Dynamical equilibrium

$$-\frac{GM}{(r^2 + z^2)^{1/2}} + \frac{1}{2(1-a)} L_0^2 r^{2a-2} + (n+1) \frac{P}{\rho} = \text{const.}$$

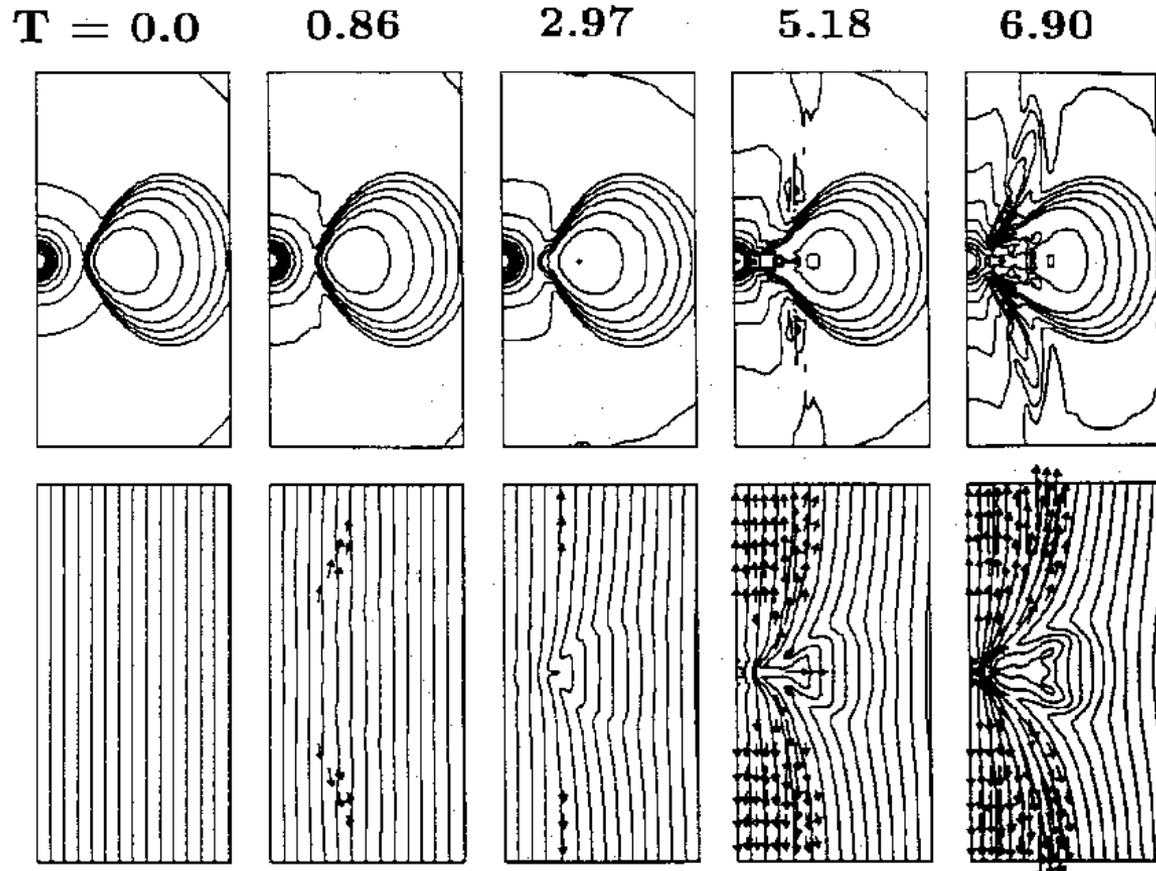
- Spherical, non-rotating isothermal halo

$$\rho = \rho_h \exp \left[ \alpha \left( \frac{r_0}{\sqrt{r^2 + z^2}} - 1 \right) \right],$$

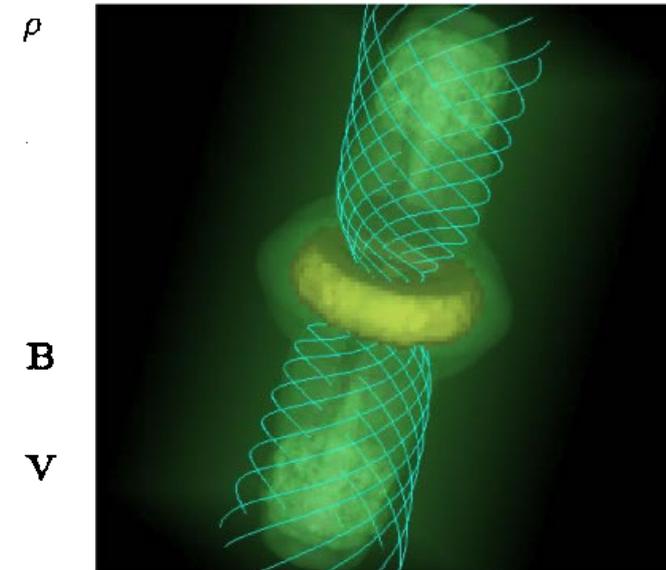
where  $\alpha = (GM/RT_{halo})/r_0$

- Uniform, vertical magnetic field at  $t = 0$ .

# シミュレーション結果

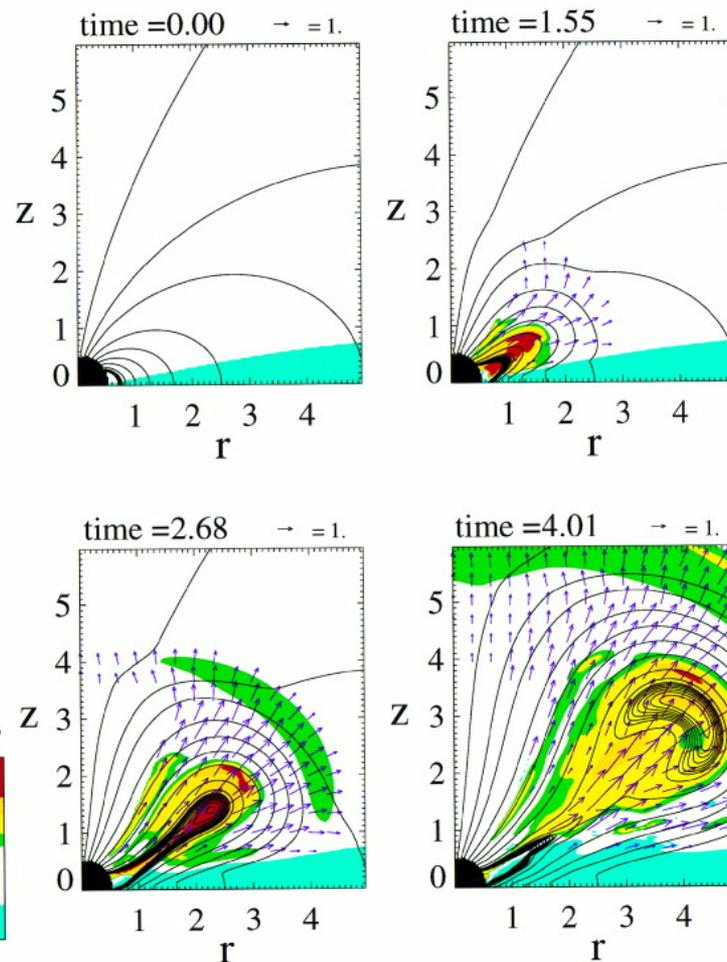
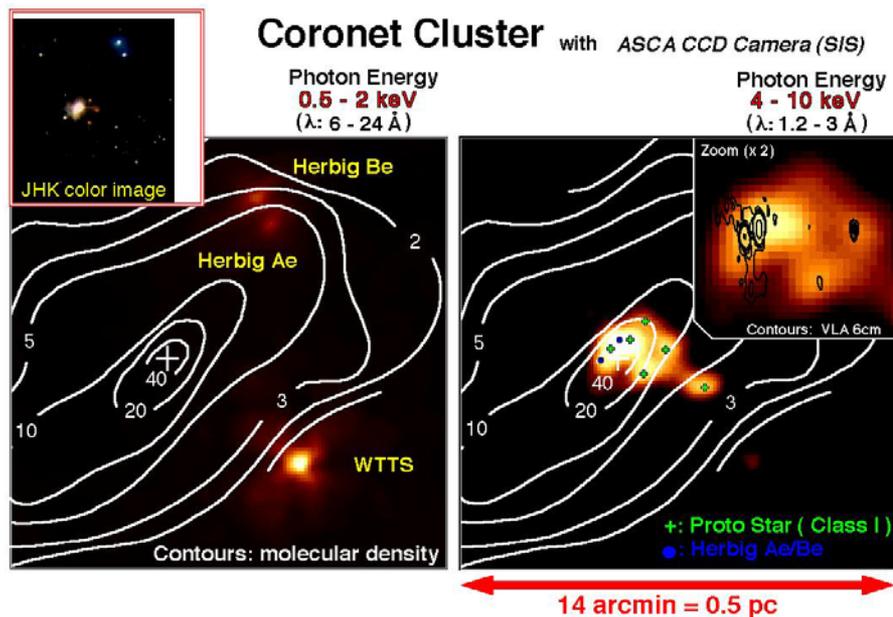


Matsumoto et al. 1996



Kuwabara et al. 2000  
(resistive MHD 計算)

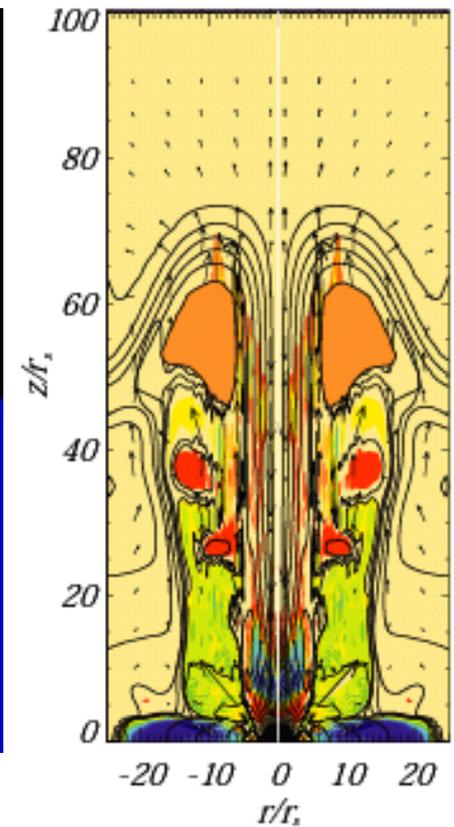
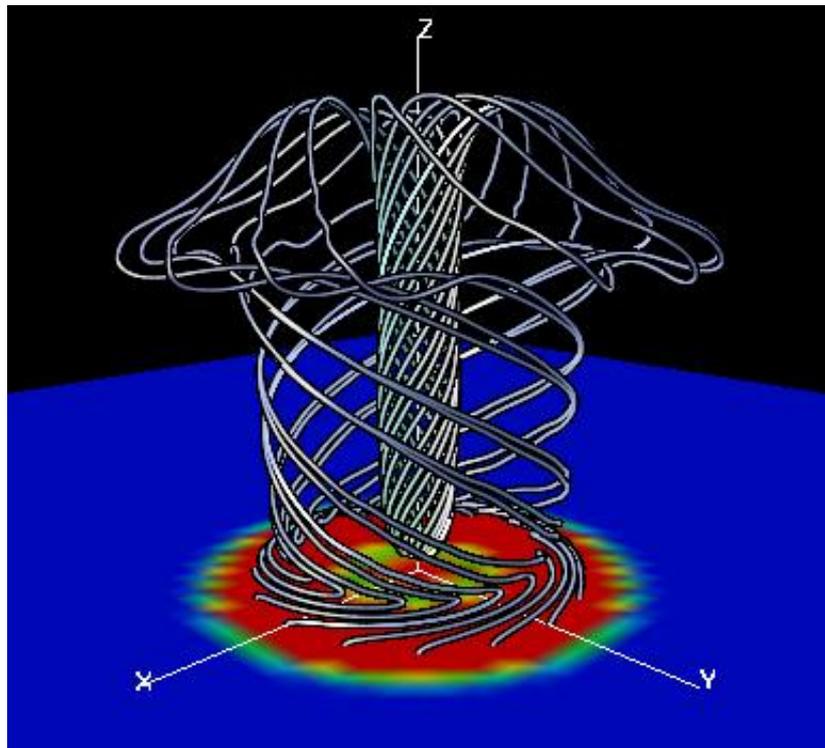
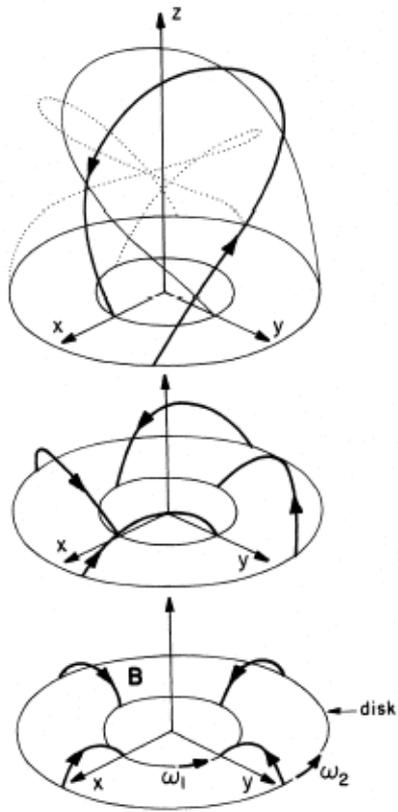
# 原始星フレアの磁気流体モデル



ASCA 衛星によって発見された星形成領域の硬X線フレア (Koyama et al. 1996)

磁気流体計算 (Hayashi et al. 1996)

# 磁気タワーと磁気タワー・ジェット形成

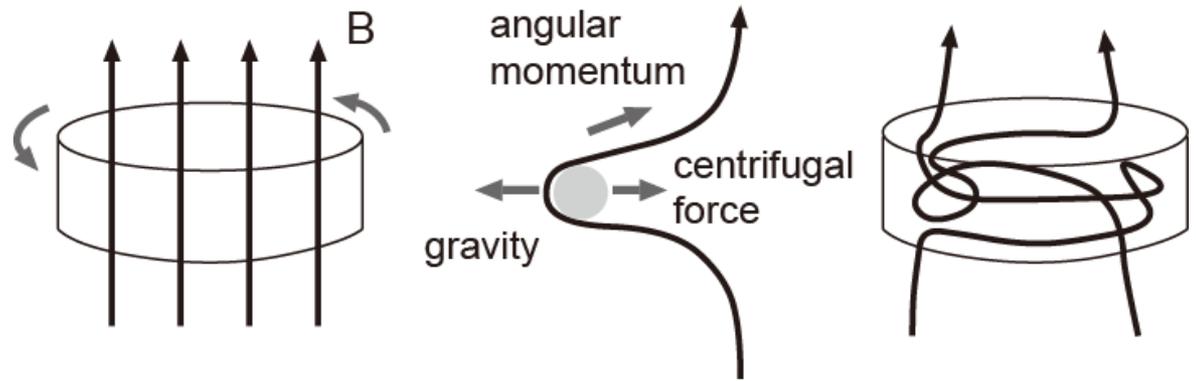
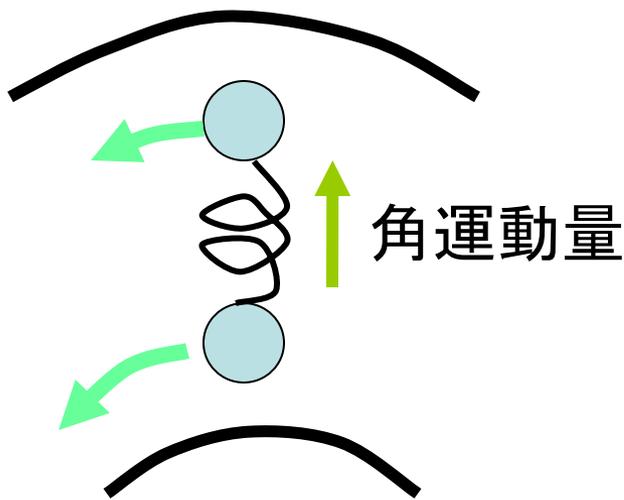


Lovelace et al.  
1995

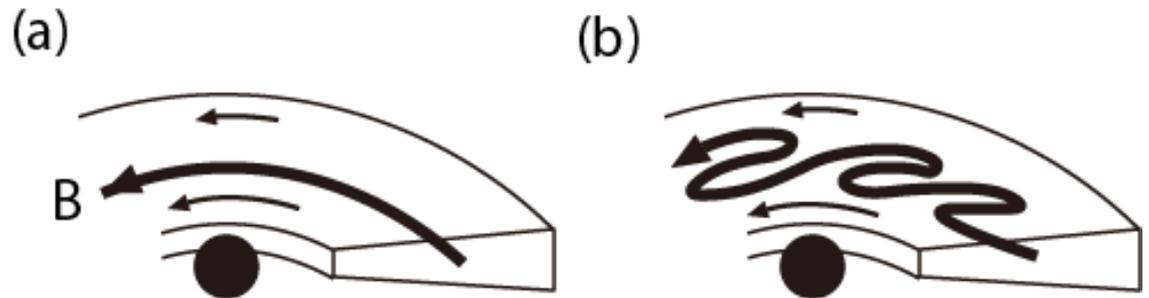
Kato, Hayashi, Matsumoto 2004

# 磁気回転不安定性の3次元磁気 流体シミュレーション

# 差動回転円盤における 磁気回転不安定性 (MRI)

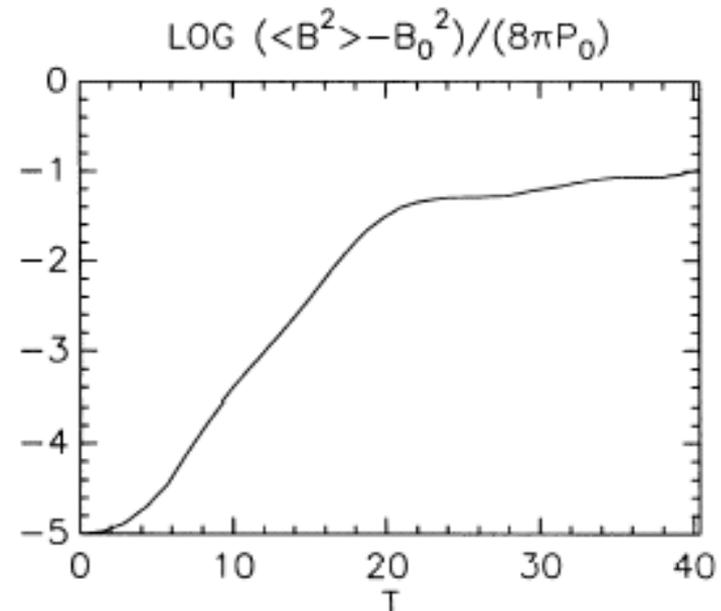
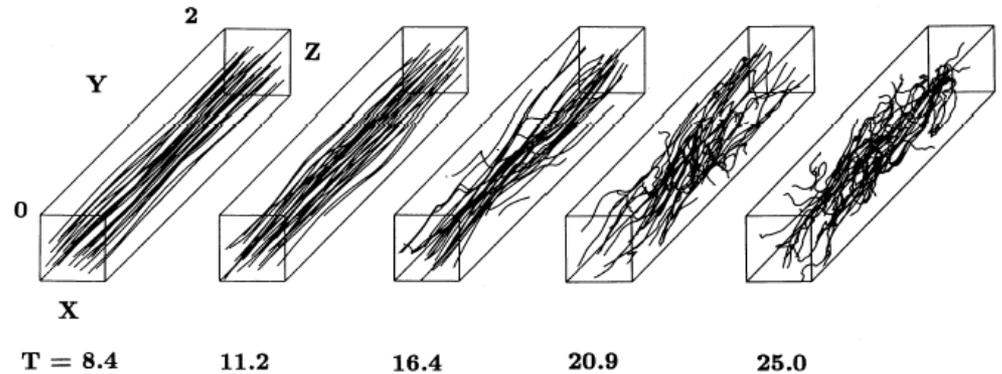
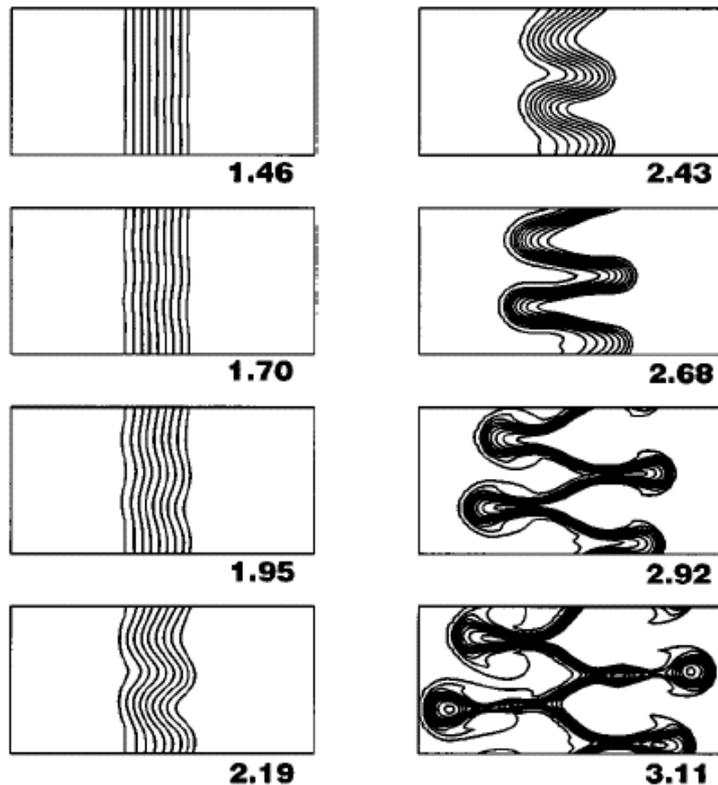


Balbus and Hawley (1991), Velikhov (1959)



方位角磁場から動径磁場が生成される

# 局所磁気流体シミュレーション

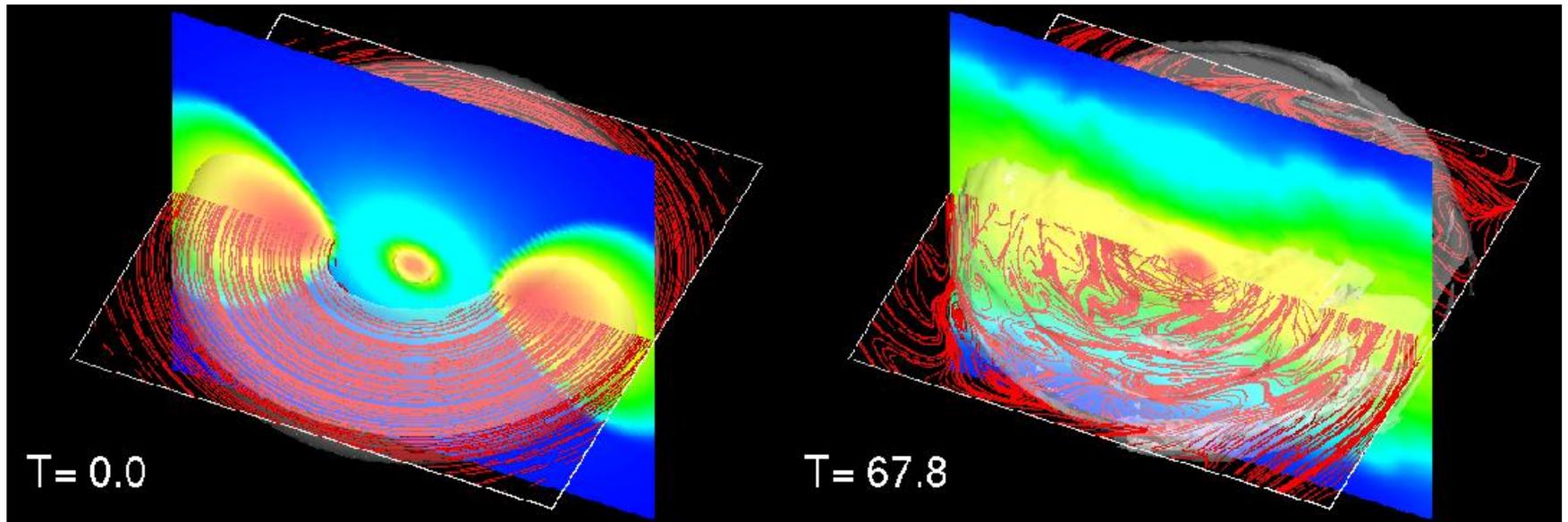


Magnetic field lines

Hawley and Bulbus 1991, 1998

Matsumoto and Tajima 1995

# 回転トーラスの大局的3次元 MHDシミュレーション



Initial Condition

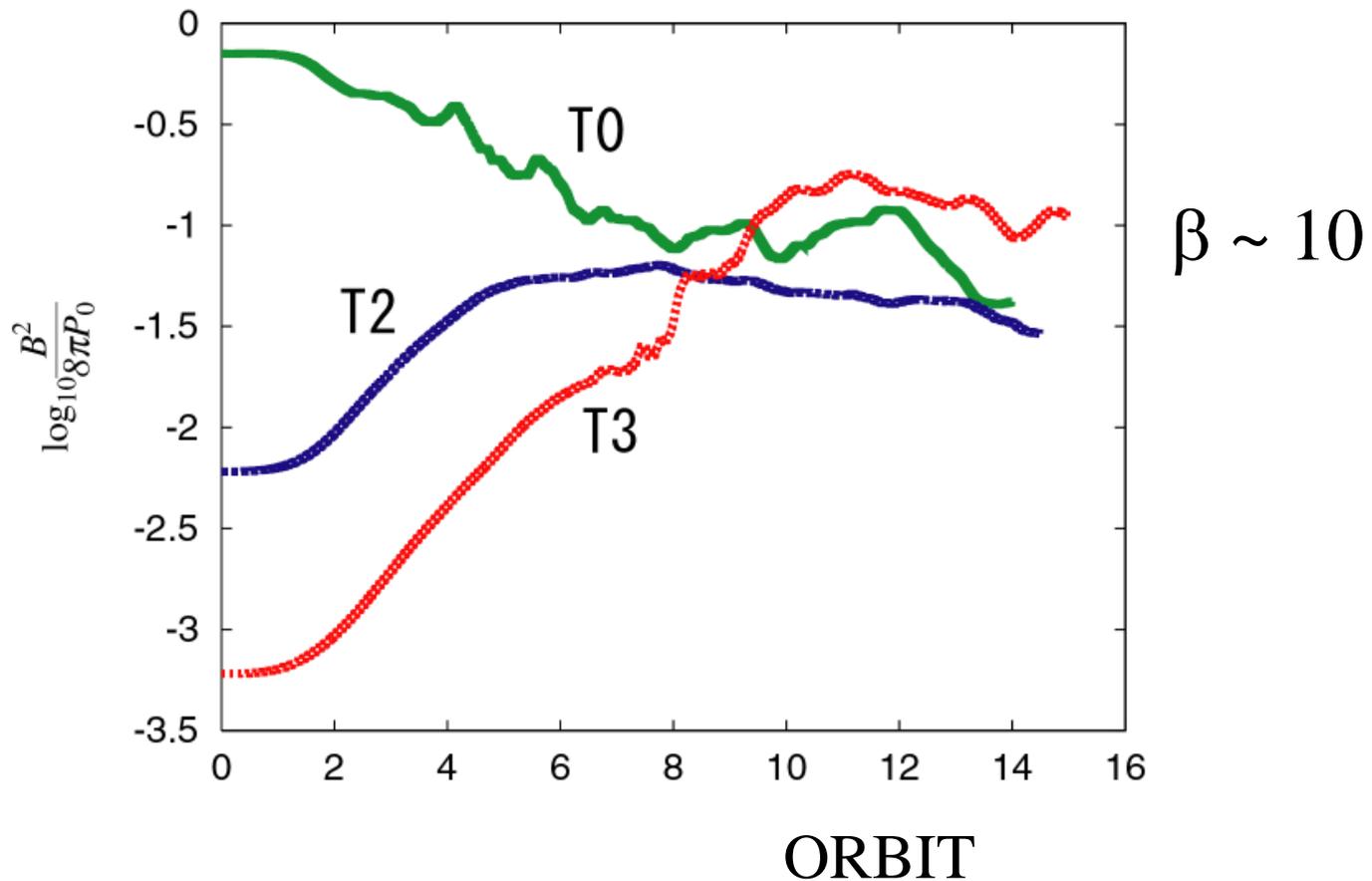
$$\beta = P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}}=100$$

After 10 Rotation Period

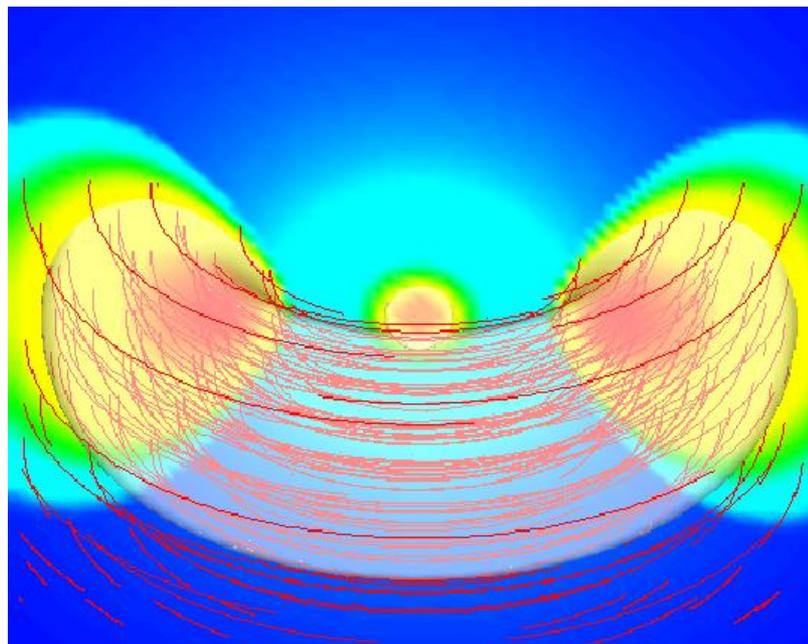
200\*64\*240 grid points

Matsumoto 1999 (NAP98 Proceedings)

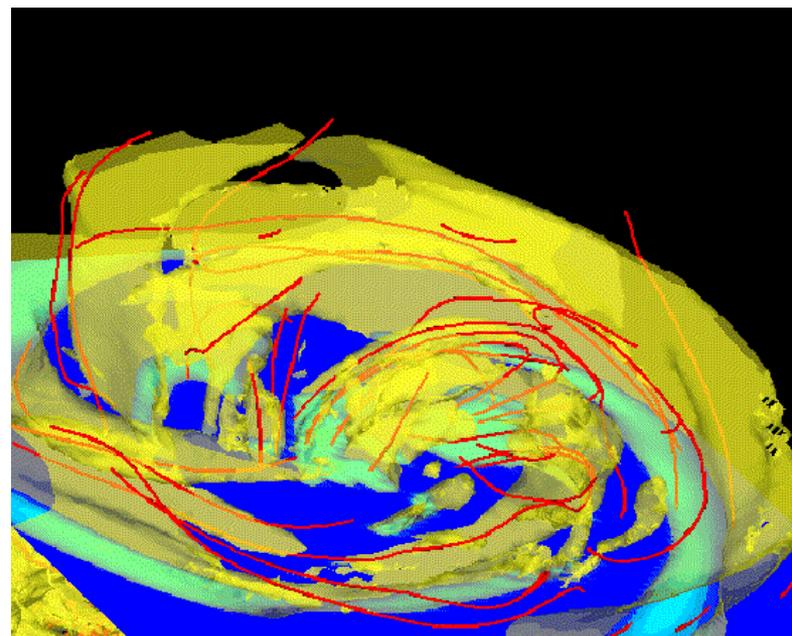
# Amplification of Magnetic Energy



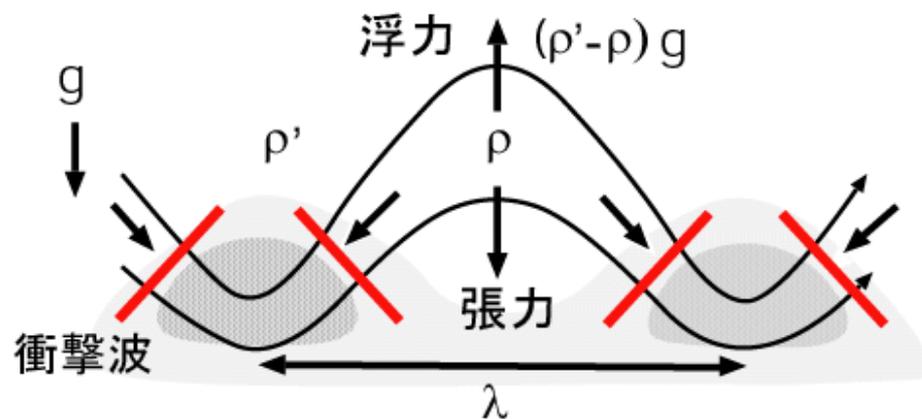
# 浮上磁気ループの形成



初期条件

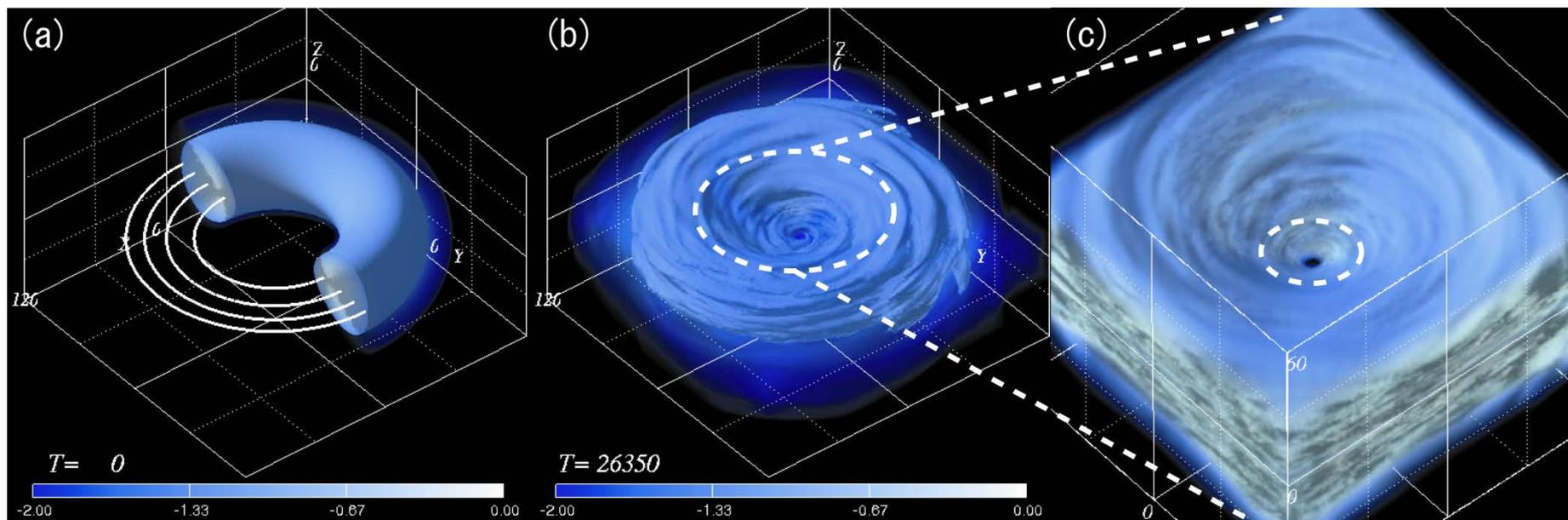


Machida et al. 2000



Parker  
Instability

# ブラックホール降着流の大局的3次元磁気 流体シミュレーション



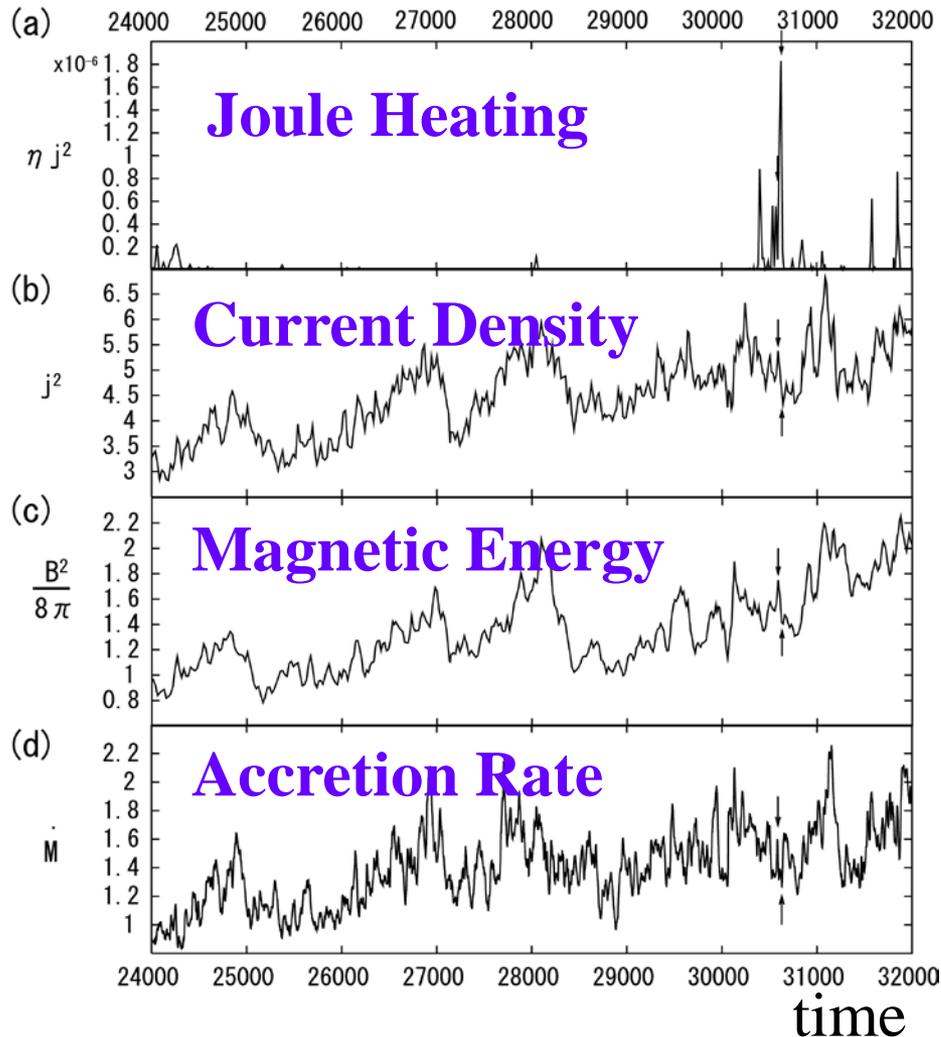
Initial state

$t=26350$

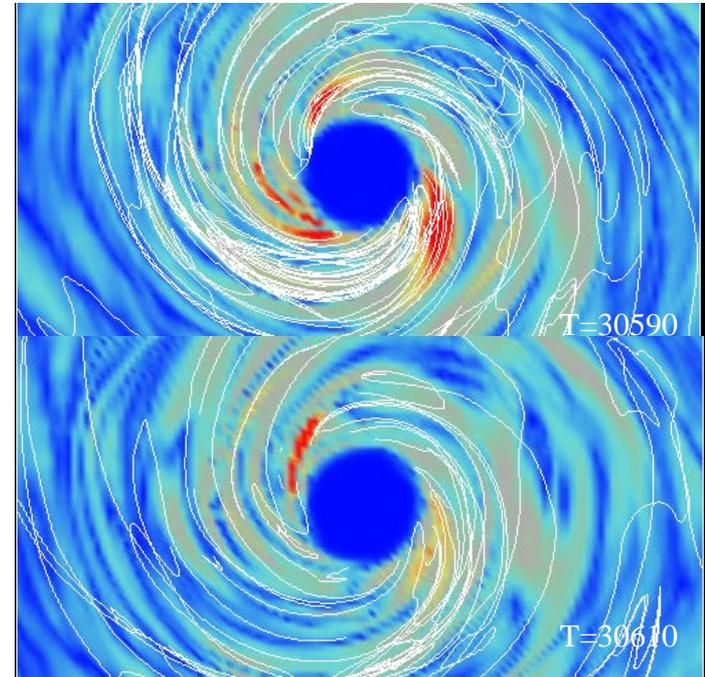
unit time  $t_0=rg/c$

Machida and Matsumoto 2003

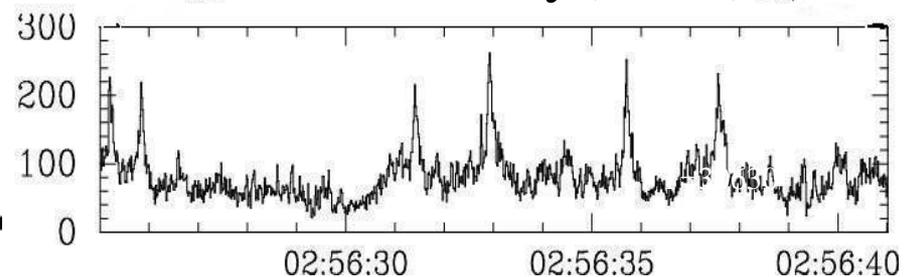
# 降着円盤における磁気エネルギー解放



Machida et al. 2003

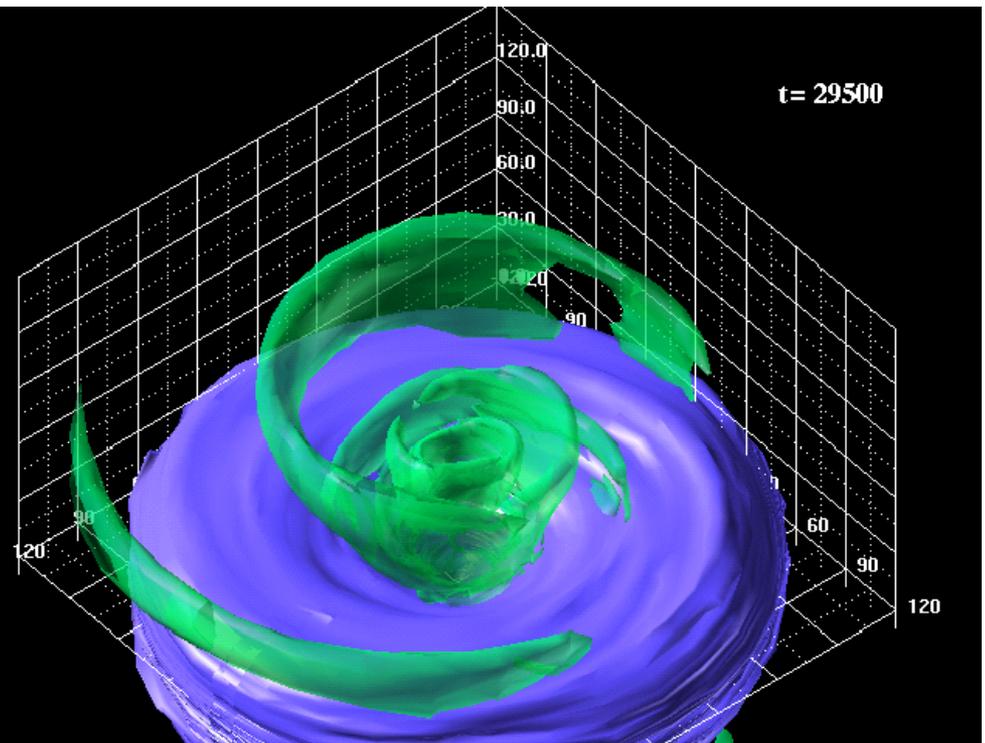
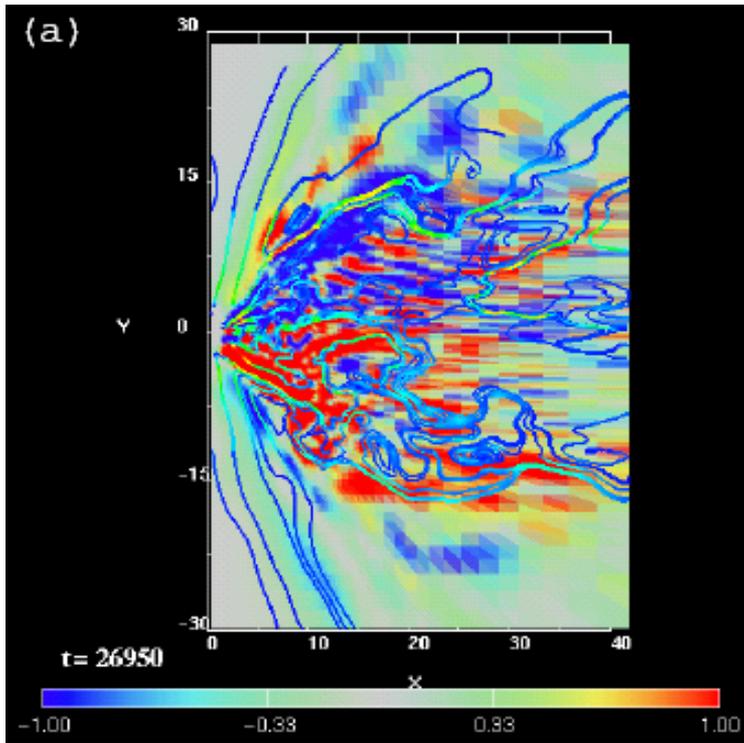


Current density(color)



Time variabilities of Cyg X-1  
(Negoro 1995)

# アウトフロー形成



方位角磁場(カラー)とポロイダル面に投影した磁力線

$v_z = 0.05c$ の等値面

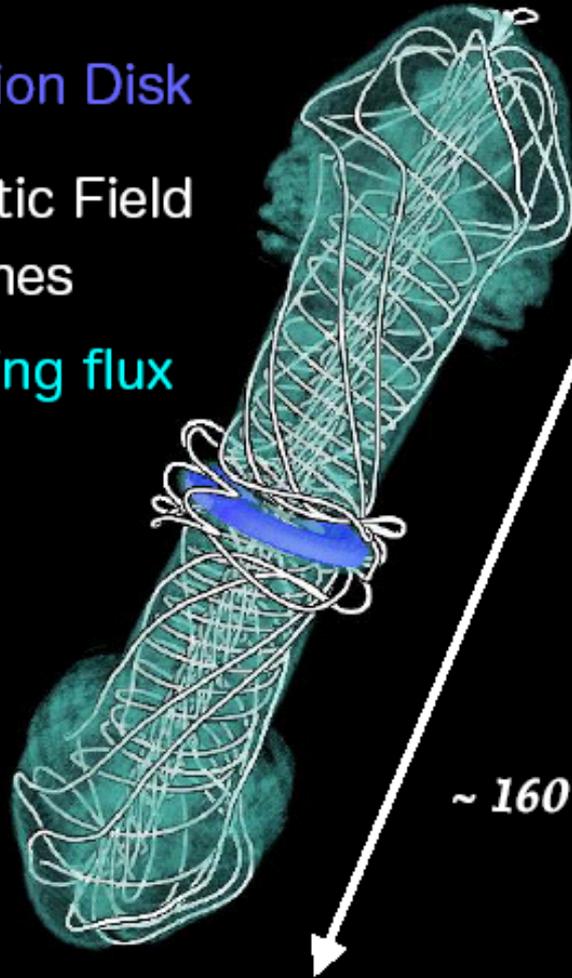
Machida and Matsumoto 2008

# FORMATION OF MAGNETIC-TOWER JETS

Accretion Disk

Magnetic Field Lines

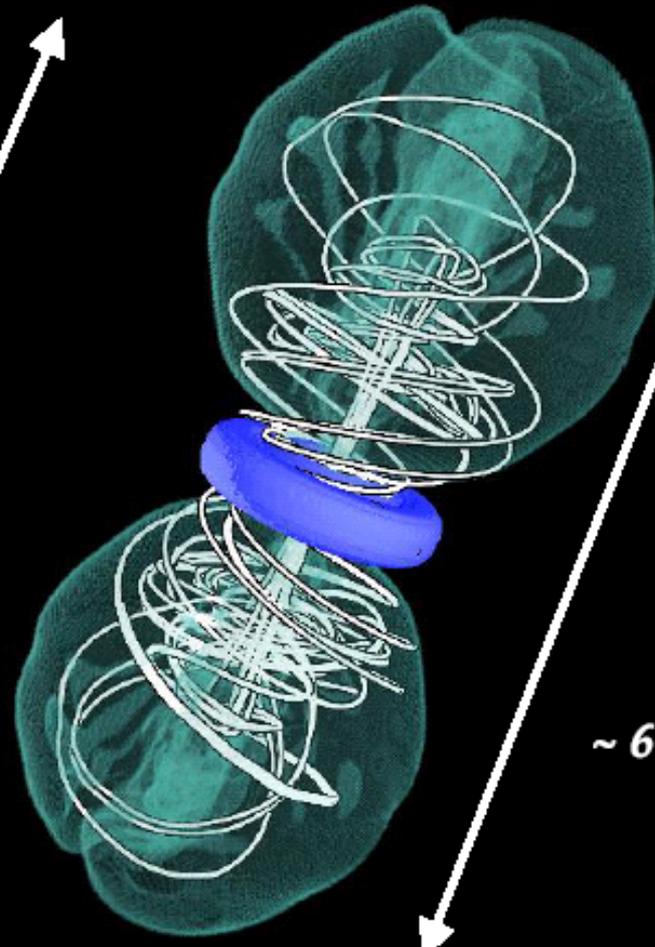
Poynting flux



$\sim 160$  rs

**Neutron Star + Accretion Disk**

Kato, Hayashi, Matusmoto 2004 ApJ, 600, 338

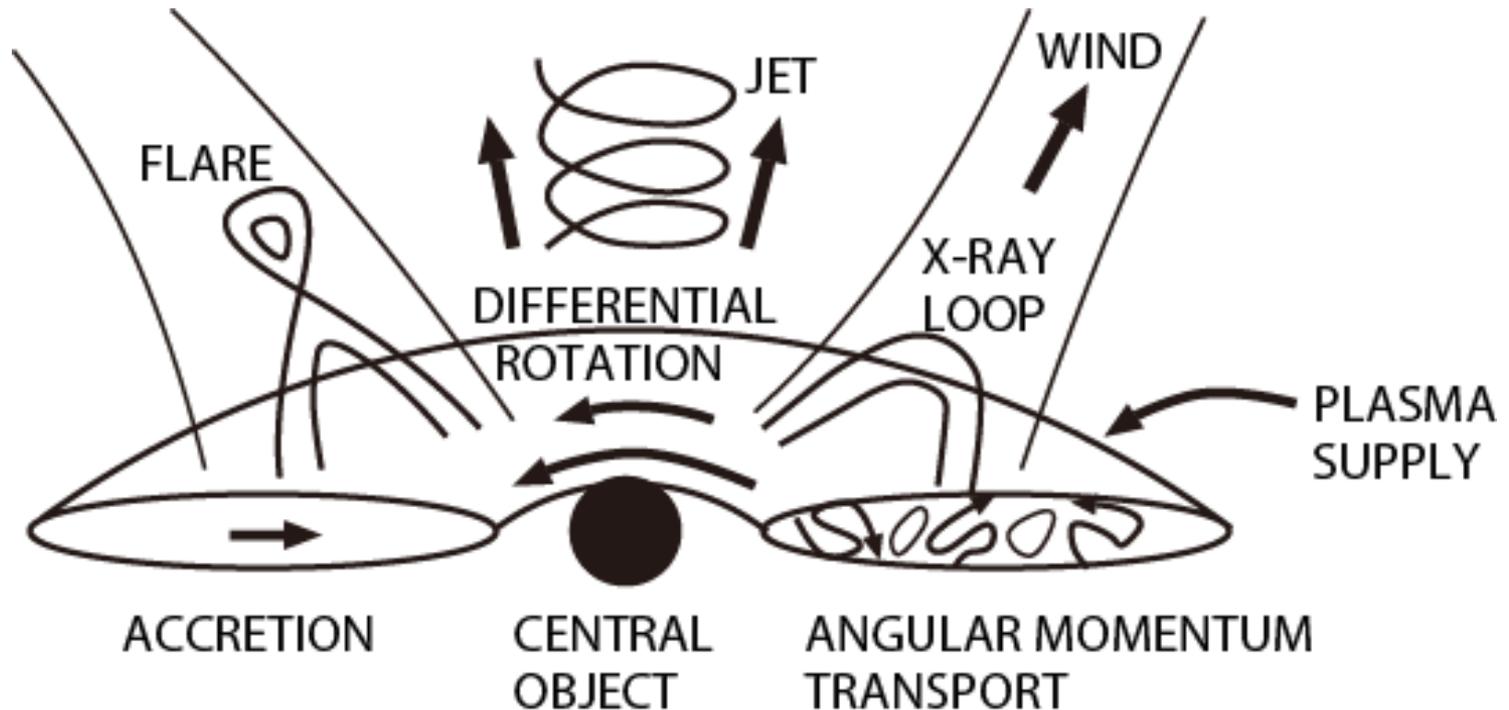


$\sim 600$  rs

**Black Hole + Accretion Disk**

Kato, Mineshige, Shibata 2004 ApJ, 605, 307

# 磁気流体降着円盤とアウトフロー

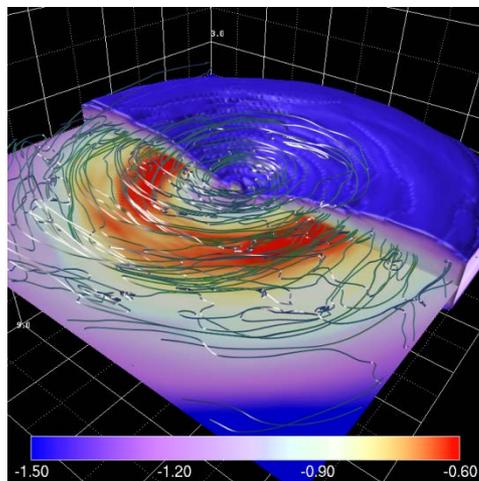


- ・ 局所的な乱流生成
- ・ グローバルな平均場の形成、磁束浮上
- ・ 電流シート形成、局所的なエネルギー解放
- ・ グローバルな磁場形状変化、アウトフロー形成

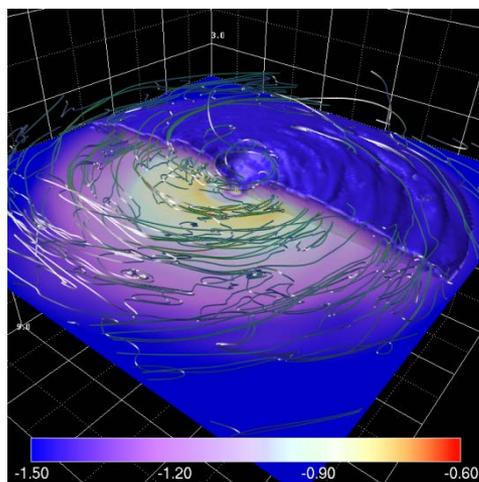
# 円盤ダイナモシミュレーション

# 銀河ガス円盤の磁気流体シミュレーション

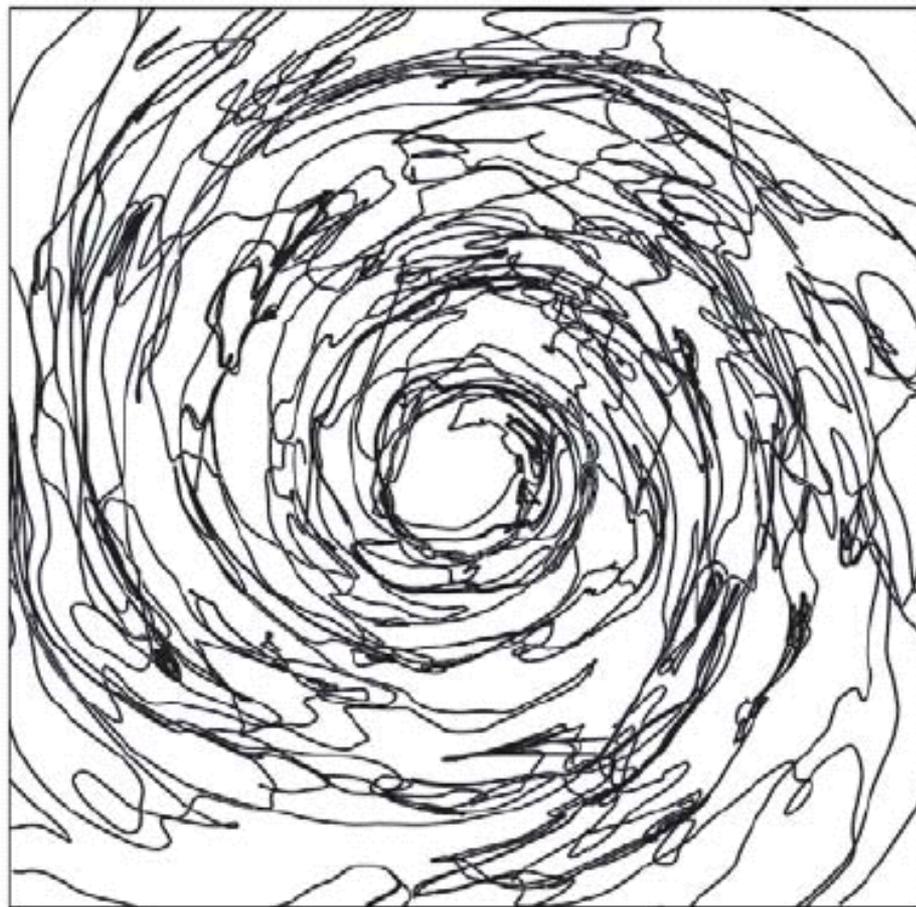
2Gyr



3.5Gyr

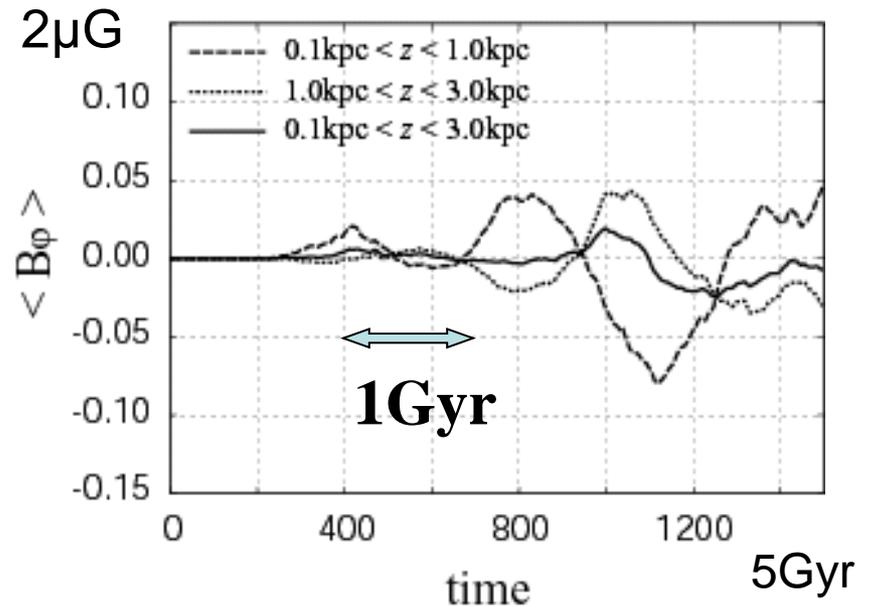
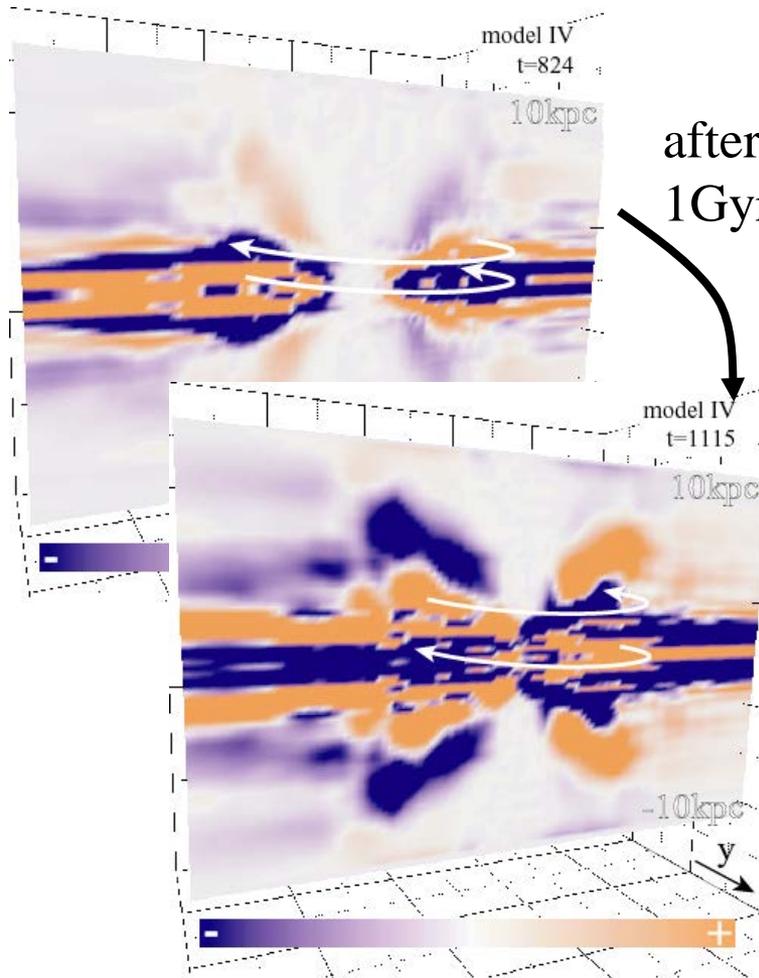


$\rho + B$



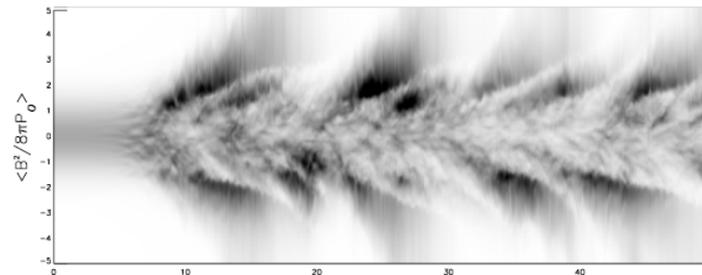
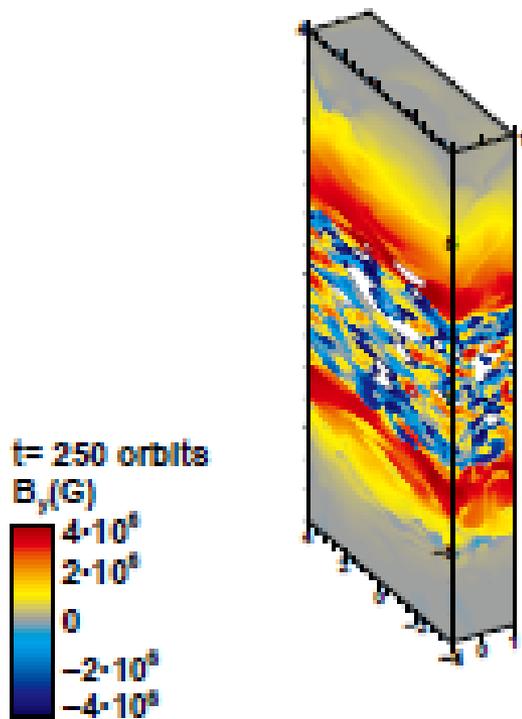
$t = 3.8\text{Gyr}$

# 方位角方向の平均磁場の反転

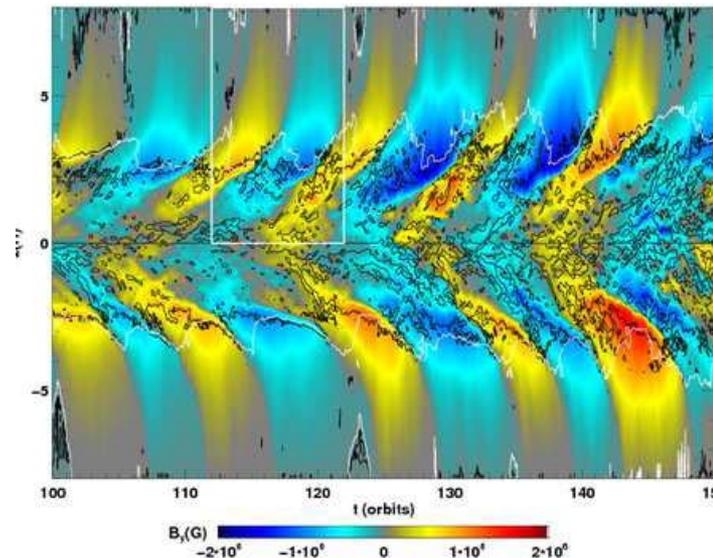


Time variation of mean azimuthal magnetic field at  $5\text{kpc} < r < 6\text{kpc}$

# 円盤ダイナモの局所3次元 磁気流体シミュレーション



Miller and  
Stone 2000

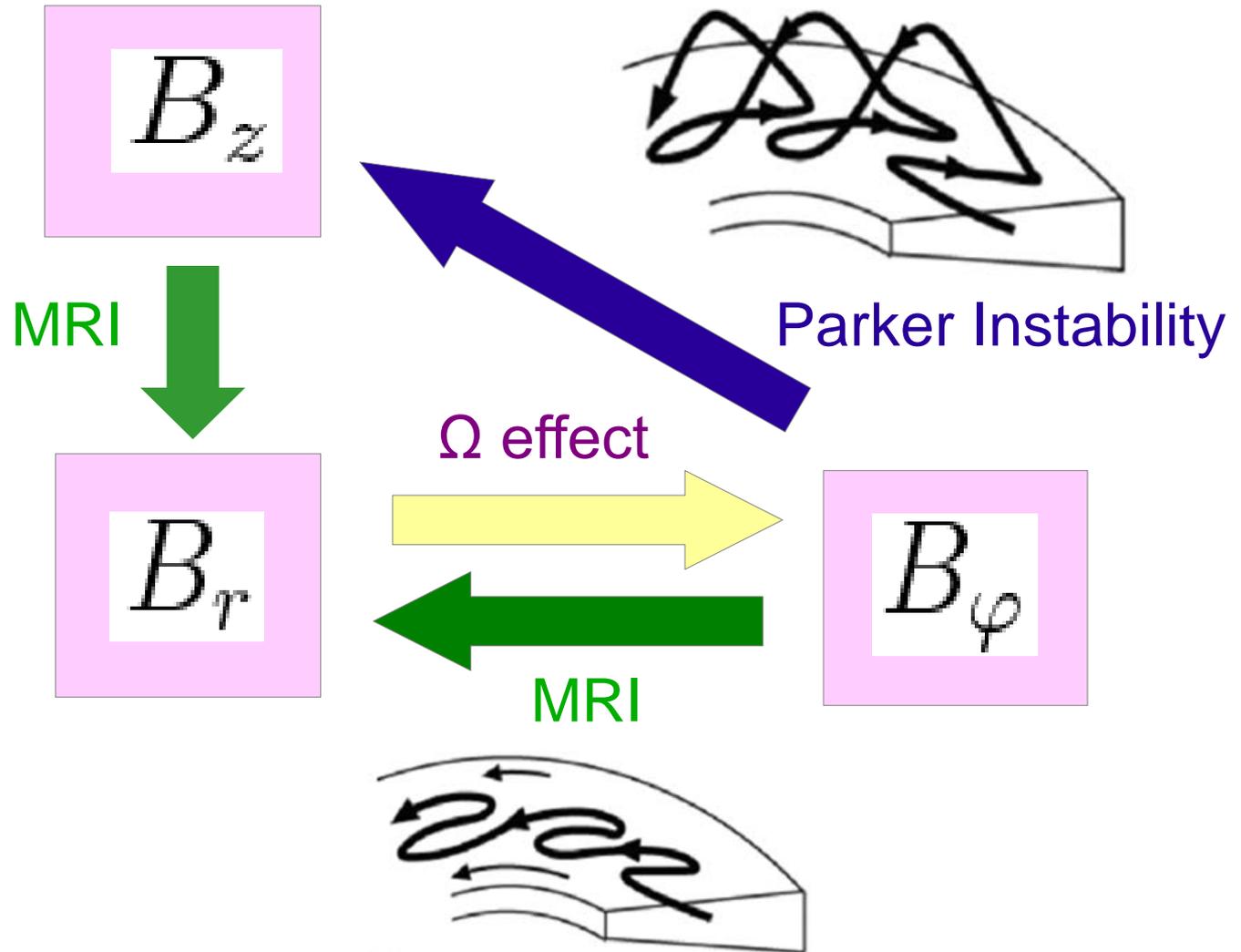
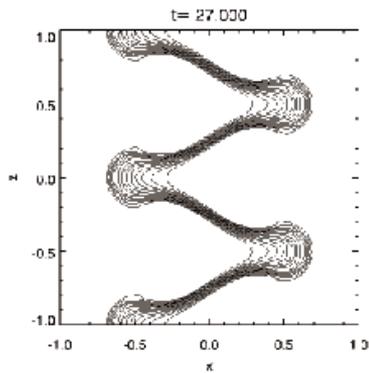


white :  $\beta = 1$

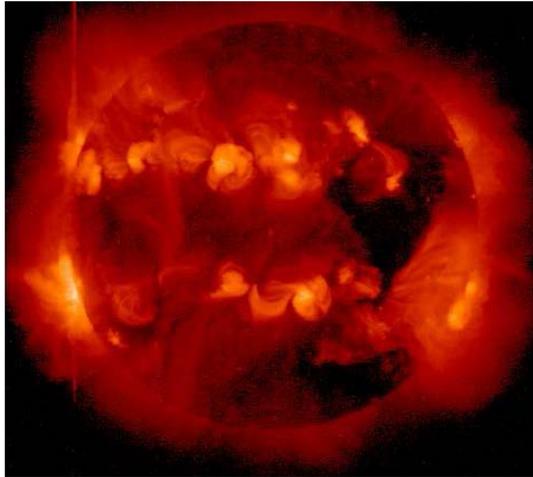
Shi et al.  
2010

Time Variabilities of Azimuthal Field

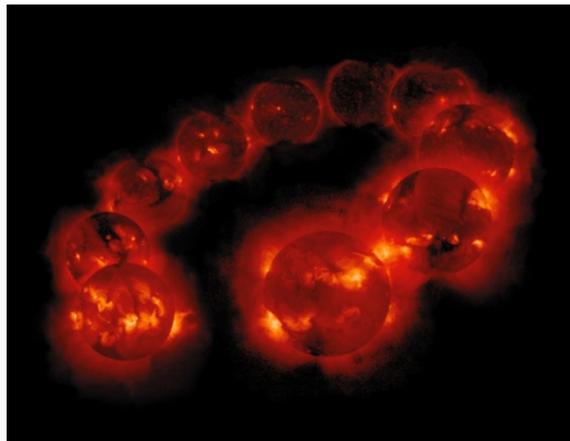
# MRI-Parker Dynamo



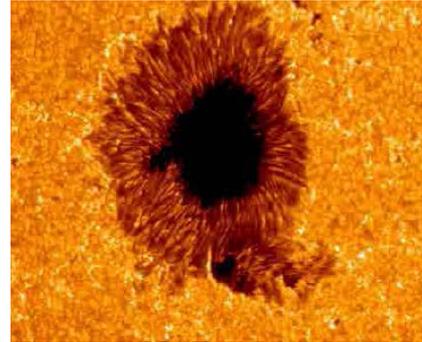
# 太陽ダイナモとの類似性



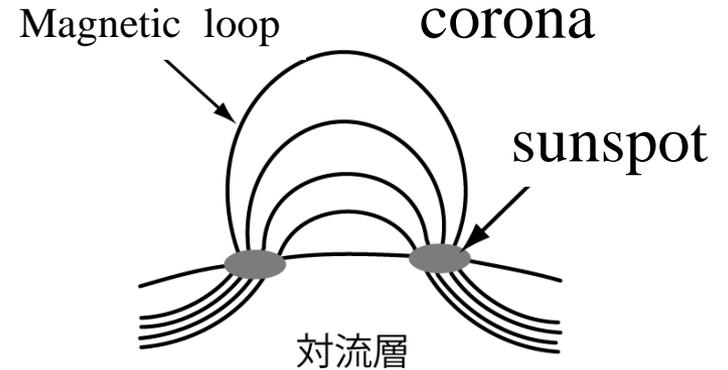
Soft X-ray Image of the Sun



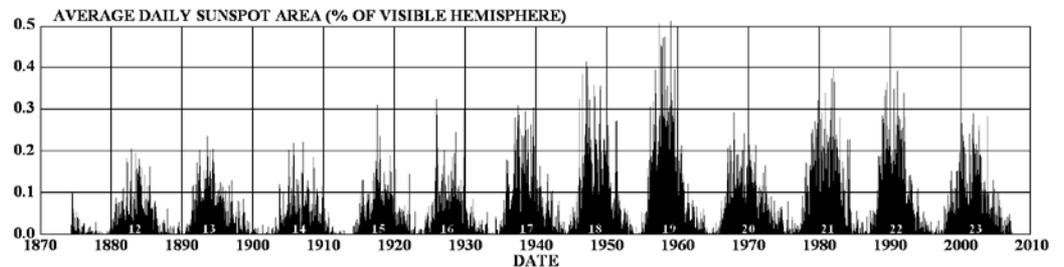
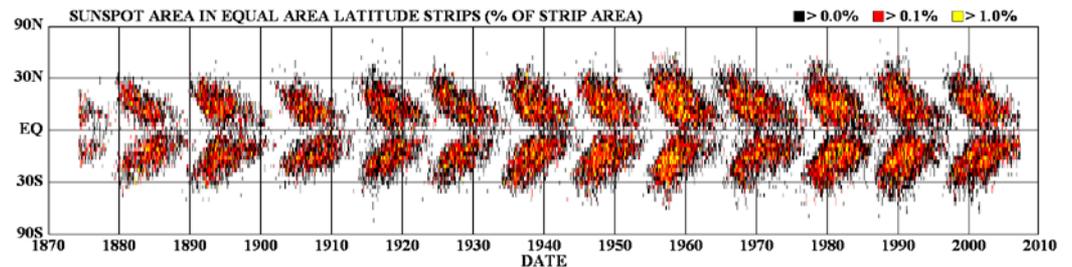
Solar cycle observed in X-ray



Sunspot (HINODE)



Formation of Sunspots

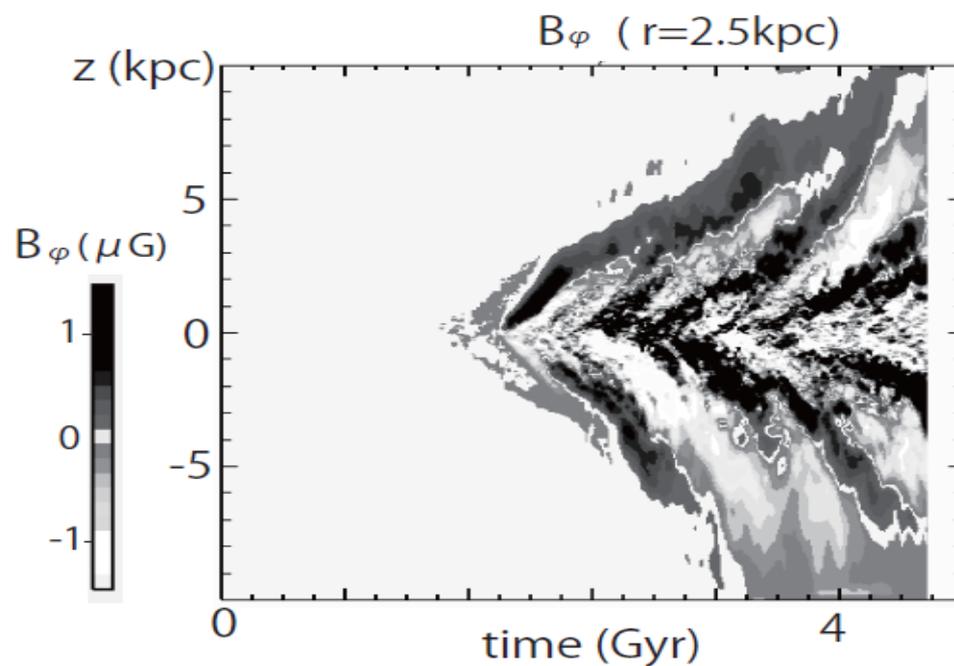
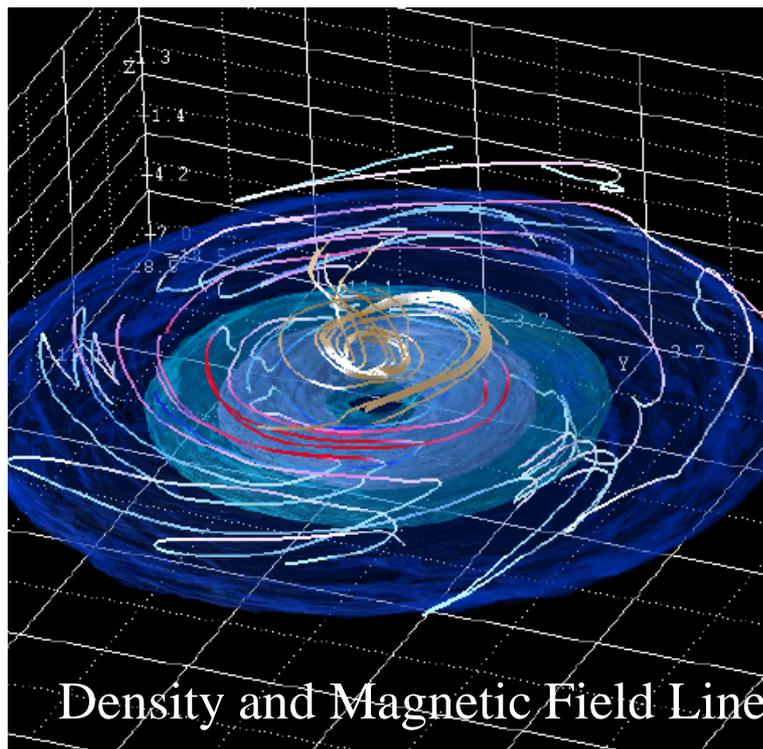


<http://solarscience.msfc.nasa.gov/>

NASA/MSFC/NSSTC/HATHAWAY 2007/05

Butterfly diagram (NASA)

# 赤道面对称性を仮定しない 大局的3次元磁気流体シミュレーション



$(N_r, N_\phi, N_z) = (250, 128, 640)$  grids

バタフライダイヤグラム

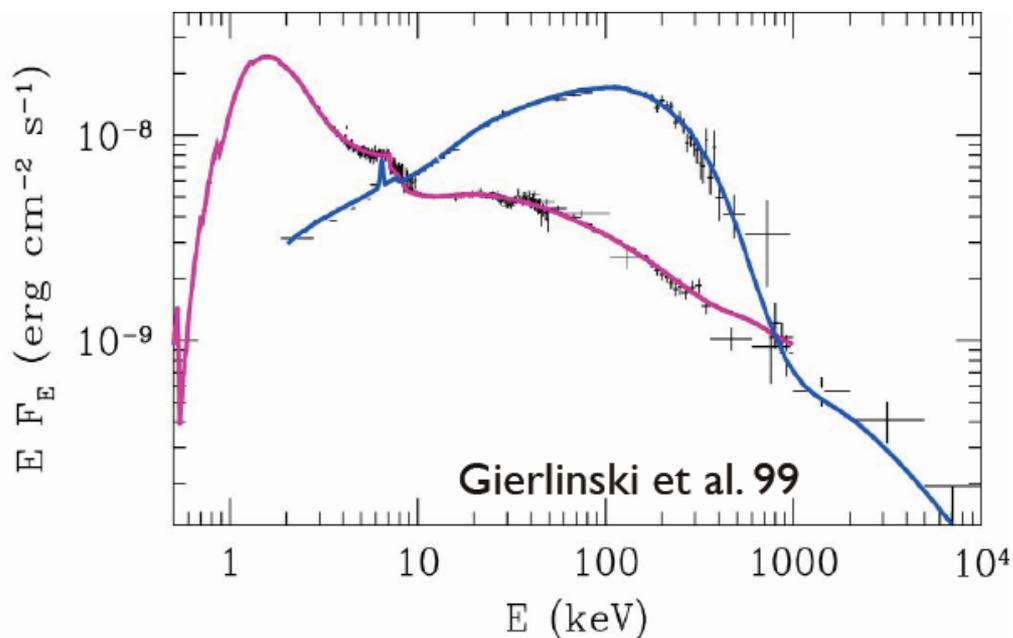
Machida et al. 2013

# ブラックホール降着円盤の 状態遷移シミュレーション

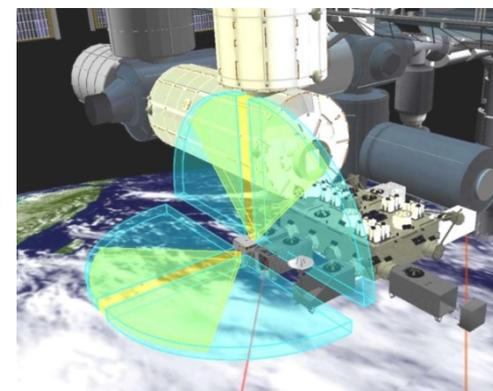
# ブラックホール候補天体の状態遷移

Soft state

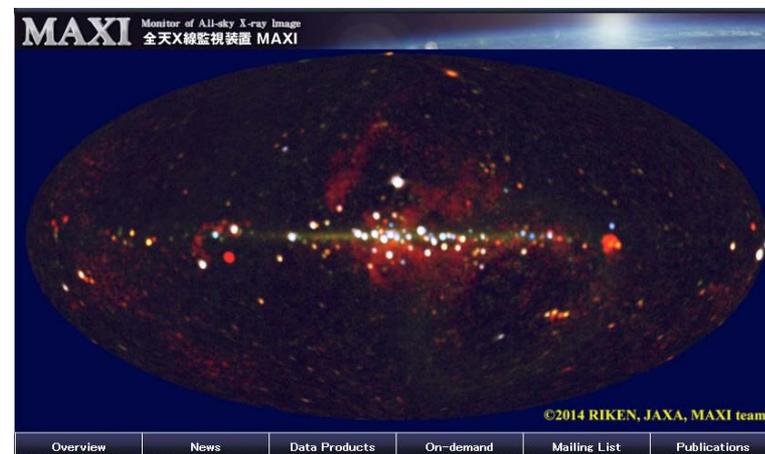
Hard state



Two Spectral States of a Black Hole Candidate Cyg X-1

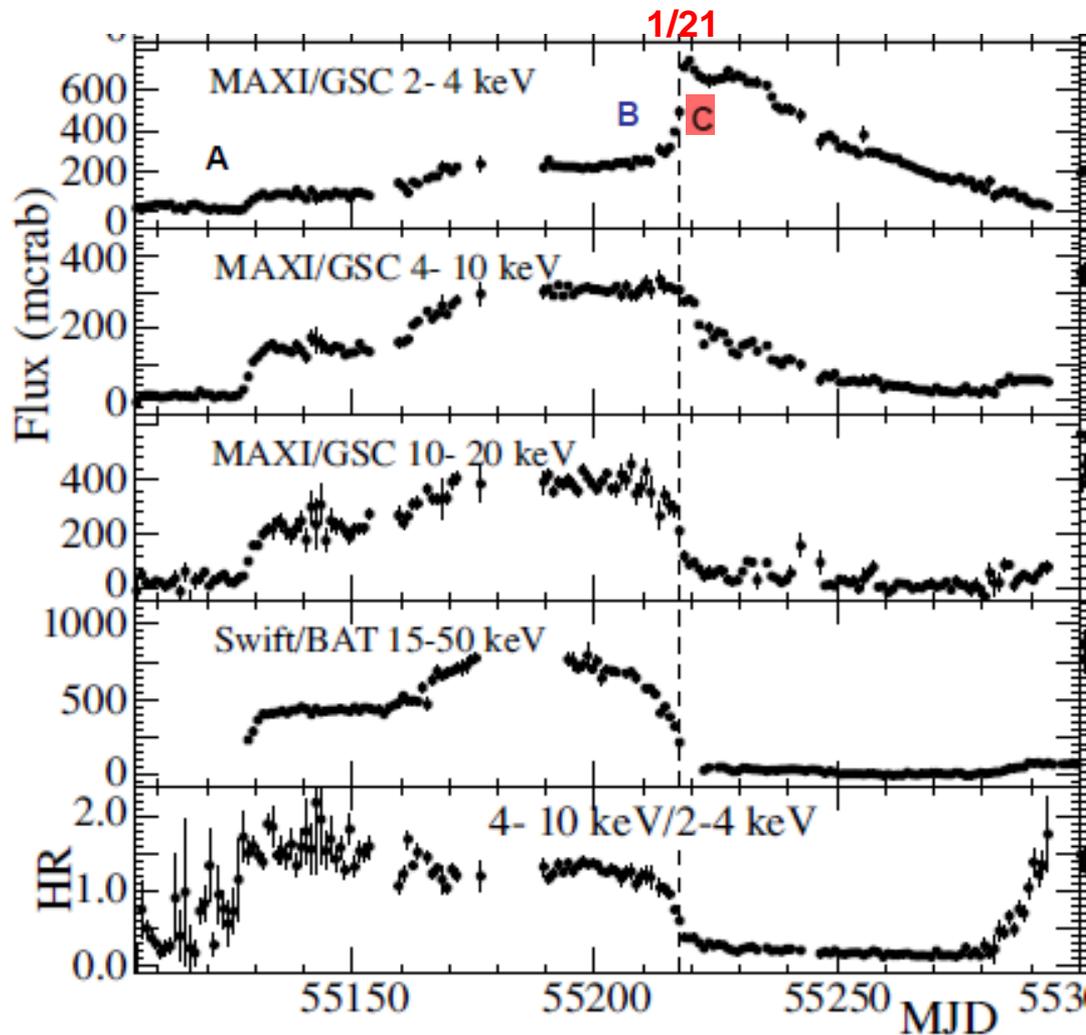


MAXI aboard ISS (2009-)

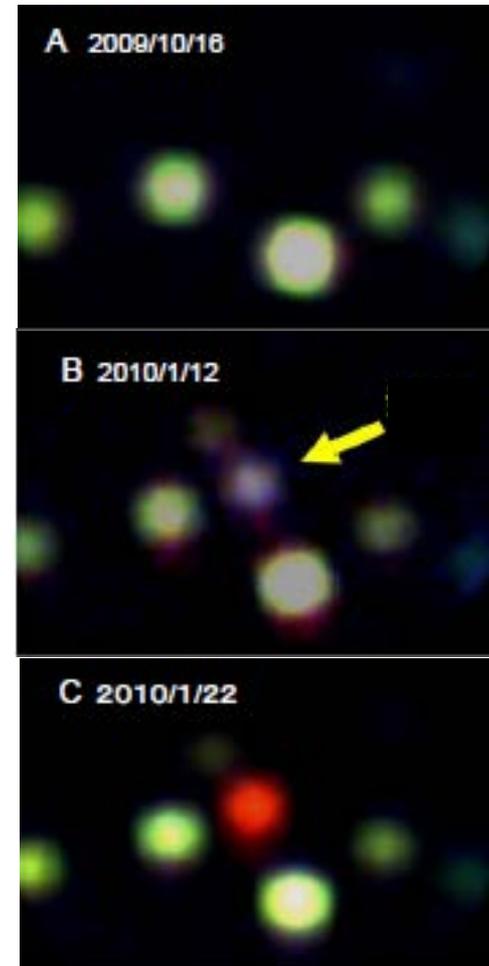


MAXI X-ray sky

# MAXIで観測したブラックホール新星 XTE J1752-223



Nakahira et al. 2010



MAXI Science News #17

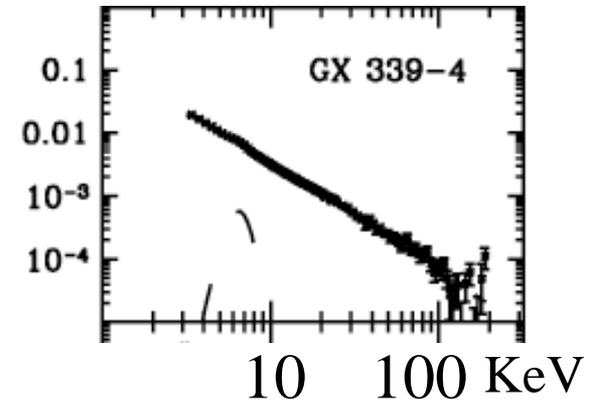
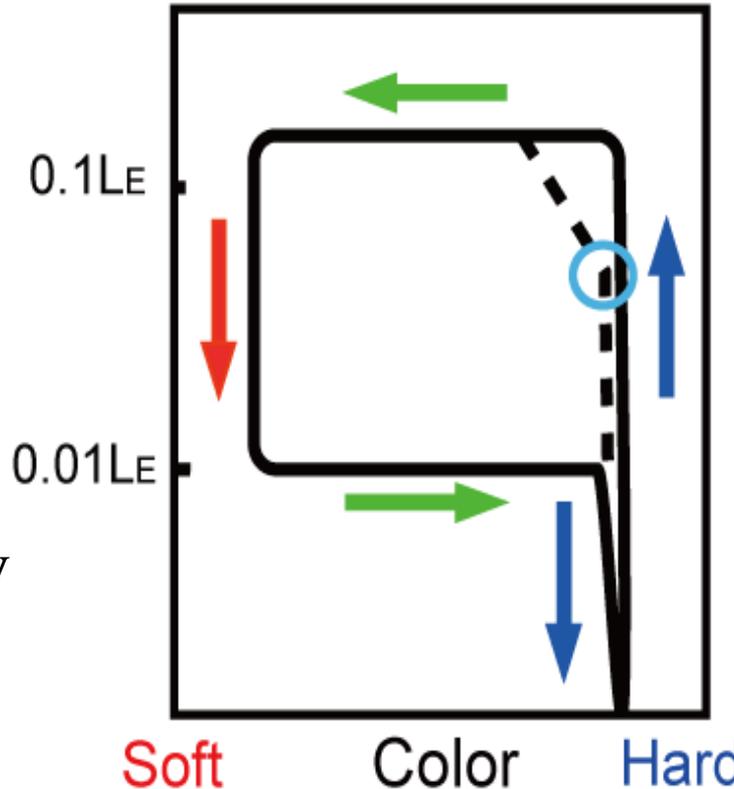
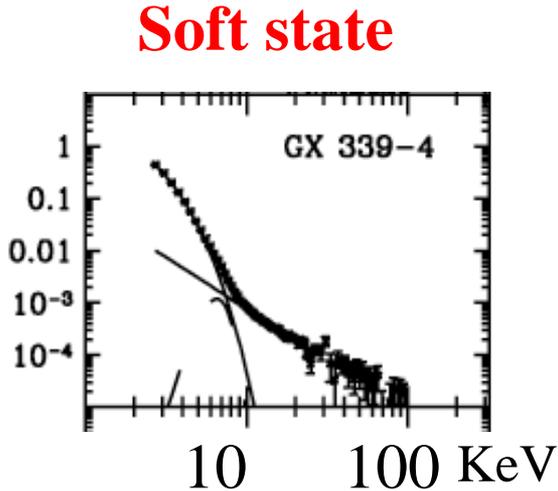
MAXIで観測されたブラックホール新星XTE J1752-223の進化

# Evolution of Outbursts in Hardness-Intensity Diagram

Luminosity

McClintock and  
Remillard 2004

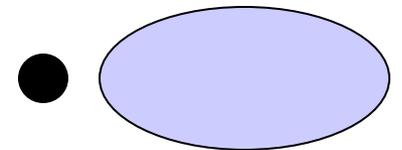
**Hard state**



Optically thick  
cold disk

Hard Color (8.6–18.0/5.0–8.6 keV)

○ XTE J1752-223

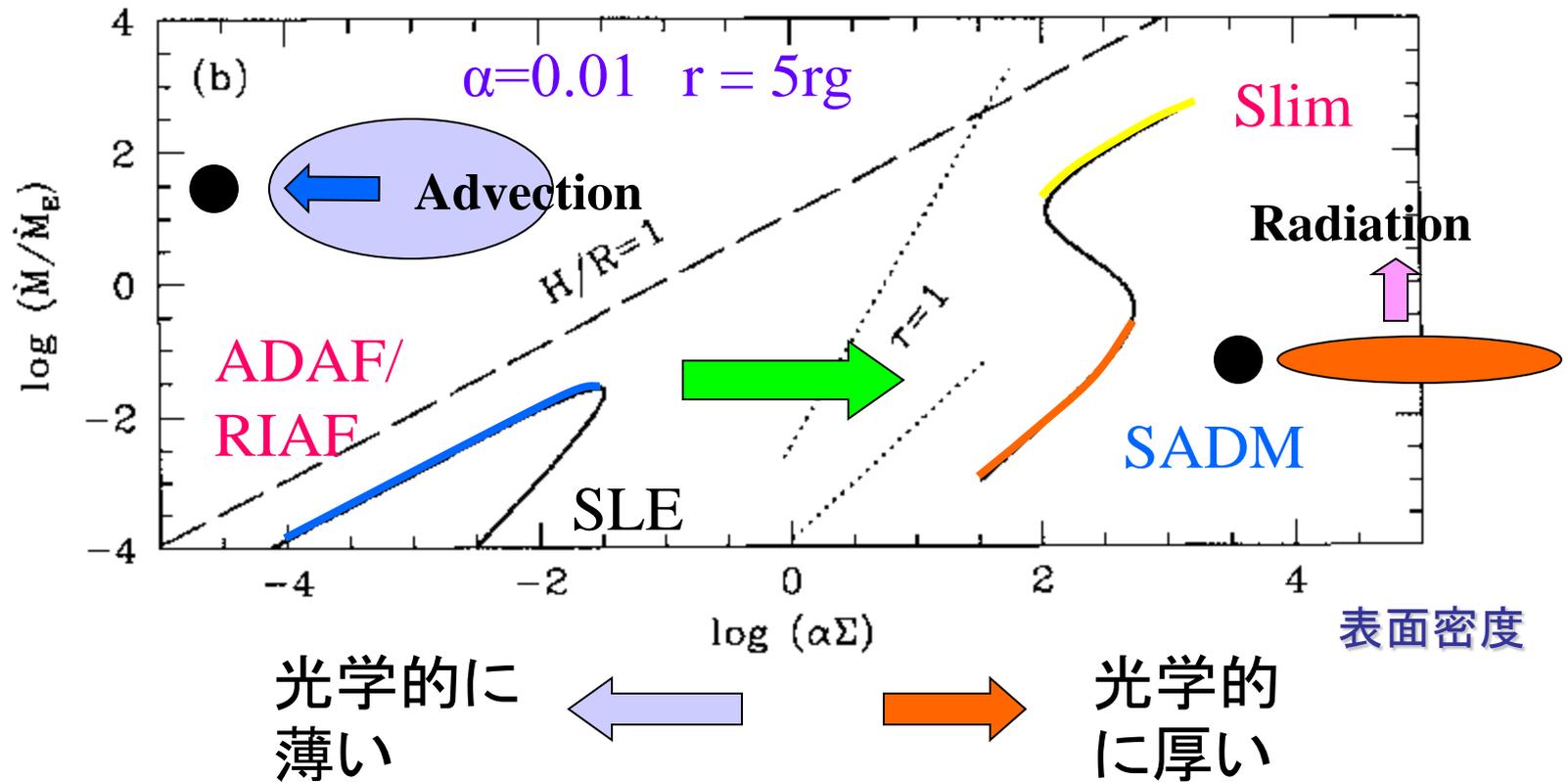


Optically thin  
hot disk

# 状態遷移の理論モデル

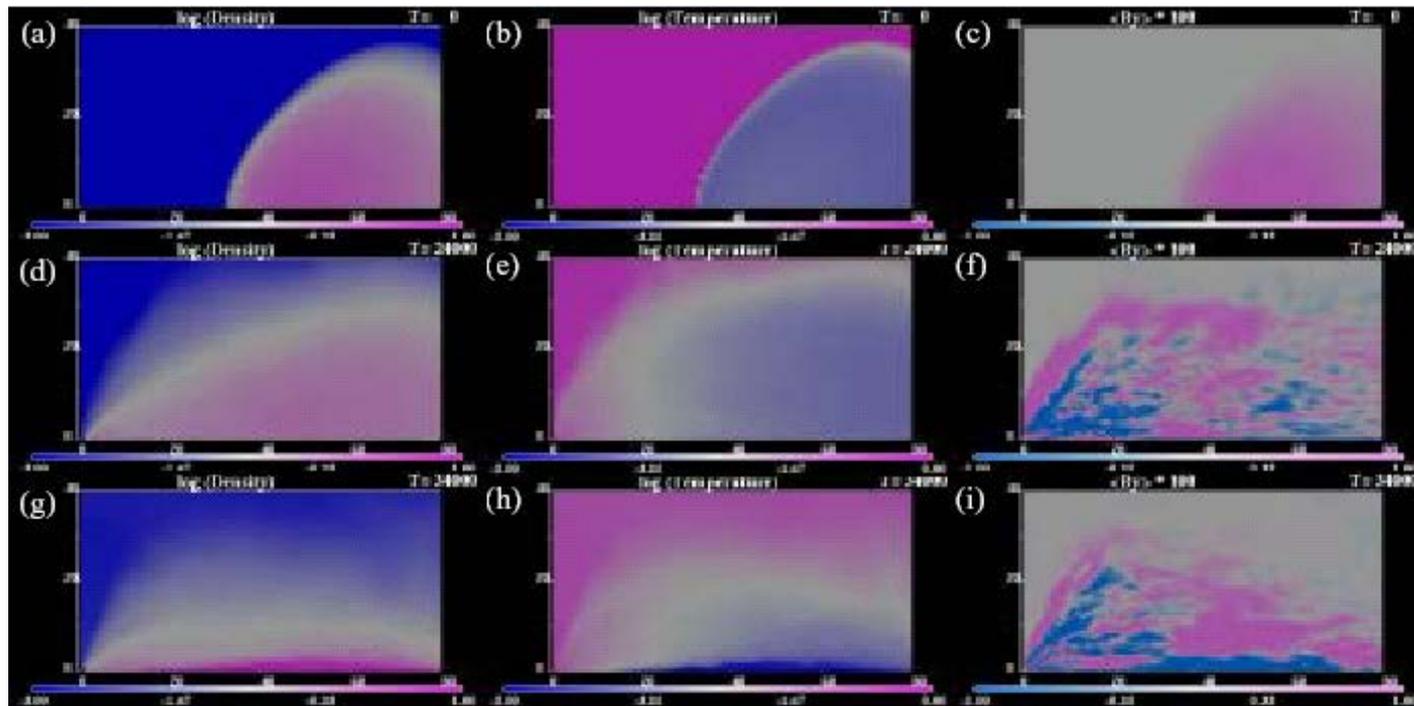
降着率

Abramowicz et al. 1995



# 光学的に薄い場合の輻射冷却を考慮した 磁気流体シミュレーション結果

Radiative Cooling :  $Q_{\text{rad}} = Q_{\text{b}} \rho^2 T^{1/2}$

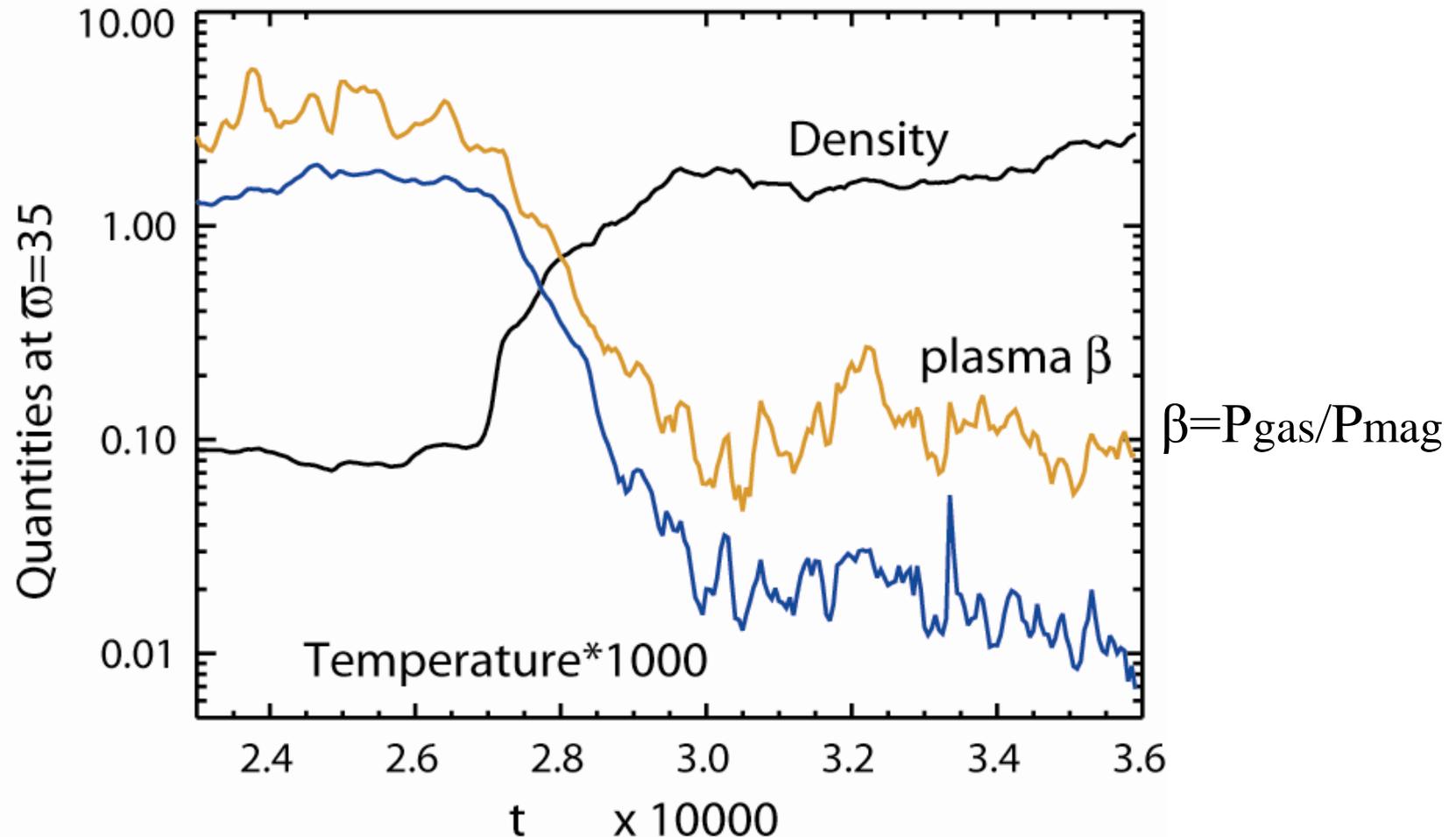


density

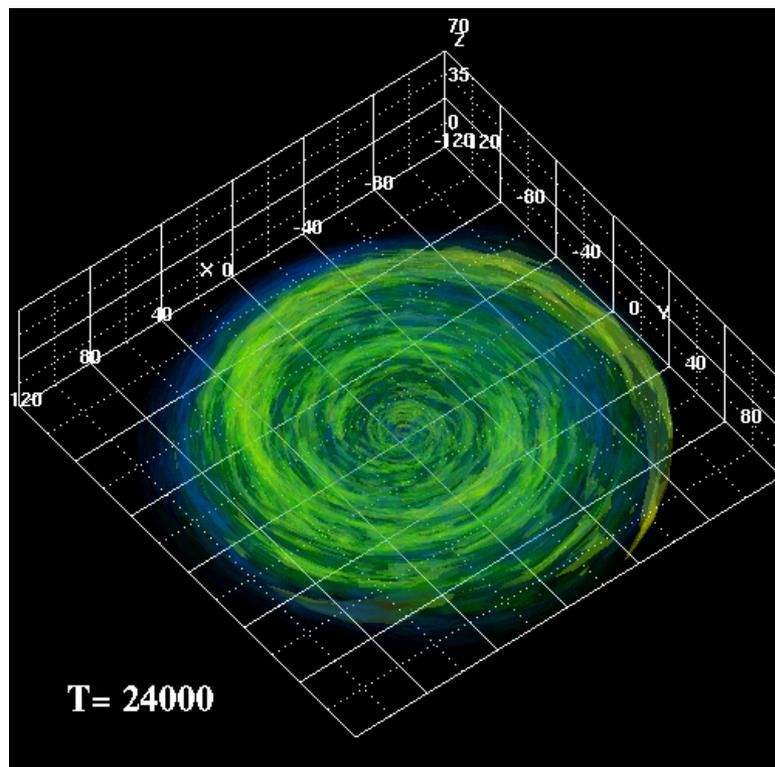
temperature

Toroidal field

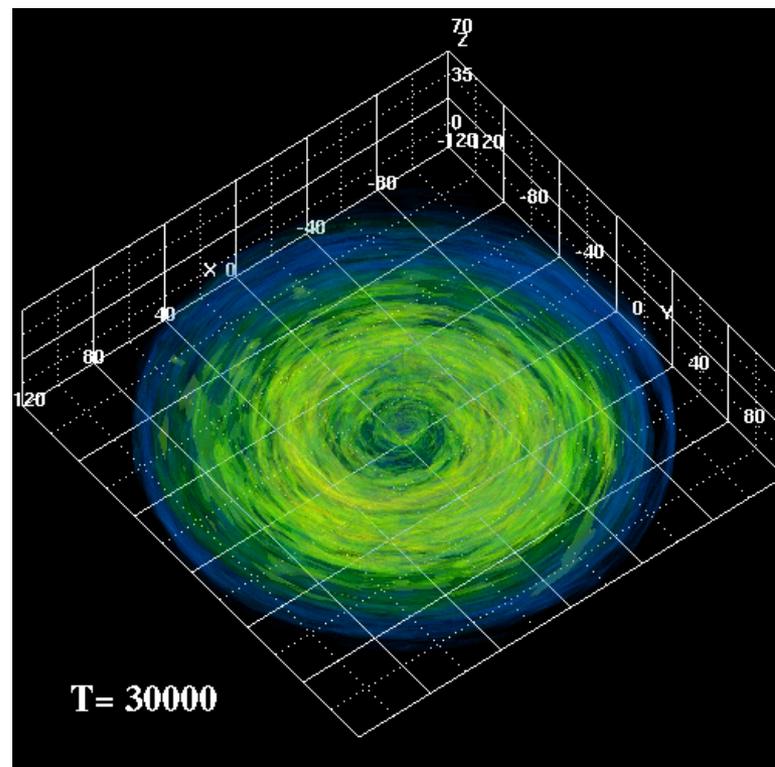
# 冷却不安定性の成長



# 磁気圧優勢円盤の形成



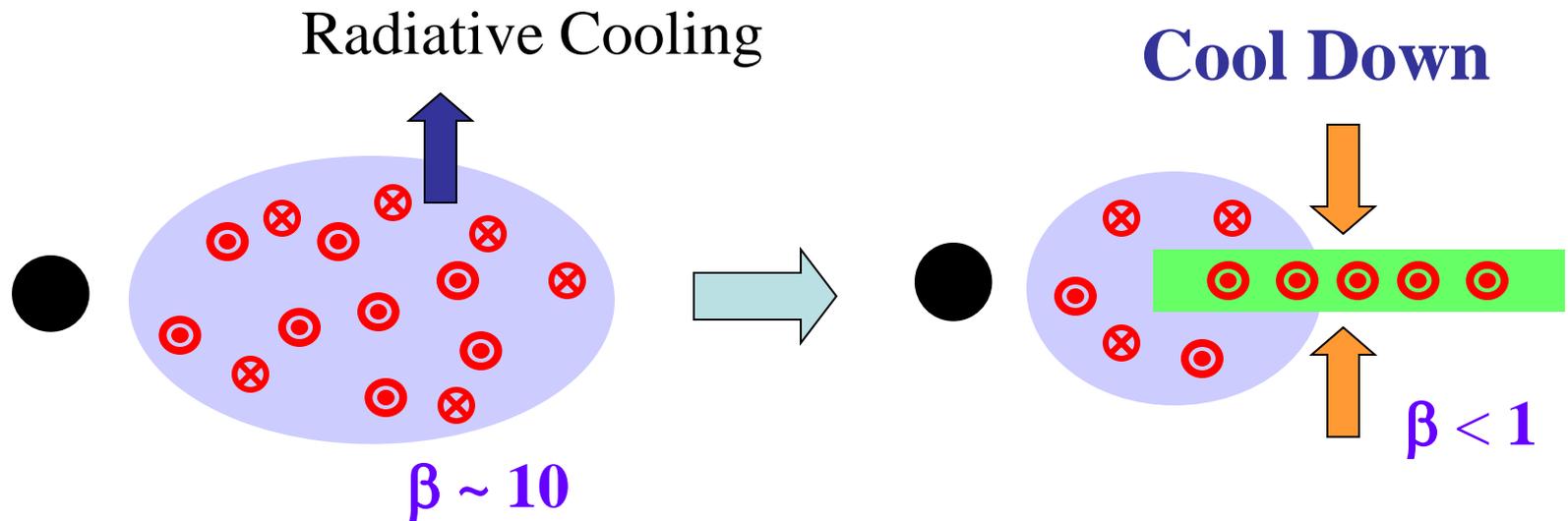
Before the transition



After the transition

Yellow:  
 $\beta < 1$

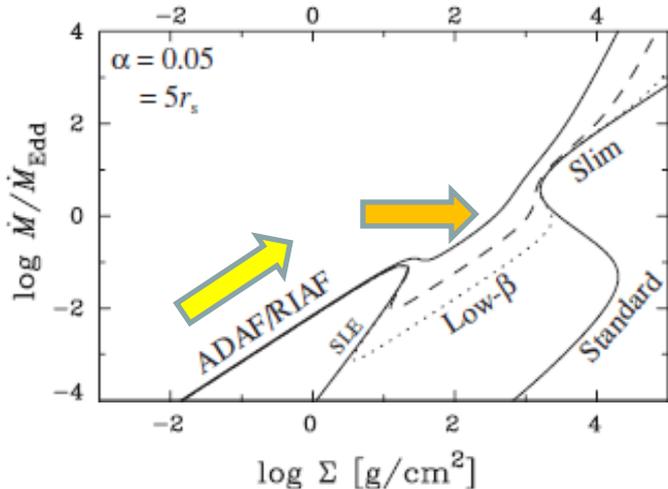
# 磁気圧で支えられた円盤の形成



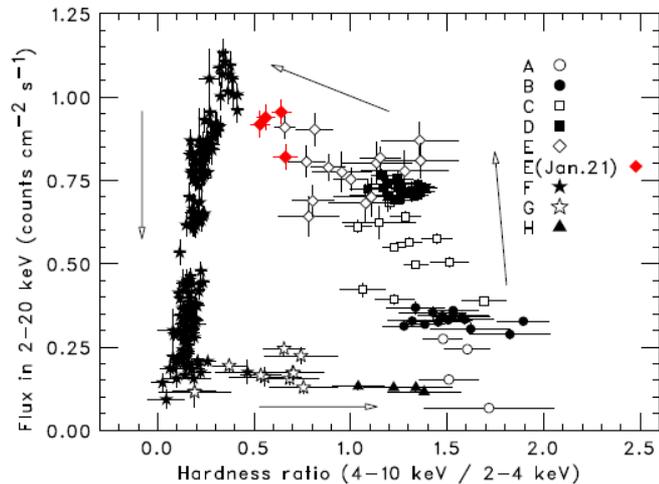
Optically Thin Hot Disk  
Supported by Gas Pressure

Optically Thin Cool Disk  
Supported by Magnetic Pressure

# 降着率増大に伴う降着円盤の進化



定常モデル (Oda et al. 2009)

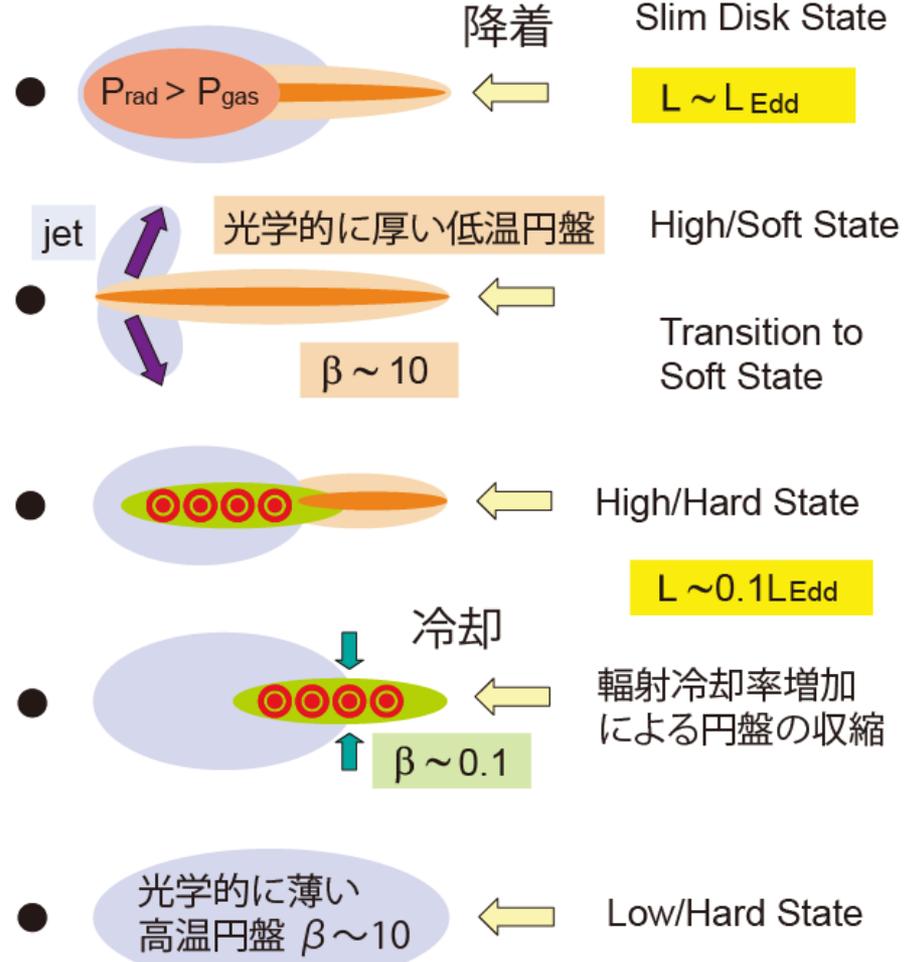


XTE J1752-223 (Nakahira et al. 2010)

降着率

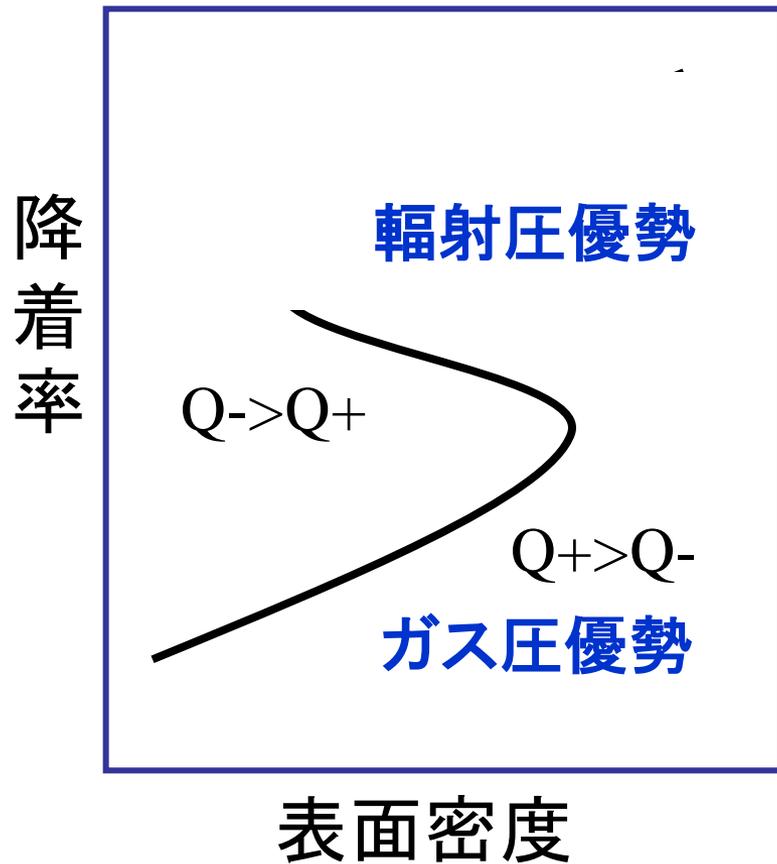
大

小

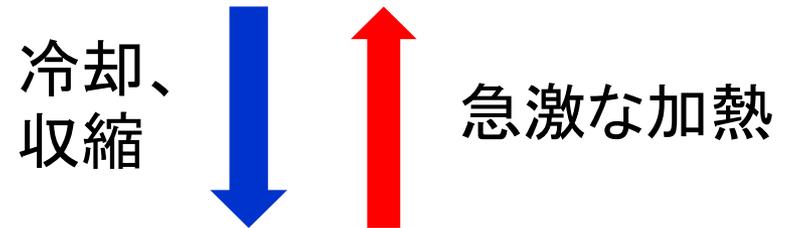


# 輻射磁気流体シミュレーション

# 修士論文ではガス圧優勢円盤と 輻射圧優勢円盤間の状態遷移を調べた



輻射圧優勢になると円盤が膨張し、物質が落下



落下物質が円盤に溜まる

間欠泉のような現象

光学的に厚い標準円盤の熱平衡曲線

# 移流を考慮した定常降着円盤の基礎方程式 (Matsumoto et al. 1984)

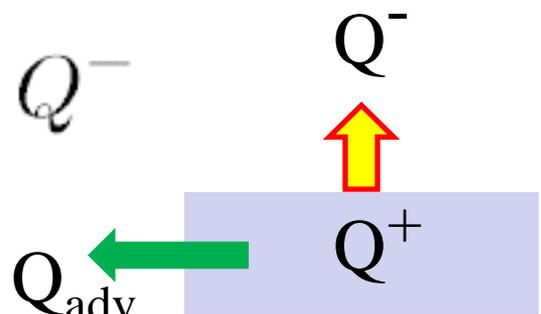
$$\dot{M} = -2\pi r \Sigma v_r$$

$$v_r \frac{dv_r}{dr} + \frac{1}{\Sigma} \frac{dW}{dr} = \frac{\ell^2 - \ell_K^2}{r^3} - \frac{W}{\Sigma} \frac{d \ln \Omega_K}{dr}$$

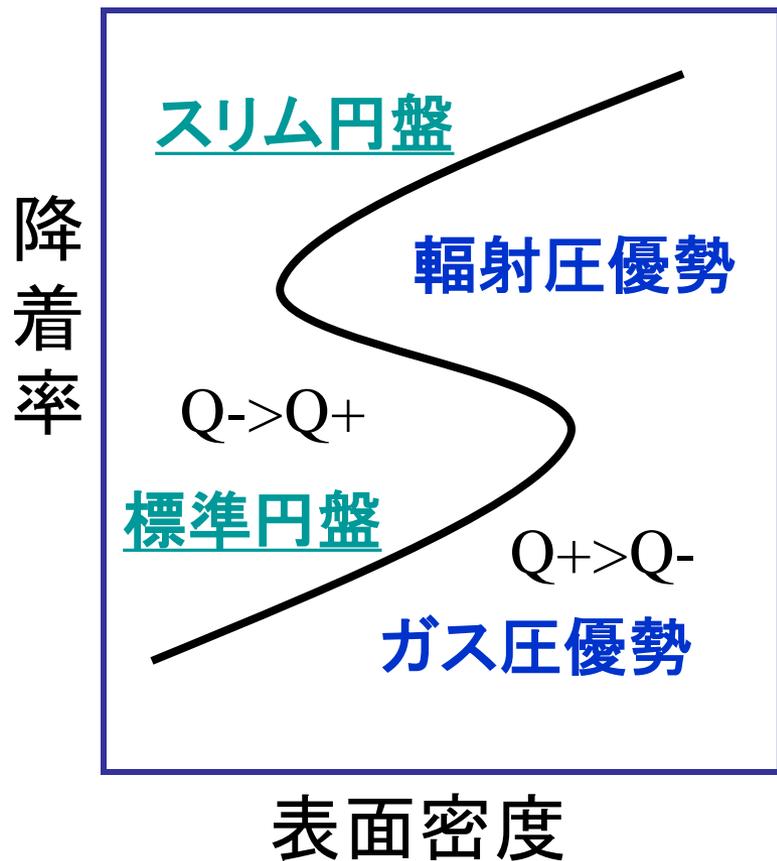
$$\dot{M}(\ell - \ell_{\text{in}}) = 2\pi r^2 \alpha W$$

$$Q_{\text{adv}} = -r \alpha W \frac{d\Omega}{dr} - Q^-$$

移流項

$$\Omega_K^2 H^2 = \frac{W}{\Sigma}$$


# 光学的に厚い円盤の熱平衡曲線



スリム円盤モデル

(Abramowicz et al. 1988)

$$Q_{\text{adv}} \sim \frac{W v_r}{r} \sim \frac{W}{\Sigma} \frac{\dot{M}}{2\pi r^2}$$

移流による熱輸送が輻射冷却にくらべて大きいとき

$$Q_{\text{adv}} \sim Q^+ = -r\alpha W \frac{d\Omega}{dr}$$

$Q_{\text{adv}} \propto \dot{M}^2 / \Sigma$ 、 $Q^+ \propto \dot{M}$  だから

$$\dot{M} \propto \Sigma$$

# ブラックホール降着円盤の熱振動

Publ. Astron. Soc. Japan **43**, 147–168 (1991)

修士論文で扱ったテーマを1次元のシミュレーションで完成させた。しかし、そのような現象が観測されていないのが謎だった。

Nonlinear Oscillations of Thermally Unstable Slim Accretion Disks around a Neutron Star or a Black Hole

Fumio HONMA<sup>1</sup>, Ryoji MATSUMOTO<sup>2</sup>, and Shoji KATO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Astronomy, Faculty of Science, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606

<sup>2</sup> College of Arts and Sciences, Chiba University, Yayoi-cho, Chiba 260

円盤が膨張し、物質が落下

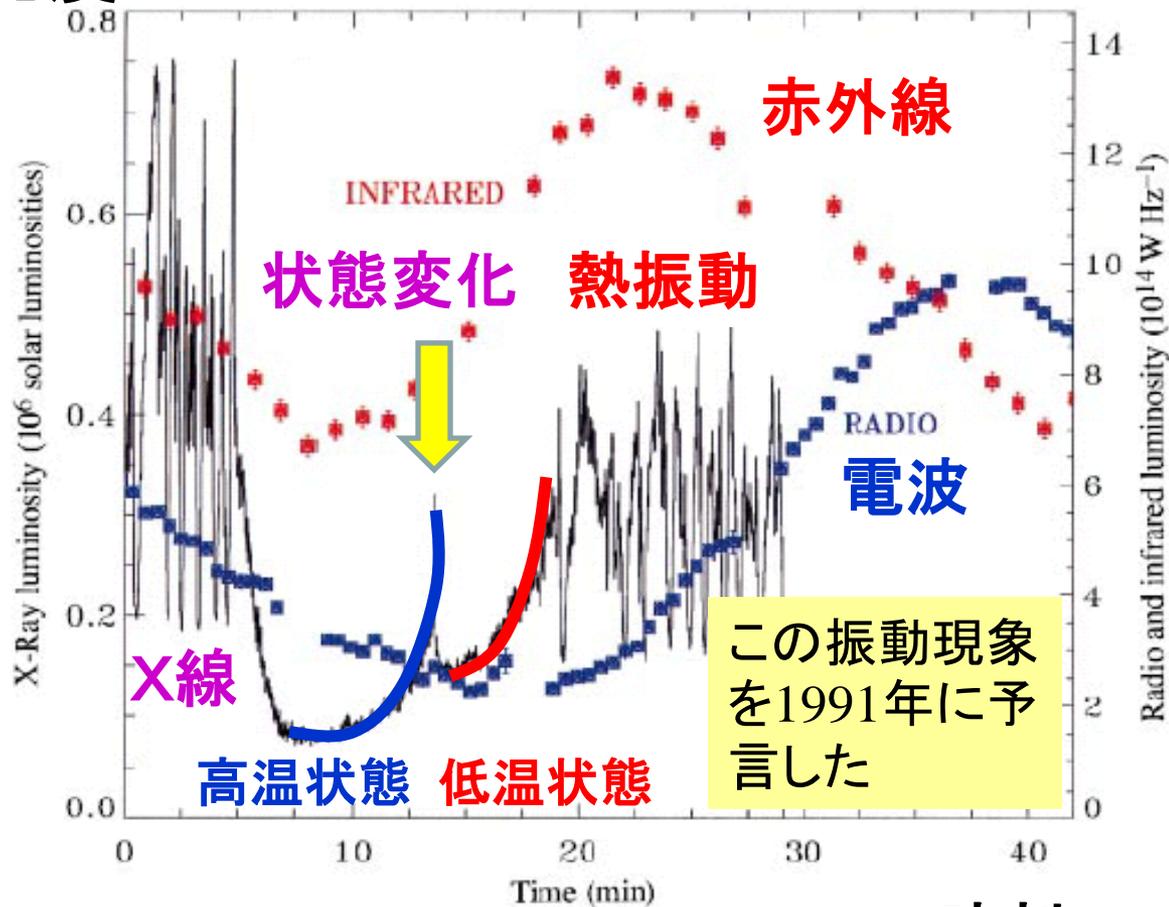
冷却、収縮 ↓ ↑ 急激な加熱

落下物質が円盤に溜まる

間欠泉のような現象

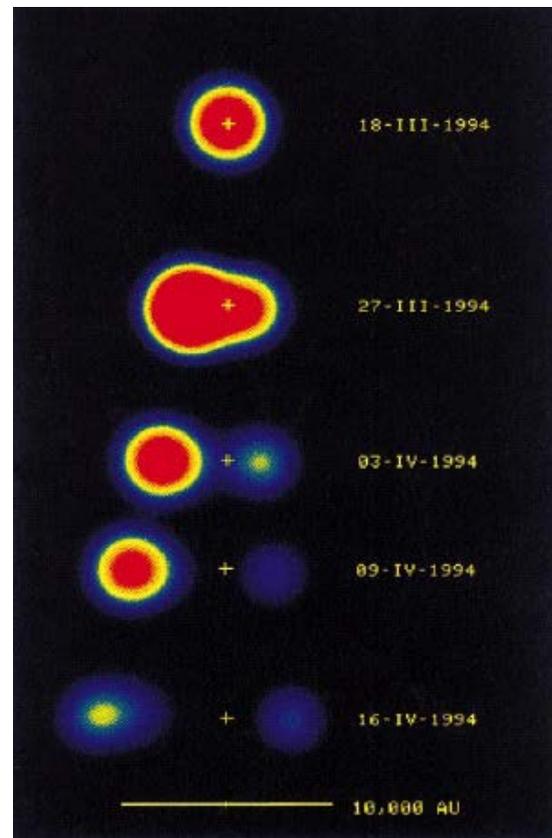
# マイクロクエーサーGRS1915+105

光度



GRS1915+105の時間変動

時刻



状態変化時の噴出現象

Mirabel and Rodriguez 1998  
60

# 輻射流体シミュレーション (Ohsuga 2006)

Continuity Equation  $\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$  Radiation Force

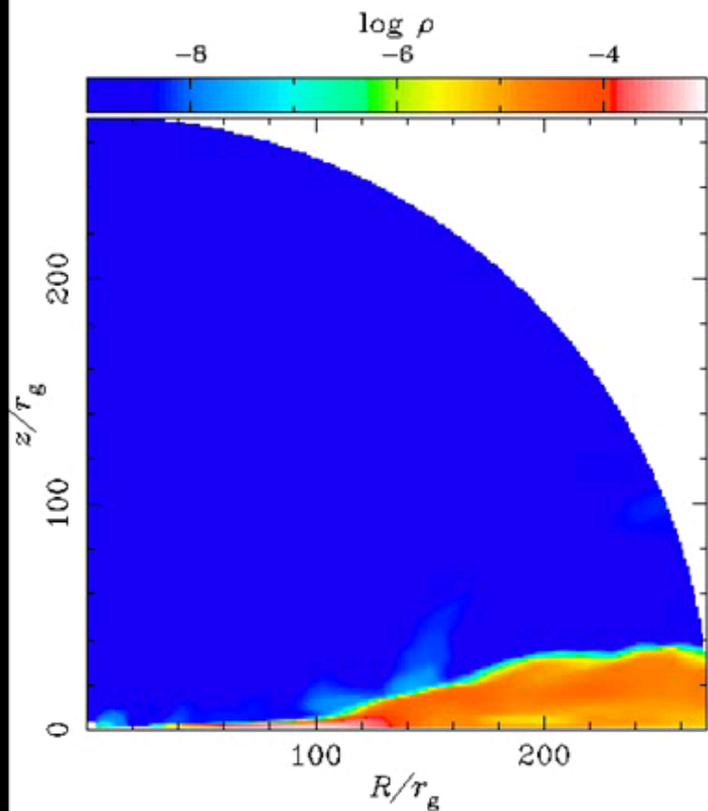
Equation of Motion  $\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \frac{GM}{(r-r_s)^2} + \frac{\kappa + \sigma}{c} \mathbf{F}_0 + \rho \mathbf{N}$  α粘性モデル

Gas Energy Equation  $\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e\mathbf{v}) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - 4\pi\kappa B + c\kappa E_0 + \Phi$  Absorption/Emission

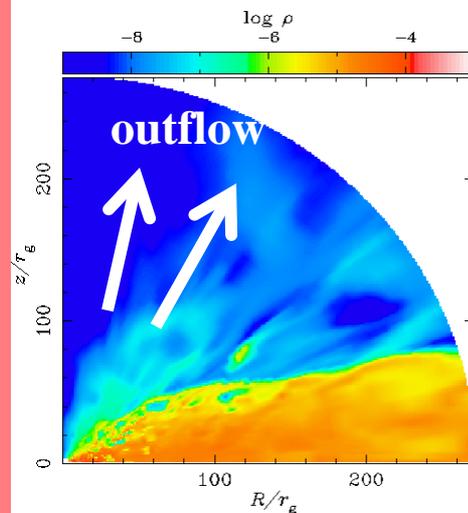
Radiation Energy Equation  $\frac{\partial E_0}{\partial t} + \nabla \cdot (E_0 \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \mathbf{F}_0 + 4\pi\kappa B - c\kappa E_0 - \nabla \mathbf{v} : \mathbf{P}_0$   
Advection (Photon-trapping) Radiative Flux

- $\alpha$ -viscosity:  $\alpha P$  ( $\alpha=0.1$ ,  $P$ :total pressure)
- Radiation fields ( $\mathbf{F}_0$ ,  $\mathbf{P}_0$ ): FLD approximation
- Equation of State:  $p=(\gamma-1)e$ ,  $\gamma=5/3$
- Absorption coefficient( $\kappa=\kappa_{\text{ff}}+\kappa_{\text{bf}}$ ),  $\kappa_{\text{ff}}$ :free-free absorption,  $\kappa_{\text{bf}}$ :bound-free absorption (Hayashi, Hoshi, Sugimoto 1962)

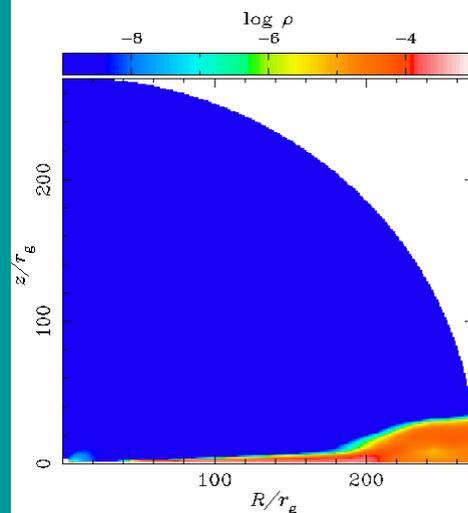
# 軸対称2次元輻射流体 シミュレーション結果



High-luminosity state



Low-luminosity state

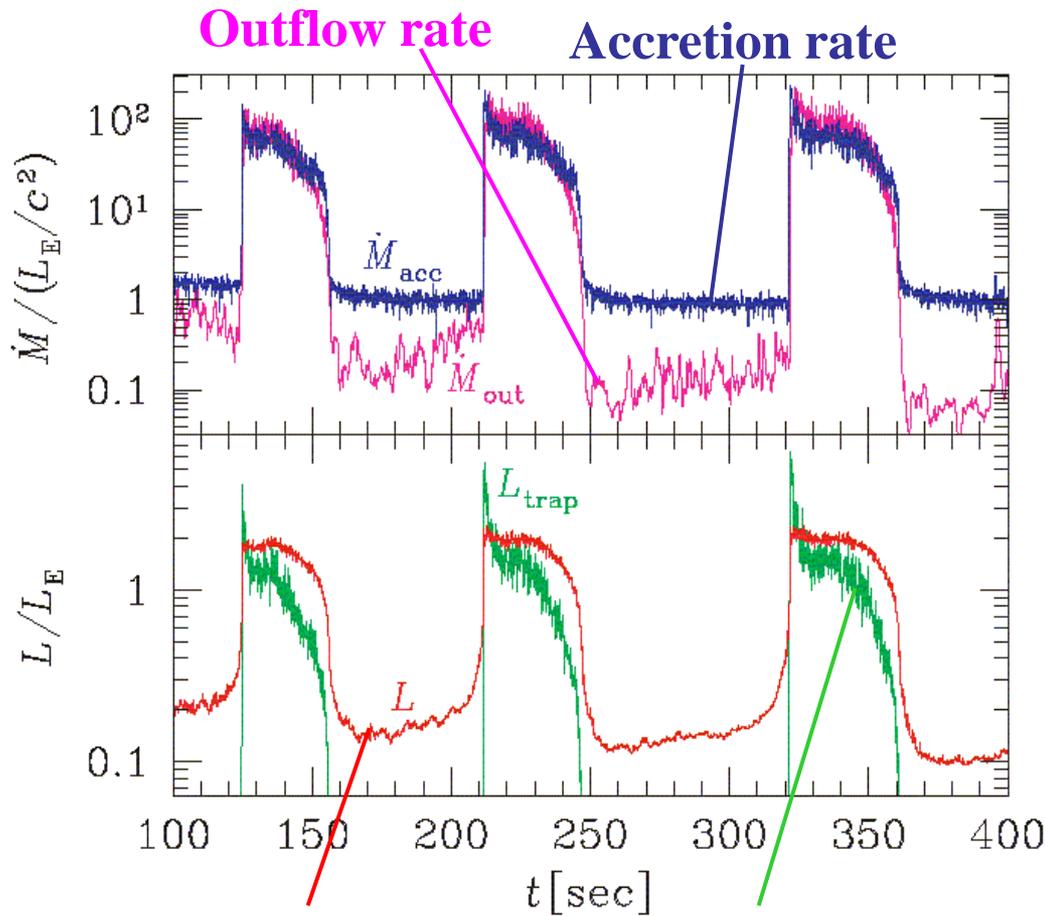


Black hole mass:  $M_{BH} = 10M_{\odot}$

Input mass accretion rate:  $\dot{M}_{input} / (L_E / c^2) = 10^2$

Ohsuga 2006

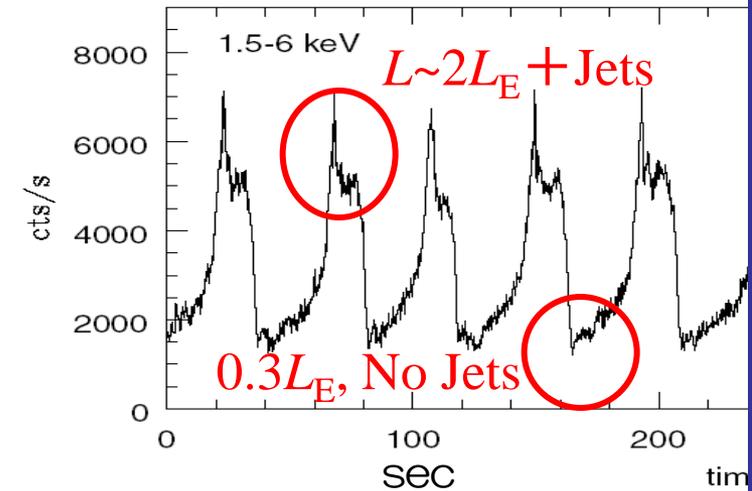
# GRS1915+105の間歇的増光を再現



Ohsuga 2006

Limit-cycle

GRS1915+105



Janiuk & Czerny 2005

# 輻射磁気流体シミュレーション (Ohsuga, Mineshige, Mori, Kato 2009)

## 基礎方程式

Continuity

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

Equation of Motion

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla \left( p + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \left( \frac{\mathbf{B}}{4\pi} \cdot \nabla \right) \mathbf{B} - \rho \frac{GM}{(r-r_s)^2} + \frac{\kappa + \sigma}{c} \mathbf{F}_0$$

Gas Energy

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e\mathbf{v}) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - 4\pi\kappa B + c\kappa E_0 + \frac{4\pi}{c^2} \eta J^2$$

Radiation Energy

$$\frac{\partial E_0}{\partial t} + \nabla \cdot (E_0 \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \mathbf{F}_0 + 4\pi\kappa B - c\kappa E_0 - \nabla \mathbf{v} : \mathbf{P}_0$$

Maxwell's Equations

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \left( \mathbf{v} \times \mathbf{B} - \frac{4\pi\eta}{c} \mathbf{J} \right) \quad \mathbf{J} = \frac{c}{4\pi} \nabla \times \mathbf{B}$$

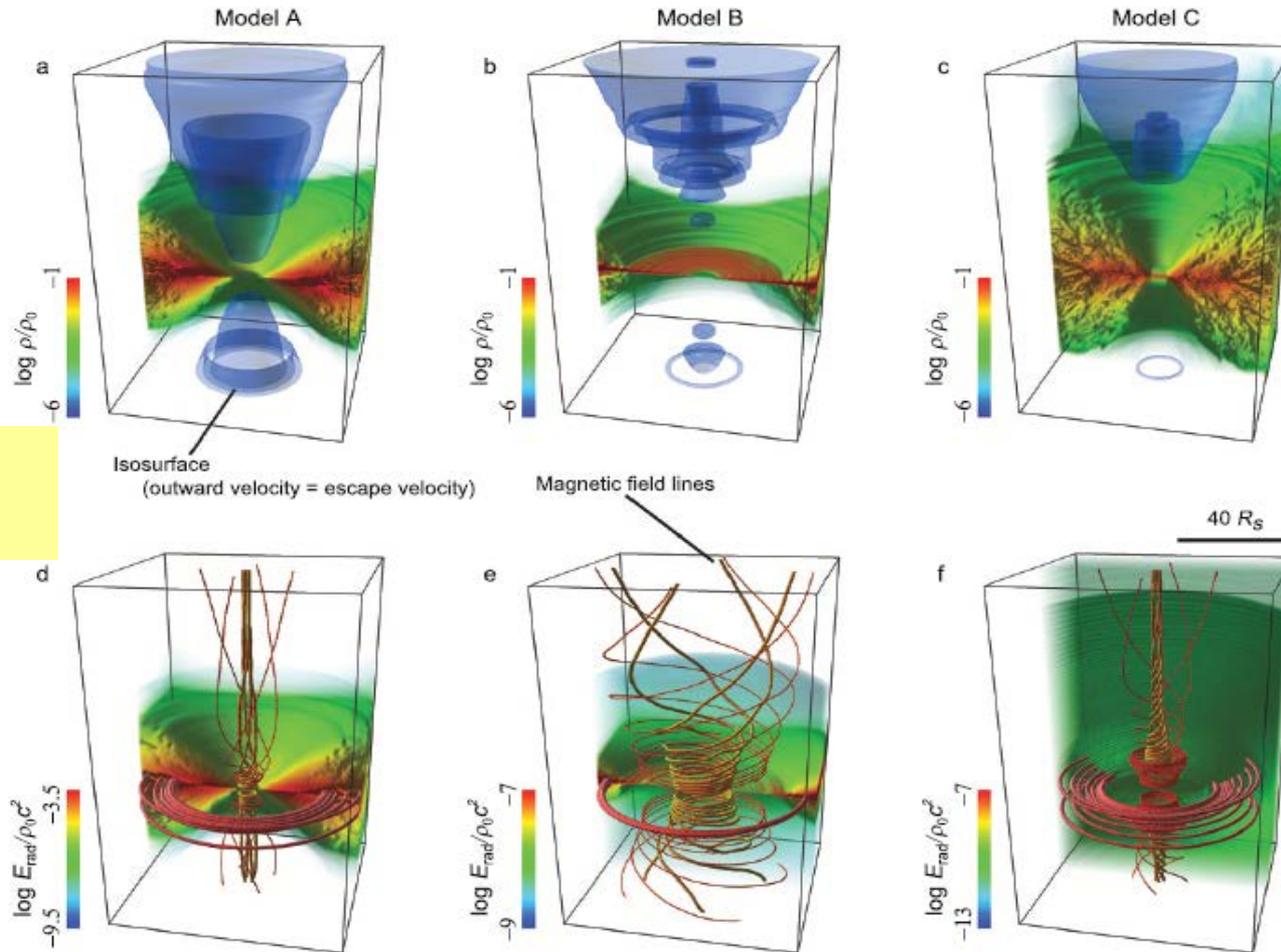


輻射に関する項



磁場に関する項

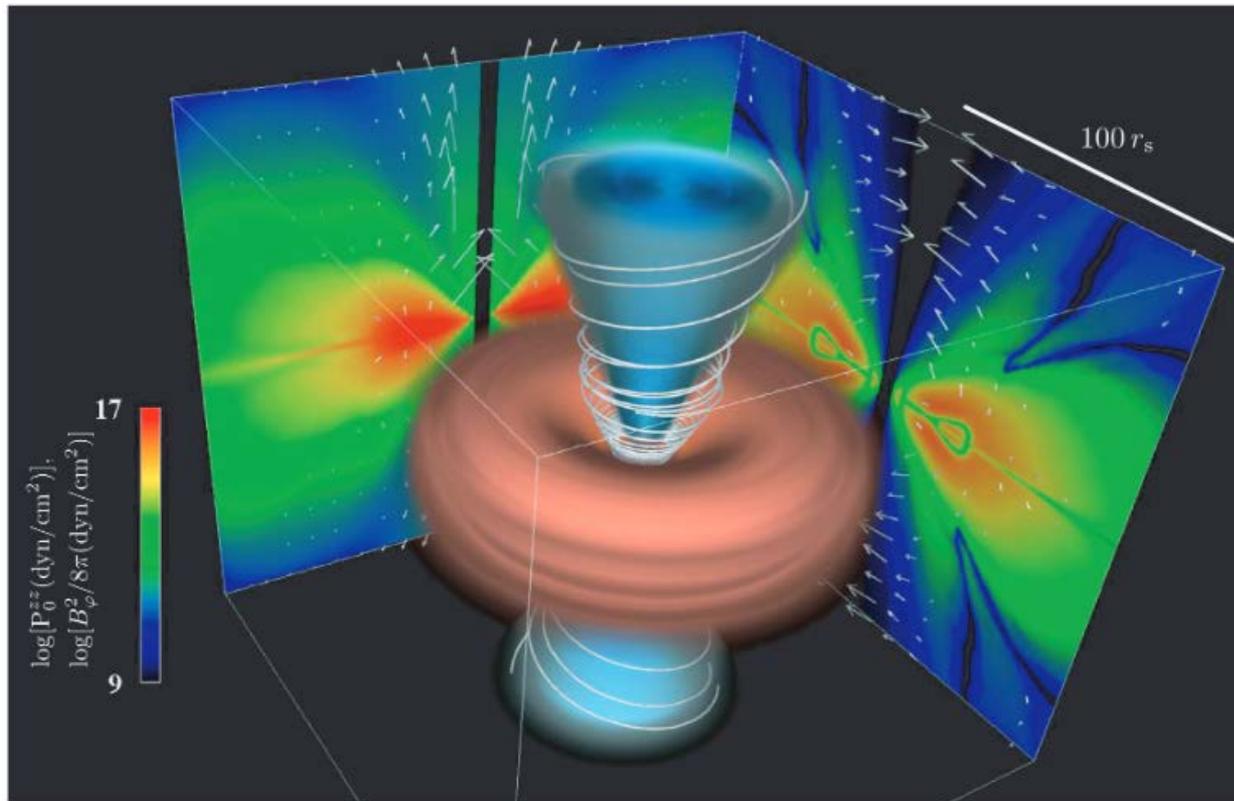
# 2次元輻射磁気流体シミュレーション例



降着率  
高い

降着率  
低い

# 超臨界降着流の輻射磁気流体 シミュレーション結果

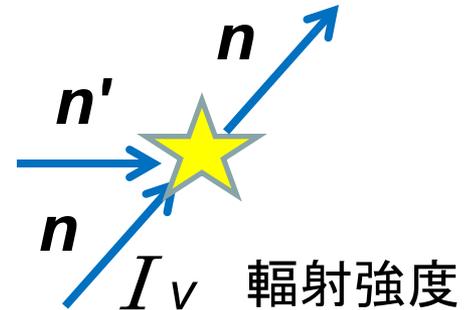


Takeuchi, Ohsuga, Mineshige 2010

# 1次モーメント法に基づく 輻射磁気流体コードの実装

- 輻射輸送方程式

$$\left( \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla \right) I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) = -\sigma_\nu I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) + \sigma_\nu S_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) + \sigma_{\nu,s} \int g(\mathbf{n}, \mathbf{n}') I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}') d\mathbf{n}'$$



- 角度方向に積分したモーメント式

$$\frac{\partial E_\nu}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_\nu = \sigma_\nu (4\pi S_\nu - cE_\nu)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_\nu}{\partial t} + c^2 \nabla \cdot \vec{\mathbf{P}}_\nu = -c (\sigma_\nu + \sigma_{\nu,s}) \mathbf{F}_\nu$$

- クロージャー関係

$$\vec{\mathbf{P}}_\nu = \left( \frac{1-\chi}{2} \vec{\mathbf{I}} + \frac{3\chi-1}{2} \mathbf{nn} \right) E_\nu$$

$$E_\nu(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

$$\mathbf{F}_\nu(t, \mathbf{r}) = \int \mathbf{n} I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

$$\vec{\mathbf{P}}_\nu(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int \mathbf{nn} I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

# 一般相対論的輻射磁気流体コード

誘導  
方程式

$$\partial_t (\sqrt{-g} \rho u^t) + \partial_i (\sqrt{-g} \rho u^i) = 0$$

$$\partial_i (\sqrt{-g} B^i) = 0$$

$$\partial_t (\sqrt{-g} B^i) = -\partial_j [\sqrt{-g} (b^j u^i - b^i u^j)]$$

流体

$$\partial_t (\sqrt{-g} T_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g} T_\nu^i) = \sqrt{-g} T_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda + \sqrt{-g} G_\nu$$

輻射

$$\partial_t (\sqrt{-g} R_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g} R_\nu^i) = \sqrt{-g} R_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda - \sqrt{-g} G_\nu$$

輻射力

$$G^\mu = -\rho(\kappa_a + \kappa_s) R^{\mu\nu} u_\nu - \rho(\kappa_s R^{\alpha\beta} u_\alpha u_\beta + \kappa_a 4\pi B) u^\mu$$

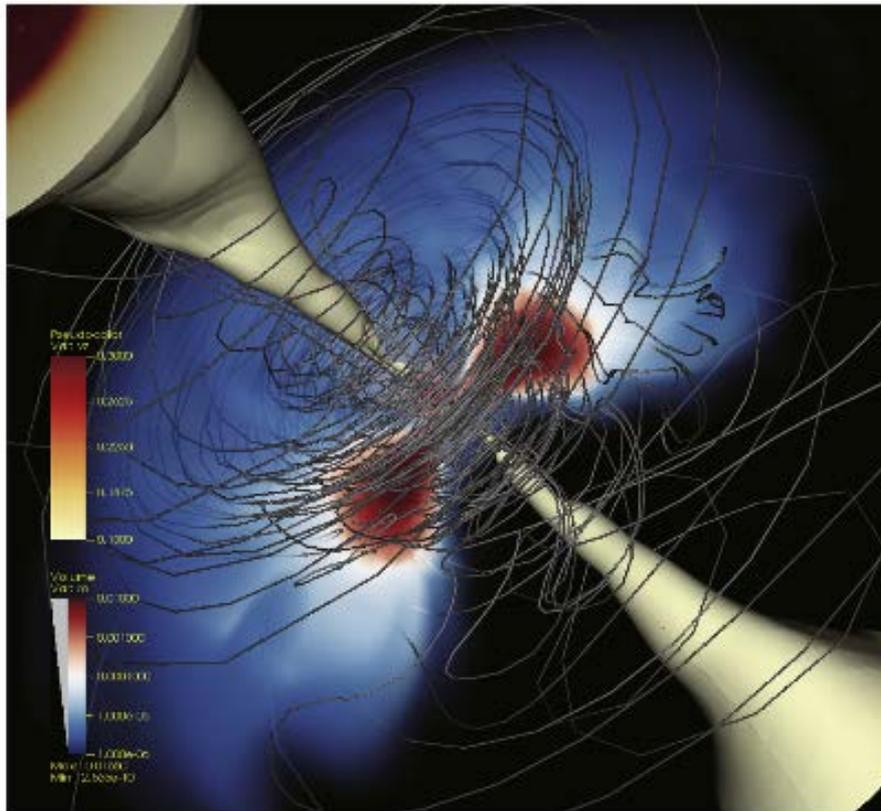
M1-closure

$$R^{\mu\nu} = \frac{4}{3} \bar{E}_R u_R^\mu u_R^\nu + \frac{1}{3} \bar{E}_R g^{\mu\nu}$$

座標系: Kerr-Schild 座標

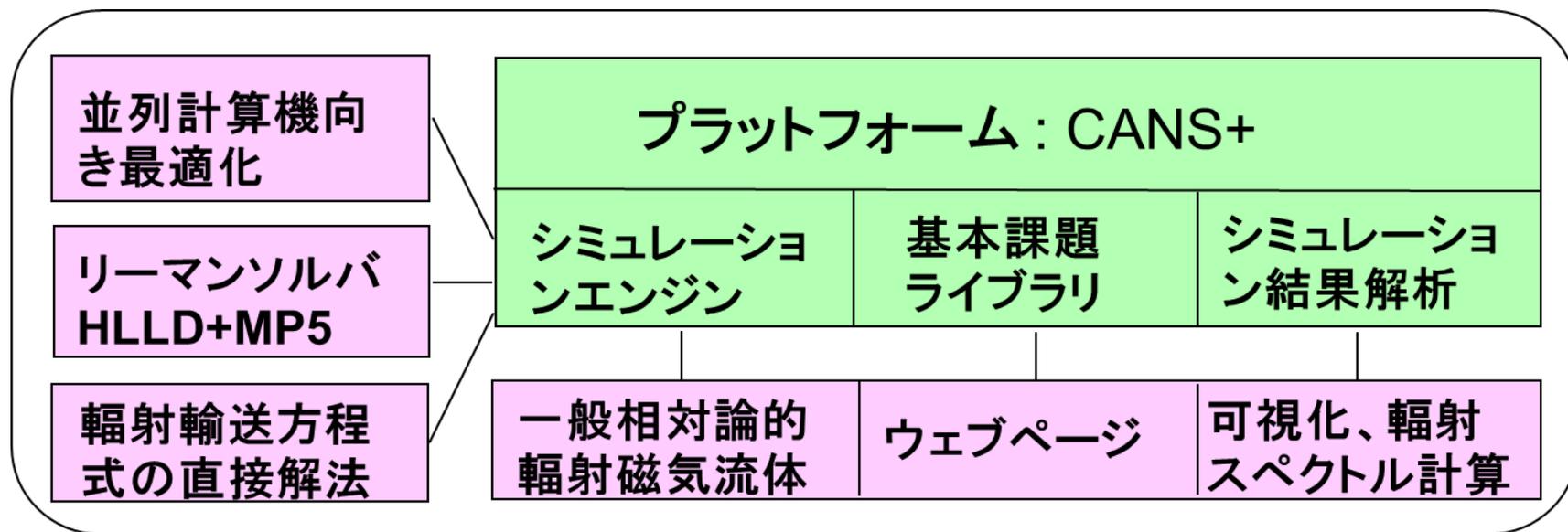
Takahashi et al. 2016, ApJ

# 一般相対論的3次元 輻射磁気流体シミュレーション結果

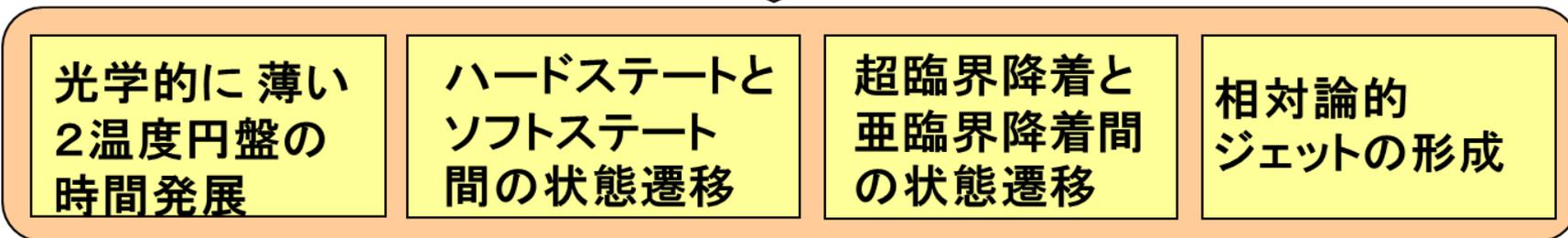


Takahashi et al. 2016, ApJ

# 降着円盤磁気流体シミュレータ



↓ 降着円盤への適用



# まとめ

- 修士論文で扱ったガス圧優勢な降着円盤と輻射圧優勢な降着円盤の間の状態遷移を $\alpha$ 粘性を導入しない大局的3次元輻射磁気流体計算で調べていきたい。
- このテーマを与えて下さった加藤正二先生、磁気流体シミュレーションに導いていただいた柴田一成さん、3次元並列磁気流体コード開発の機会をいただいた田島俊樹先生、その後の研究を共にしていただいた多数の大学院生、共同研究者の皆様に感謝します。

**END**