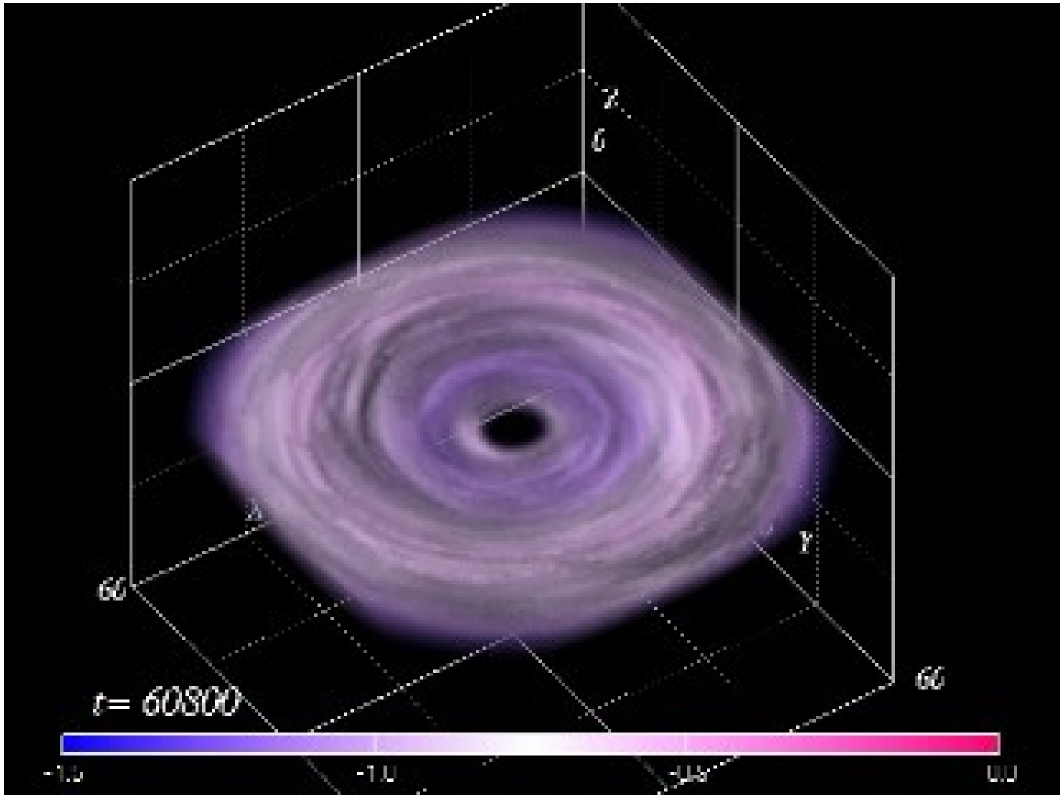
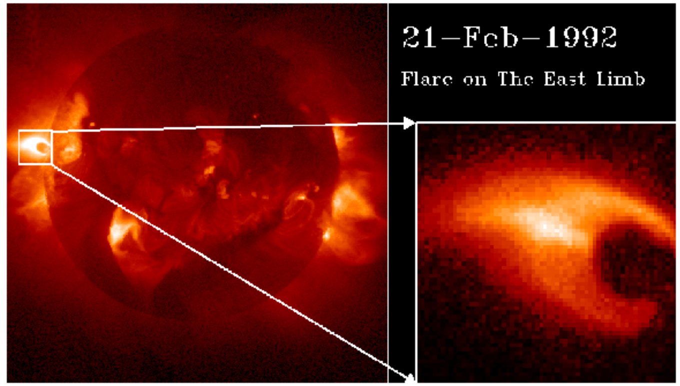
降着円盤の構造と安定性

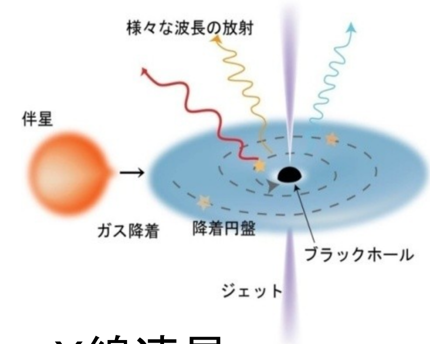


松元亮治（千葉大）

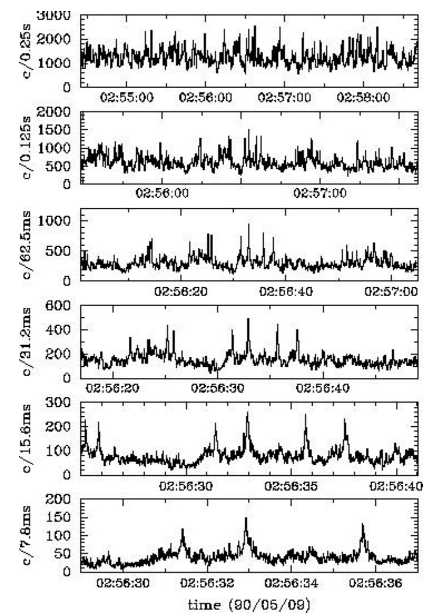
宇宙は思いもよらない活動性に満ちている



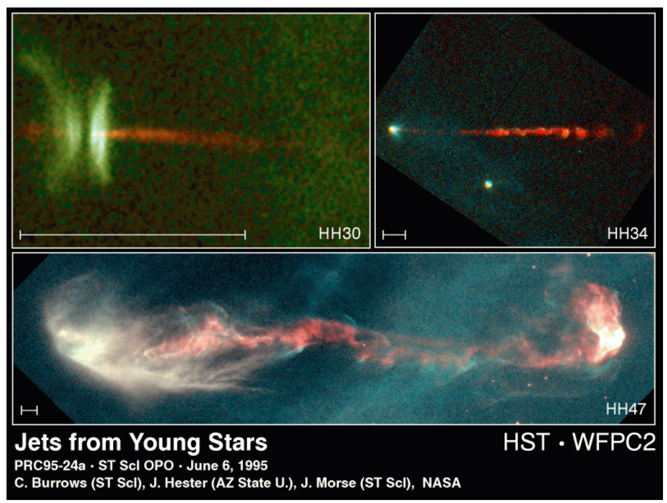
「ようこう」衛星が捉えた太陽活動



X線連星



Cyg X-1のX線時間変動（Negoro 1995)

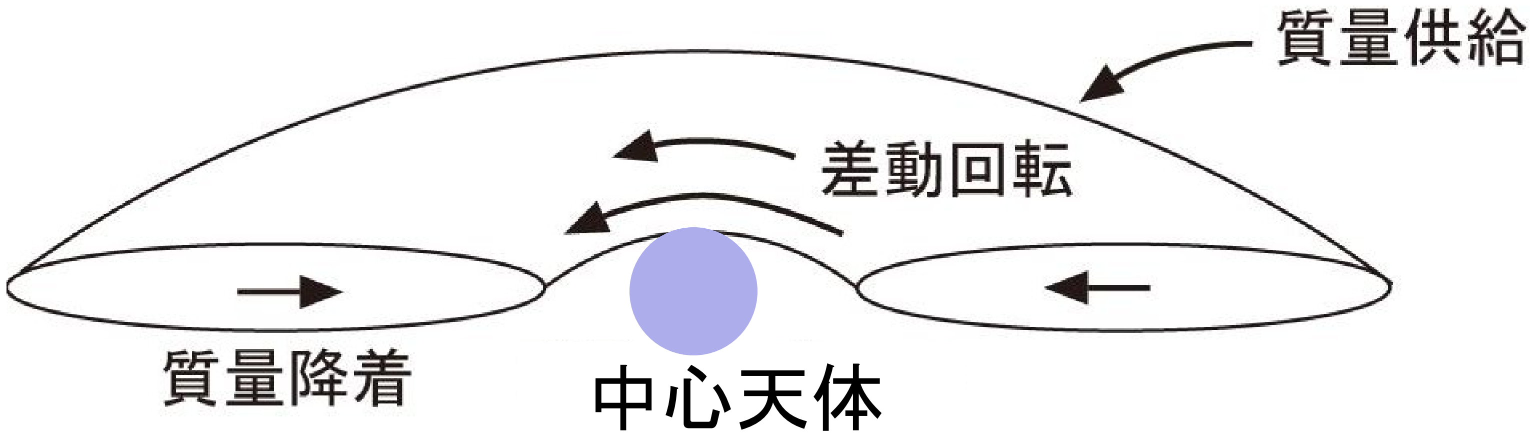


星形成領域のジェット

講演予定

- 降着円盤とは？
- 降着円盤の理論モデル
- ブラックホール降着円盤のモデル
- 降着円盤の状態遷移
- 降着円盤の磁気流体シミュレーション
- 降着円盤の状態遷移シミュレーション
- 降着円盤の振動
- まとめ

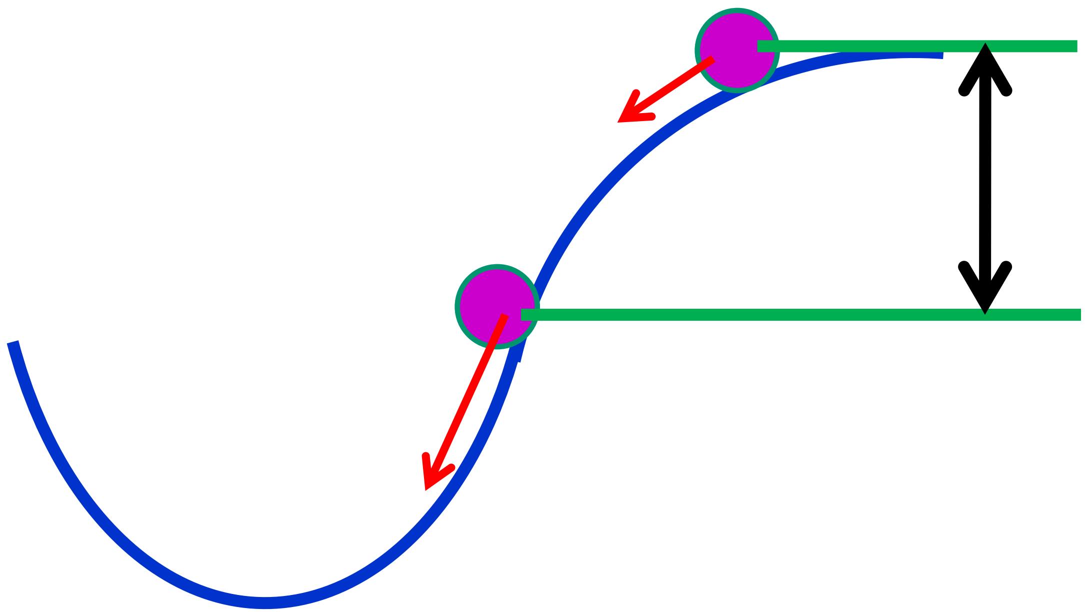
降着円盤とは？：中心天体に落下する物質が作る回転円盤



回転物質がゆっくり落下することにより、重力エネルギーを輻射などのエネルギーに変換：

- 供給される燃料によって活動するエンジン
- 角運動量を抜かないと落下できない。

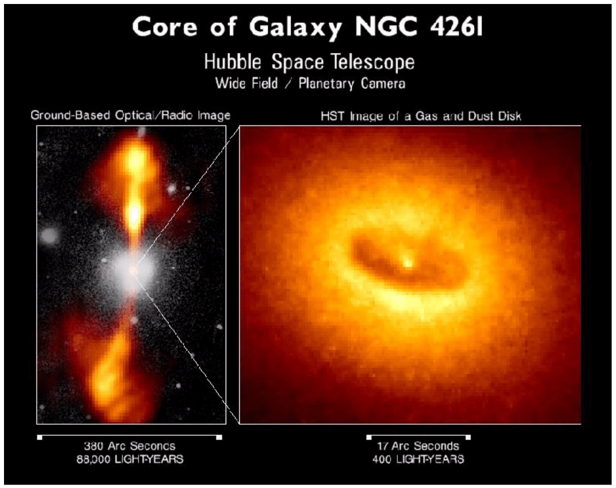
落下によるエネルギー解放

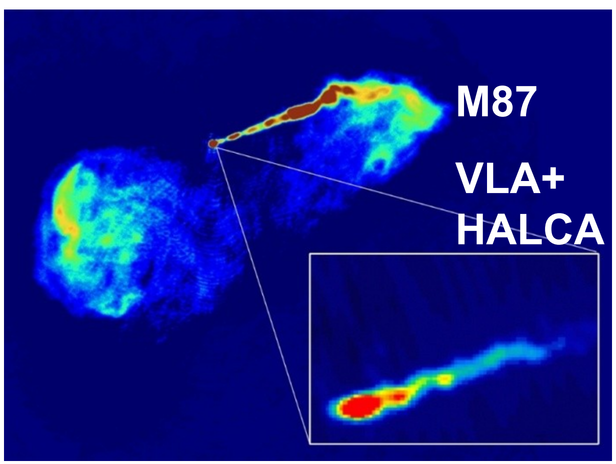


この差の位置エネルギーが他のエネルギーに転化される

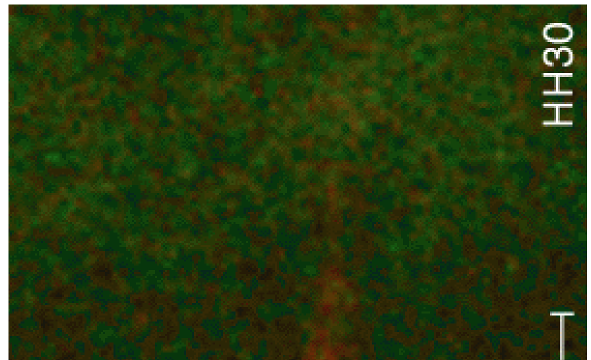
解放されるエネルギーと物質の持つ静止エネルギー mc^2 の比は中心天体がブラックホールの場合1に近づく (核融合より効率が良い)

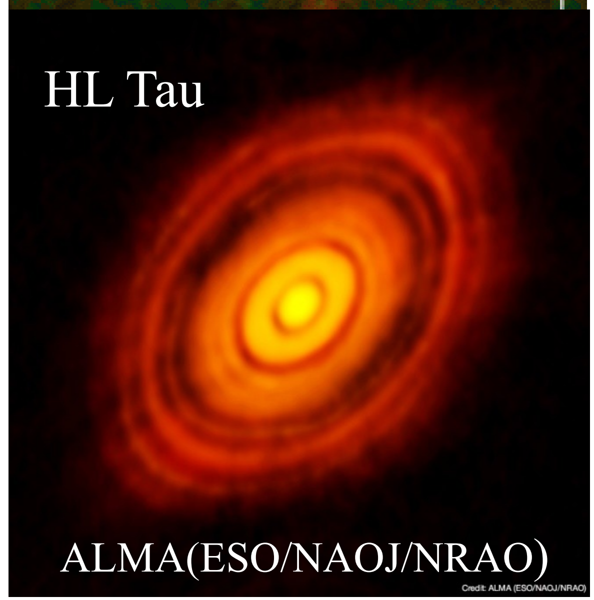
降着円盤は宇宙の活動現象を駆動する



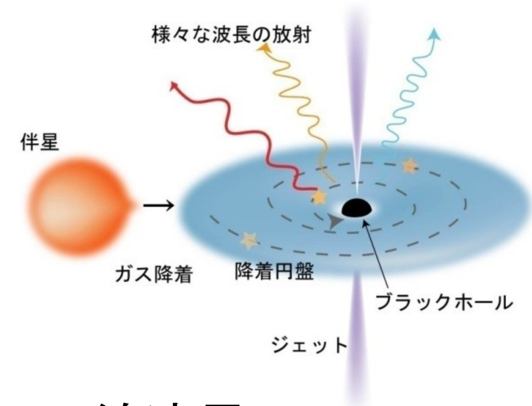


活動銀河中心から噴出する
ジェット

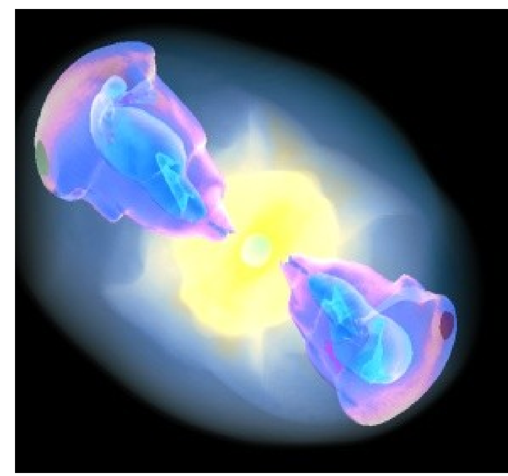




原始星円盤とジェット



X線連星



大質量星の重力崩壊
とガンマ線バースト

星と降着円盤の比較

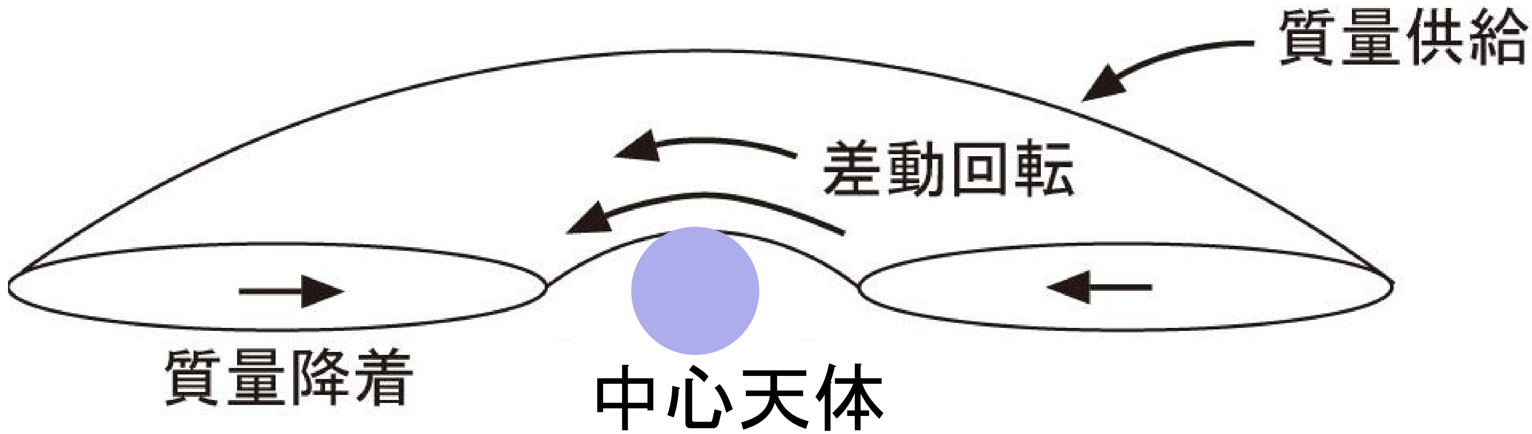
	星	降着円盤
形状	球対称	軸対称
回転	遅い	速い
つりあい	重力と圧力勾配	重力と遠心力
エネルギー源	核融合	重力エネルギー
質量供給	なし	あり
内部磁場	ガス圧≫磁気圧	ガス圧～磁気圧

降着円盤の理論モデル

- Shakura and Sunyaev 1973 標準降着円盤モデル
- Novikov and Thorne 1973 一般相対論化した標準モデル
- Shakura and Sunyaev 1976、Pringle 1976 熱不安定性
- Shapiro, Lightman, Eardley 1976 二温度高温円盤
- Ichimaru 1977 hard-soft 遷移、移流優勢円盤のパイオニア
- Kato 1978 円盤振動
- Abramowicz et al. 1978 トーラスモデル
- Liang and Thompson 1980 遷音速解
- Abramowicz et al. 1988 スリムディスクモデル
- Balbus and Hawley 1991 磁気回転不安定性
- Narayan and Yi 1994、Abramowicz et al. 1995 移流優勢円盤
- Hawley et al. 2000, Machida et al. 2000 大局的3D磁気流体計算

Osaki, Meier, C.Wheeler, Mineshige ら 矮新星円盤

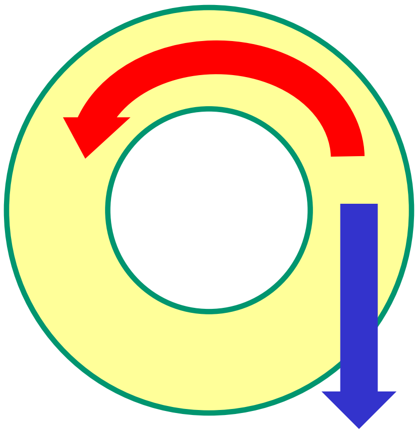
降着円盤における角運動量輸送



円盤物質が落下するためには方位角方向に働く力F_{φ}によって回転物質の角運動量を減少させる必要がある

この力はある半径の円筒面（動径方向の単位ベクトルを法線方向とする面）の単位面積あたりに方位角方向に働く粘性応力 $t_{r\varphi}$ を用いてあらわすことができる。

降着円盤に働く方位角方向の力



- 応力テンソルのrφ成分 $t_{r\varphi}$
- 半径 r の面に働くトルク

$$G(r) = 2\pi r \times r t_{r\varphi}$$

- 内径 r 、外径 r+Δr の円環に働くトルク

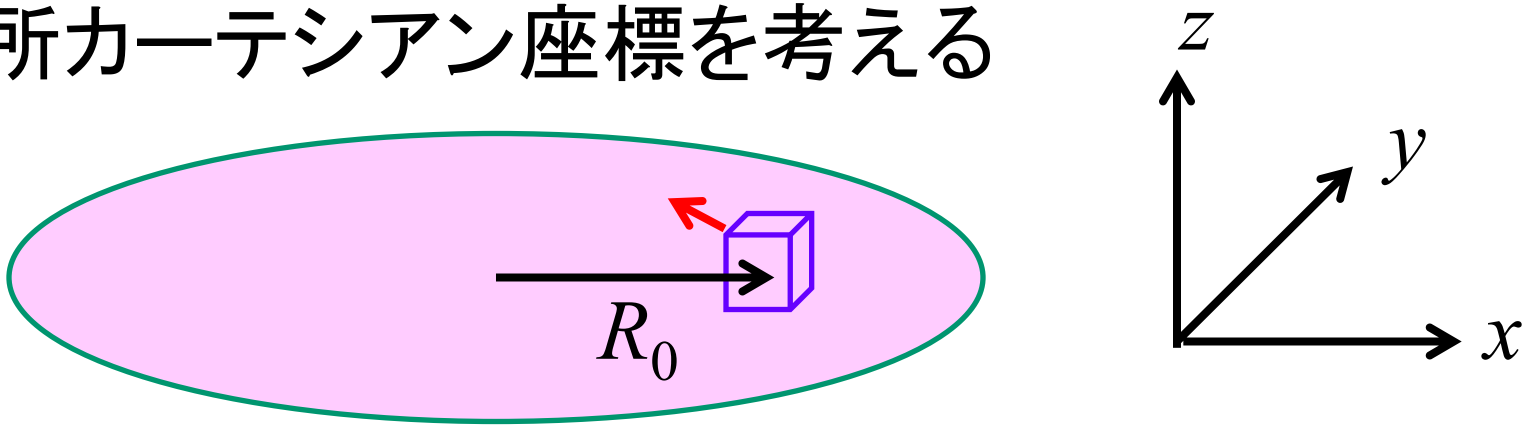
$$2\pi r \times r F_\varphi \Delta r = G(r+\Delta r) - G(r) = \frac{dG(r)}{dr}\Delta r$$

- 単位体積あたりの方位角方向の力

$$F_\varphi = \frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}(r^2 t_{r\varphi})$$

応力テンソル成分の見積もり

- 半径R_0、角速度$\Omega(R_0)$で円盤と共回転する局所カーテシアン座標を考える

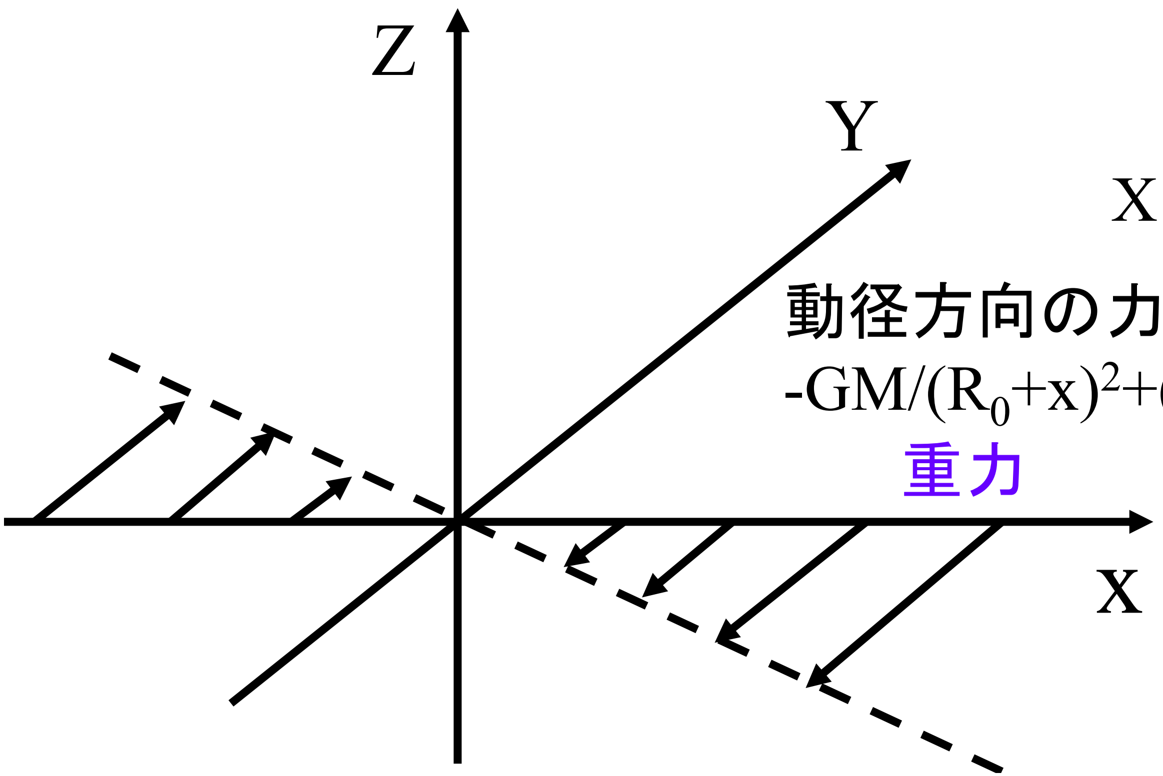


- 粘性係数をηとすると局所カーテシアン座標における応力テンソルのxy成分は

$$t_{xy} = \eta \frac{dv_y}{dx} = \eta \frac{(R_0+\Delta x)\Omega(R_0+\Delta x) - (R_0+\Delta x)\Omega(R_0)}{\Delta x} \simeq \eta R_0 \frac{d\Omega(R_0)}{dR_0}$$

- 円筒座標では $\quad t_{r\varphi} = \eta r \dfrac{d\Omega}{dr}$

共回転系におけるシア流れ



$X = R - R_0 \ll R_0$

動径方向の力のつりあい

$-GM/(R_0+x)^2+(R_0+x)\,\Omega^2 \quad + 2V_y\,\Omega = 0$

重力　遠心力　コリオリ力

$x=0$ で $V_y=0$

$\Omega(R_0)^2=GM/R_0^3$

ケプラー回転

$$v_y = R_0 \frac{d\Omega(R_0)}{dR_0} x$$

軸対称回転流体の基礎方程式

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{r\partial r}(\rho r v_r)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z)=0$$

$$\rho\frac{\partial v_r}{\partial t}+\rho v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+\rho v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}-\rho\frac{v_\varphi^2}{r}=-\rho\frac{\partial\psi}{\partial r}-\frac{\partial p}{\partial r}$$

$$\rho\frac{\partial v_\varphi}{\partial t}+\rho v_r\frac{\partial v_\varphi}{\partial r}+\rho v_z\frac{\partial v_\varphi}{\partial z}+\rho\frac{v_r v_\varphi}{r}=F_\varphi=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2 t_{r\varphi})$$

$$\rho\frac{\partial v_z}{\partial t}+\rho v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+\rho v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}=-\rho\frac{\partial\psi}{\partial z}-\frac{\partial p}{\partial z}$$

$$\rho T\frac{dS}{dt}=\rho\frac{de}{dt}+p\nabla\cdot v=\boxed{q^+}-\boxed{q^-}$$

加熱率　冷却率

加熱率 $q^+=t_{r\varphi}r\frac{\partial}{\partial r}(\frac{v_\varphi}{r})$

定常軸対称モデルへ

- 方位角方向の運動方程式

$$\rho\frac{\partial v_\varphi}{\partial t}+\rho v_r\frac{\partial v_\varphi}{\partial r}+\rho v_z\frac{\partial v_\varphi}{\partial z}+\rho\frac{v_r v_\varphi}{r}=F_\varphi=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2 t_{r\varphi})$$

- 定常円盤を仮定すると

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(\rho r^2 v_r v_\varphi)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z v_\varphi)=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2 t_{r\varphi})$$

- 鉛直方向に積分

$$\frac{\partial}{\partial r}(\Sigma r^2 v_r v_\varphi)=\frac{\partial}{\partial r}(r^2 T_{r\varphi})$$

$$\Sigma=\int\rho dz \qquad T_{r\varphi}=\int t_{r\varphi}dz$$

- 動径方向に積分

$$\dot{M}(\ell-\ell_{\rm in})=-2\pi r^2 T_{r\varphi}$$

- ここで $\dot{M}=-2\pi r\Sigma v_r$ （降着率）

動径方向と鉛直方向の運動方程式

- 動径方向　$W = \int p dz$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\Sigma r v_r^2) - \Sigma\frac{v_\varphi^2}{r} = -\int \rho\frac{\partial\psi}{\partial r}dz - \frac{\partial W}{\partial r}$$

重力ポテンシャルの動径方向微分の鉛直方向の積分には注意が必要

$$v_r\frac{dv_r}{dr} + \frac{1}{\Sigma}\frac{dW}{dr} = \frac{v_\varphi^2}{r} - \frac{\partial\psi}{\partial r} - \frac{W}{\Sigma}\frac{d\ln\Omega_{\mathrm{k}}}{dr}$$

- 鉛直方向　$\dfrac{dp}{dz} = -\rho\dfrac{\partial\psi}{\partial z}$

鉛直方向に等温 ($p = \rho c_s^2$、$c_s =$ 一定) なら

$$\rho = \rho_0 \exp(-\frac{z^2}{H^2}) \qquad \Omega_k^2 H^2 = c_s^2 = \frac{W}{\Sigma}$$

エネルギー式

$$\rho T \frac{dS}{dt} = \rho \frac{de}{dt} + p\nabla \cdot v = q^{+} - q^{-}$$

- 加熱率

$$q^{+} = t_{r\varphi} r \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{v_\varphi}{r}\right)$$

- 定常円盤では

$$q_{\rm adv} = \rho T(\mathbf{v}\cdot\nabla)S = \rho(\mathbf{v}\cdot\nabla)e + p\nabla\mathbf{v} = \nabla[(\rho e + p)\mathbf{v}] - (\mathbf{v}\cdot\nabla)p$$

- 鉛直方向に積分

$$Q_{\rm adv} = \frac{1}{r}\frac{d}{dr}[r v_r (E+W)] - v_r \frac{dW}{dr} + W v_r \frac{d\ln H}{dr}$$

- 鉛直積分したエネルギー式

$$\boxed{Q_{\rm adv}} = \frac{W}{\Sigma}\frac{\dot{M}}{2\pi r^2}\xi = Q^{+} - Q^{-} = rT_{r\varphi}\frac{d\Omega}{dr} - Q^{-}$$

移流項

アルファモデル

- 粘性応力 $$t_{r\varphi} = \eta r \frac{d\Omega}{dr}$$

η は動粘性係数であり、$\eta = \rho\nu \sim \rho v_{turb}\ell_{turb}$

- v_{turb}～α'C_s　ℓ_{turb} ～ H とおくと η～α'$\rho C_s H$
- したがって　$t_{r\varphi}$ ～α' $\rho C_s H$(-3/2Ω)
- ΩH～C_s、ρC_s^2 ～P　より係数をαとして

$$t_{r\varphi} = -\alpha P$$

- Shakura and Sunyaev 1973では磁気乱流に起因する場合についても論じている

定常降着円盤の基礎方程式 (Matsumoto et al. 1984)

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

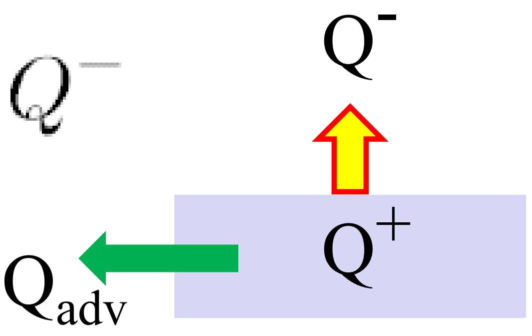
$$v_r \frac{dv_r}{dr} + \frac{1}{\Sigma}\frac{dW}{dr} = \frac{\ell^2 - \ell_{\mathrm{K}}^2}{r^3} - \frac{W}{\Sigma}\frac{d\ln\Omega_{\mathrm{K}}}{dr}$$

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

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

移流項

$$\Omega_{\mathrm{K}}^2 H^2 = \frac{W}{\Sigma}$$



移流を考慮したブラックホール降着円盤モデル

大学院生のときに書いた論文

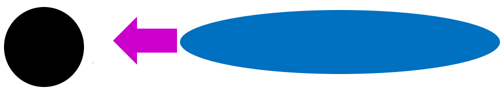
Publ. Astron. Soc. Japan **36**, 71–85 (1984)

Viscous Transonic Flow around the Inner Edge of Geometrically Thin Accretion Disks

Ryoji MATSUMOTO, Shoji KATO, Jun FUKUE, and Atsuo T. OKAZAKI

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

(Received 1983 July 11; accepted 1983 December 5)



ブラックホールに近い
領域の定常解を求めた。

Abstract

The effect of viscosity on the flow around the inner edge of an accretion disk surrounding a black hole is studied. Geometrically thin disks are assumed and the "alpha viscous law" is adopted. Transonic solutions which satisfy the outer boundary condition of the Keplerian disk as well as the condition of passing through a critical point are obtained numerically. It is found that in the case of large viscosity ($\alpha \gtrsim 0.05$) transonic solutions pass through a nodal-type critical point outside the radius of the marginally stable circular orbit.

Key words: Accretion disk models; Black holes; Transonic flow.

ブラックホール近傍の粒子運動

- シュバルツシルト時空中の粒子運動のラグラジアン　r_g: シュバルツシルト半径

$$L = \frac{m}{2} g_{\mu\nu} \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu = \frac{m}{2}\left[(1-\frac{r_g}{r})c^2\dot{t}^2 - (1-\frac{r_g}{r})^{-1}\dot{r}^2 - r^2\dot{\theta}^2 - r^2\sin^2\theta\dot{\varphi}^2\right]$$

- 4元速度 $u^\mu = dx^\mu/d\tau$ 4元運動量 $p^\mu = mcu^\mu$

$$p_t = \frac{\partial L}{\partial c\dot{t}} = m(1-\frac{r_g}{r})c\dot{t} = \frac{E}{c} \qquad p_r = \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} = -m(1-\frac{r_g}{r})^{-1}\dot{r}$$

$$p_\varphi = \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} = -mr^2\dot{\varphi} = -m\ell$$

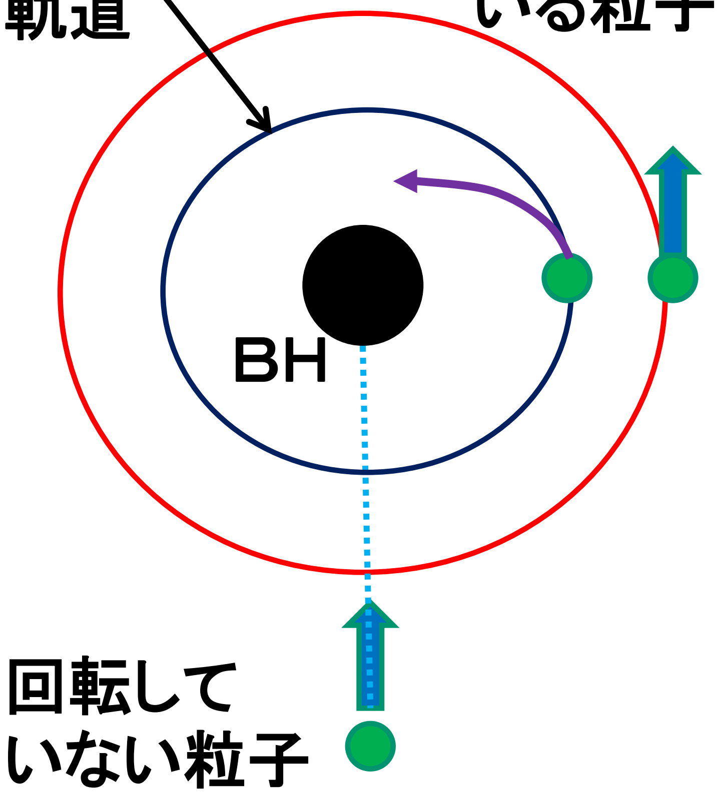
$p^\mu p_\mu = m^2c^2$ に代入

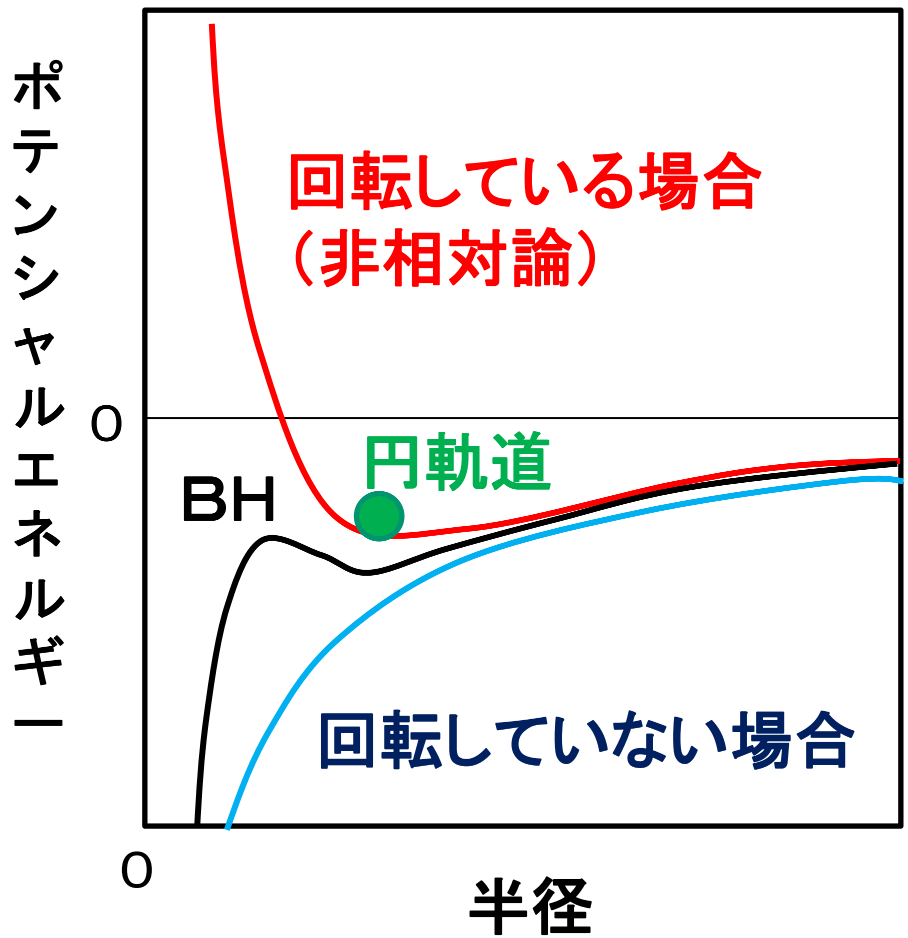
$\dot{r}$ について解くと

$$\frac{1}{2}\dot{r}^2 = \frac{(\frac{E}{mc})^2 - c^2}{2} - \boxed{\left[-\frac{GM}{r}\left(1+\frac{\ell^2}{c^2r^2}\right) + \frac{\ell^2}{2r^2}\right]}$$

有効ポテンシャル ψ_{eff}

ブラックホールに落下する粒子





近似ポテンシャル

- 擬ニュートンポテンシャル

$$\psi = -\frac{GM}{r - r_g}$$

- 有効ポテンシャル

$$\psi_{\mathrm{eff}} = -\frac{GM}{r - r_g} + \frac{\ell^2}{2r^2}$$

練習：擬ニュートンポテンシャルの臨界安定軌道半径が $3r_g$ であることを示しなさい。
練習：擬ニュートンポテンシャルの場合のケプラー回転の角速度 Ω_{K} を求めなさい。

遷音速解

- 運動方程式

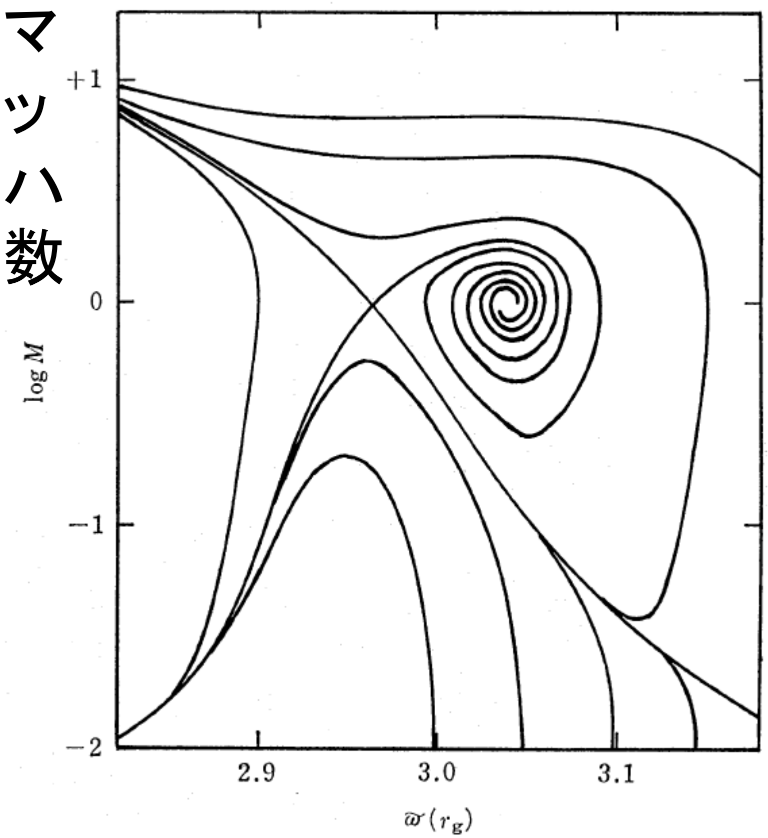
$$v_r \frac{dv_r}{dr} + \frac{c_s^2}{\Sigma}\frac{d\Sigma}{dr} = \frac{\ell^2 - \ell_{\mathrm{K}}^2}{r^3} - c_s^2 \frac{d ln \Omega_{\mathrm{K}}}{dr}$$

- 質量保存則　$\dot{M} = -2\pi r \Sigma v_r$
- 運動方程式に代入してΣを消去

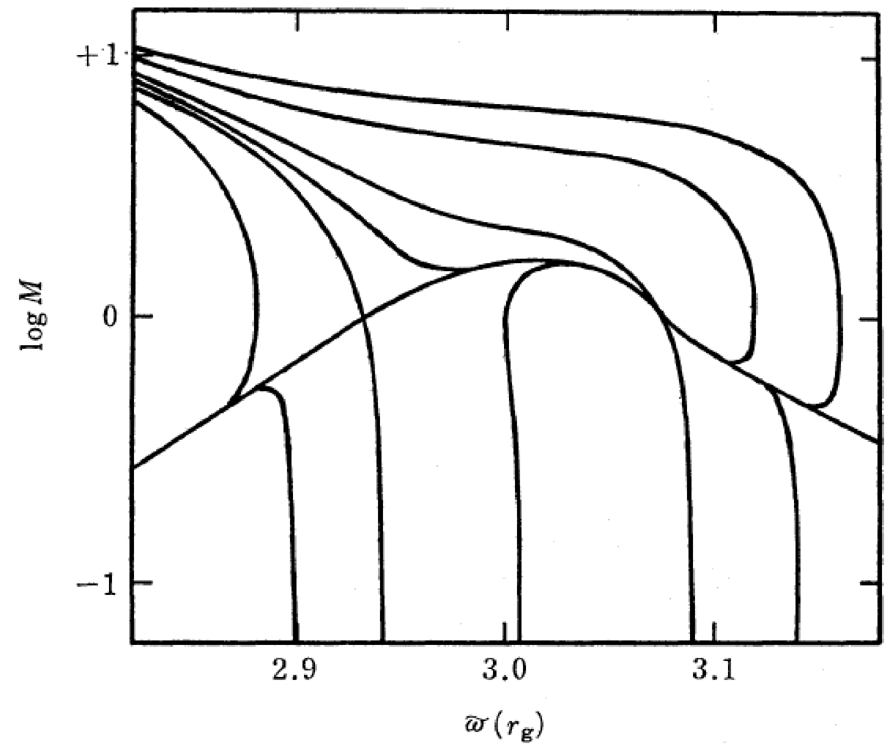
$$\frac{dv_r}{dr} = \frac{\dfrac{\ell^2 - \ell_{\mathrm{K}}^2}{r^3} - c_s^2 \dfrac{d ln (\Omega_{\mathrm{K}}/r)}{dr}}{v_r - \dfrac{c_s^2}{v_r}} = \frac{N}{D}$$

- 遷音速解：　D=0 のとき N=0

遷音速解の例



α < 0.1のとき



α > 0.1のとき

Matsumoto et al. 1984

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)

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

移流による熱輸送が輻射冷却にくらべて大きいとき

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

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

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

ブラックホール降着円盤の熱振動

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。

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

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

Fumio HONMA[1], Ryoji MATSUMOTO[2], and Shoji KATO[1]

[1] *Department of Astronomy, Faculty of Science, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606*

[2] *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

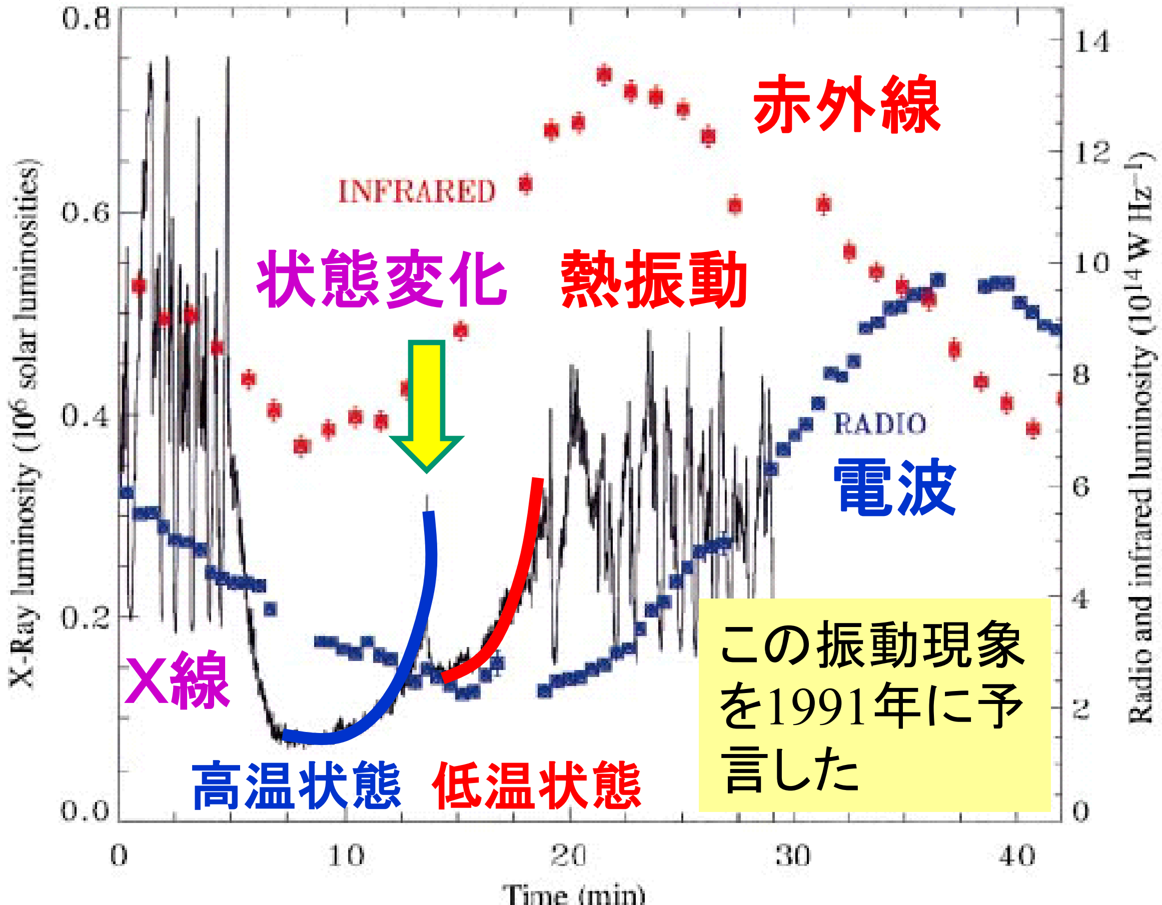
急激な加熱

落下物質が円盤に溜まる

間欠泉のような現象

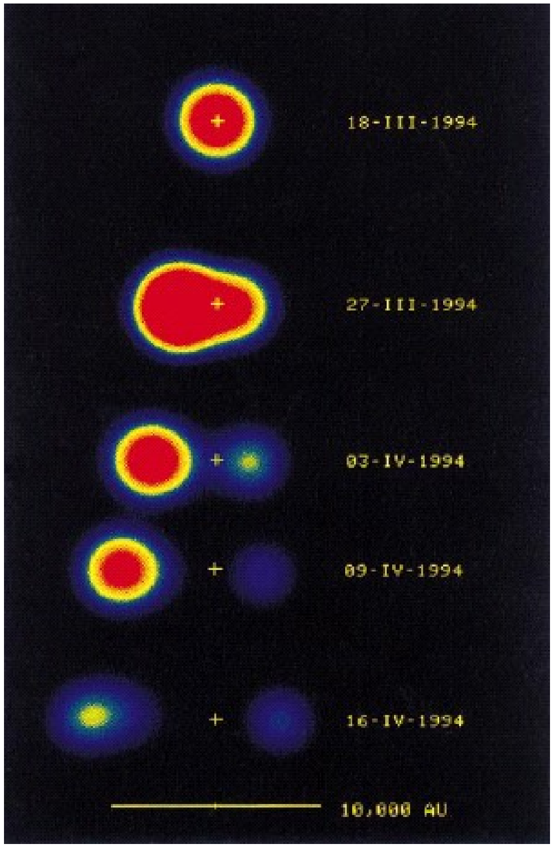
マイクロクエーサーGRS1915＋105

光度



時刻

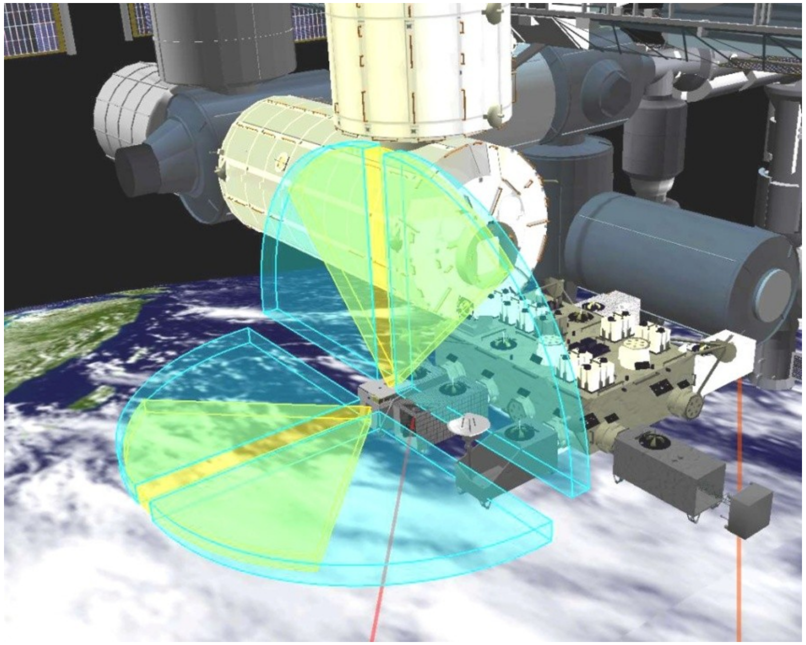
GRS1915＋105の時間変動



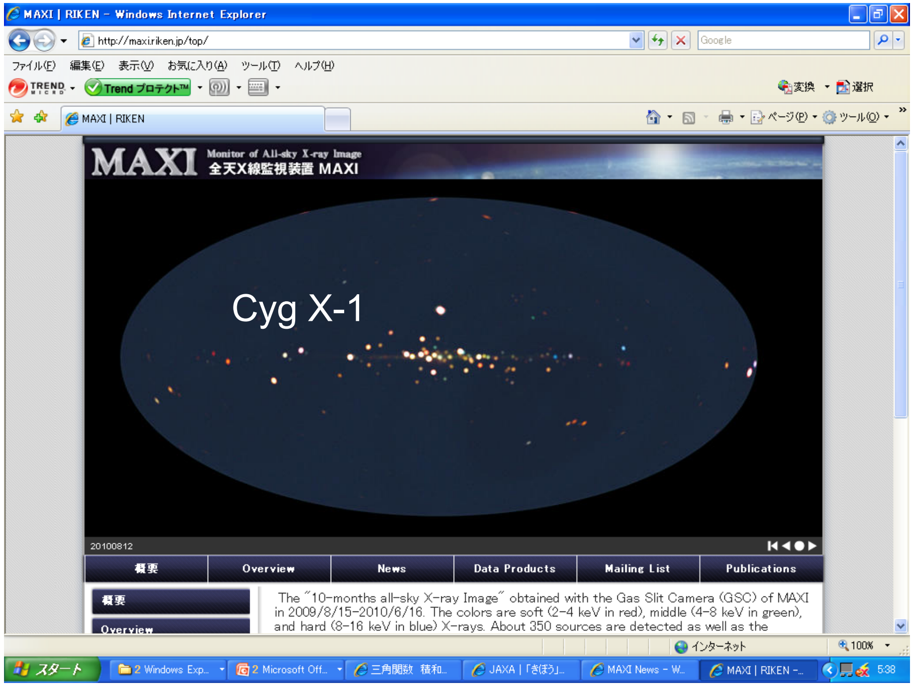
状態変化時の噴出現象
Mirabel and Rodriguez 1998

ブラックホール降着円盤の状態遷移

全天X線モニタMAXI (2009-)

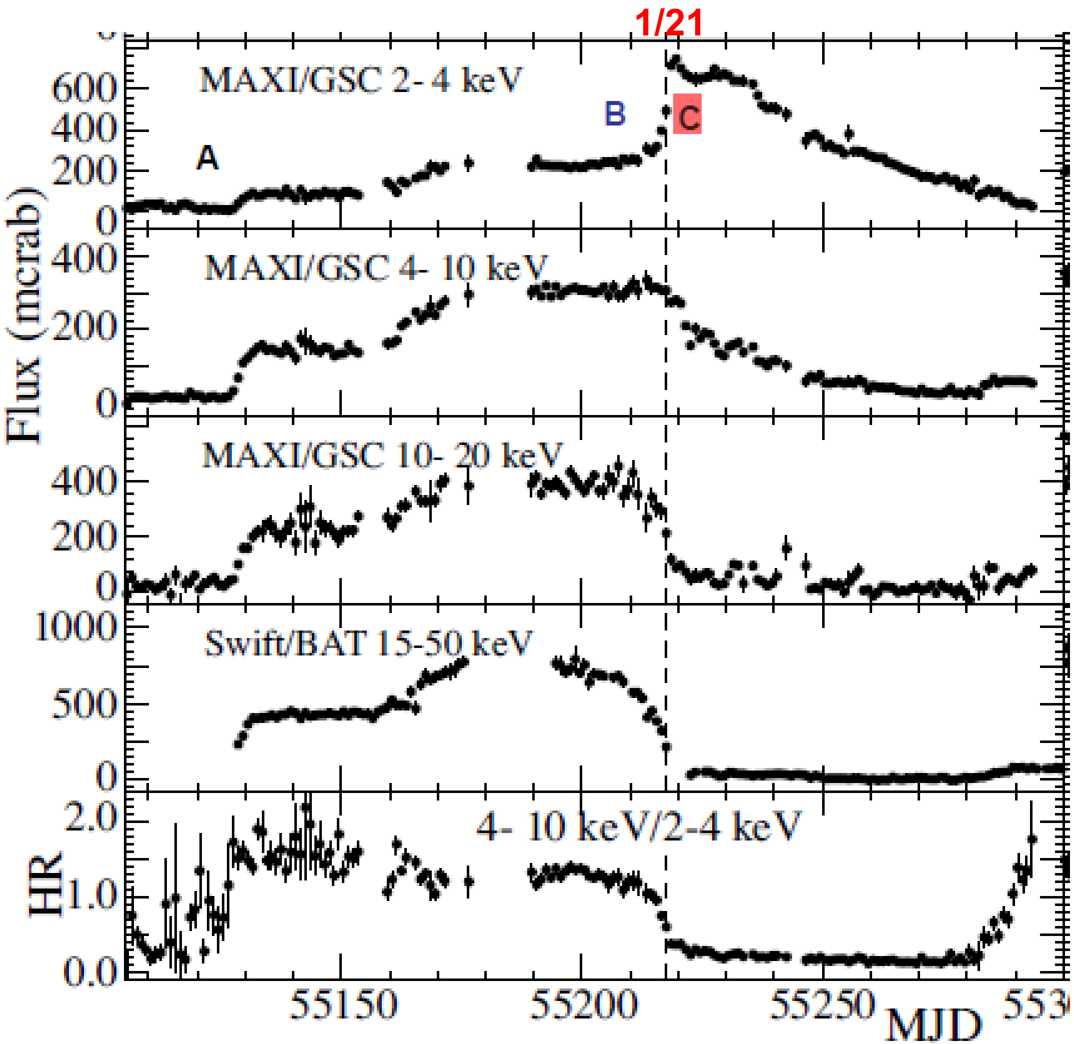


国際宇宙ステーションの日本の実験モジュール「きぼう」に取付

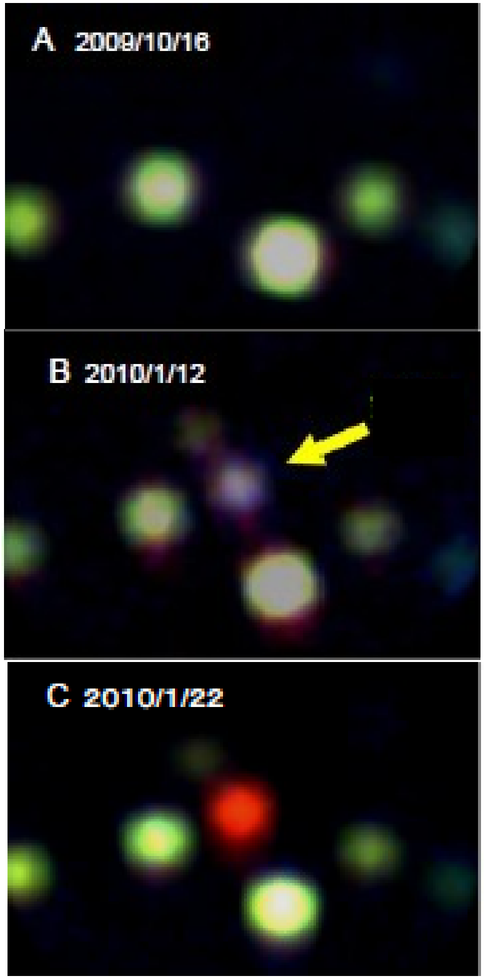


http://maxi.riken.jp/

MAXIで観測したブラックホール新星 XTE J1752-223



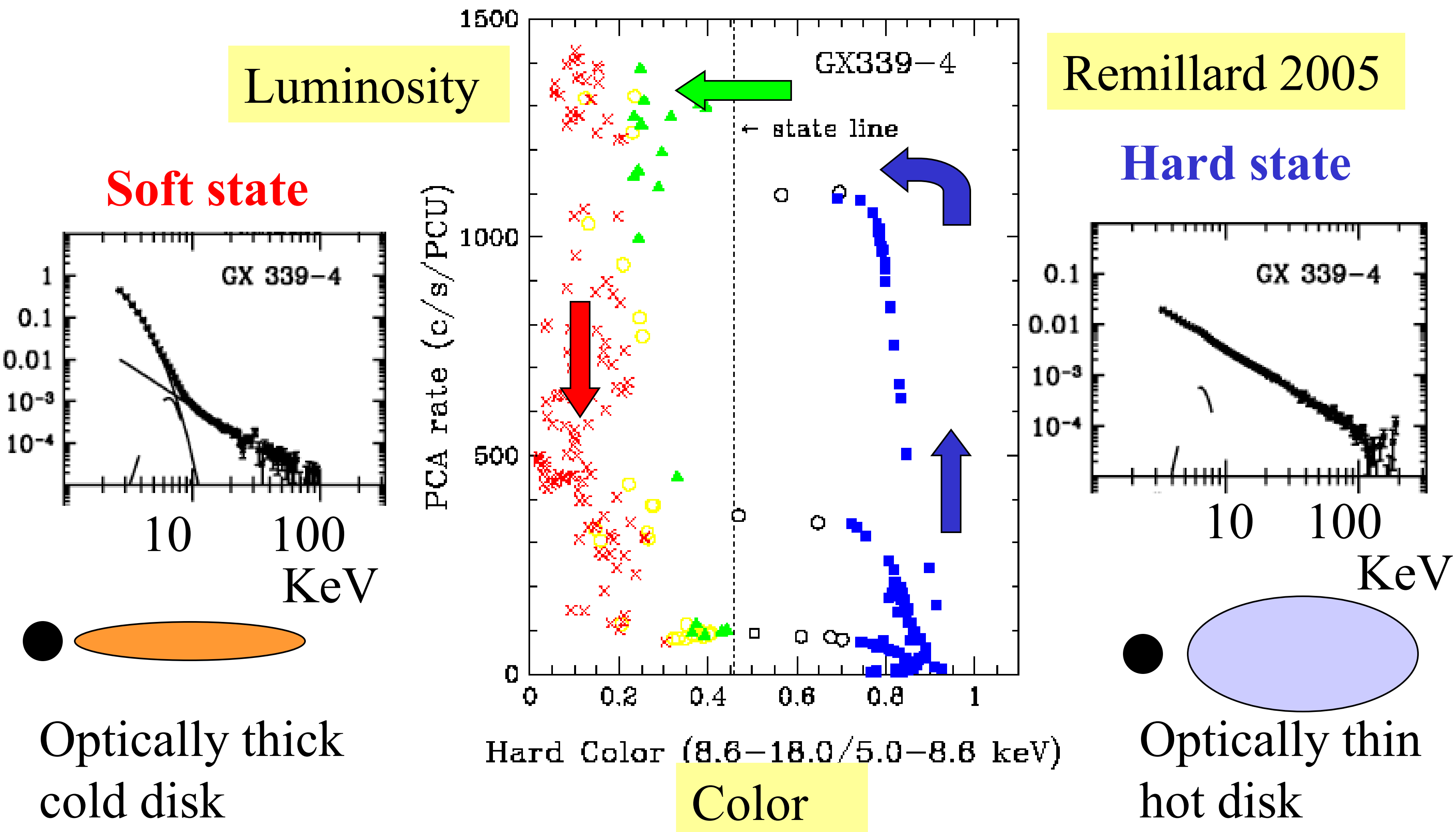
Nakahira et al. 2010



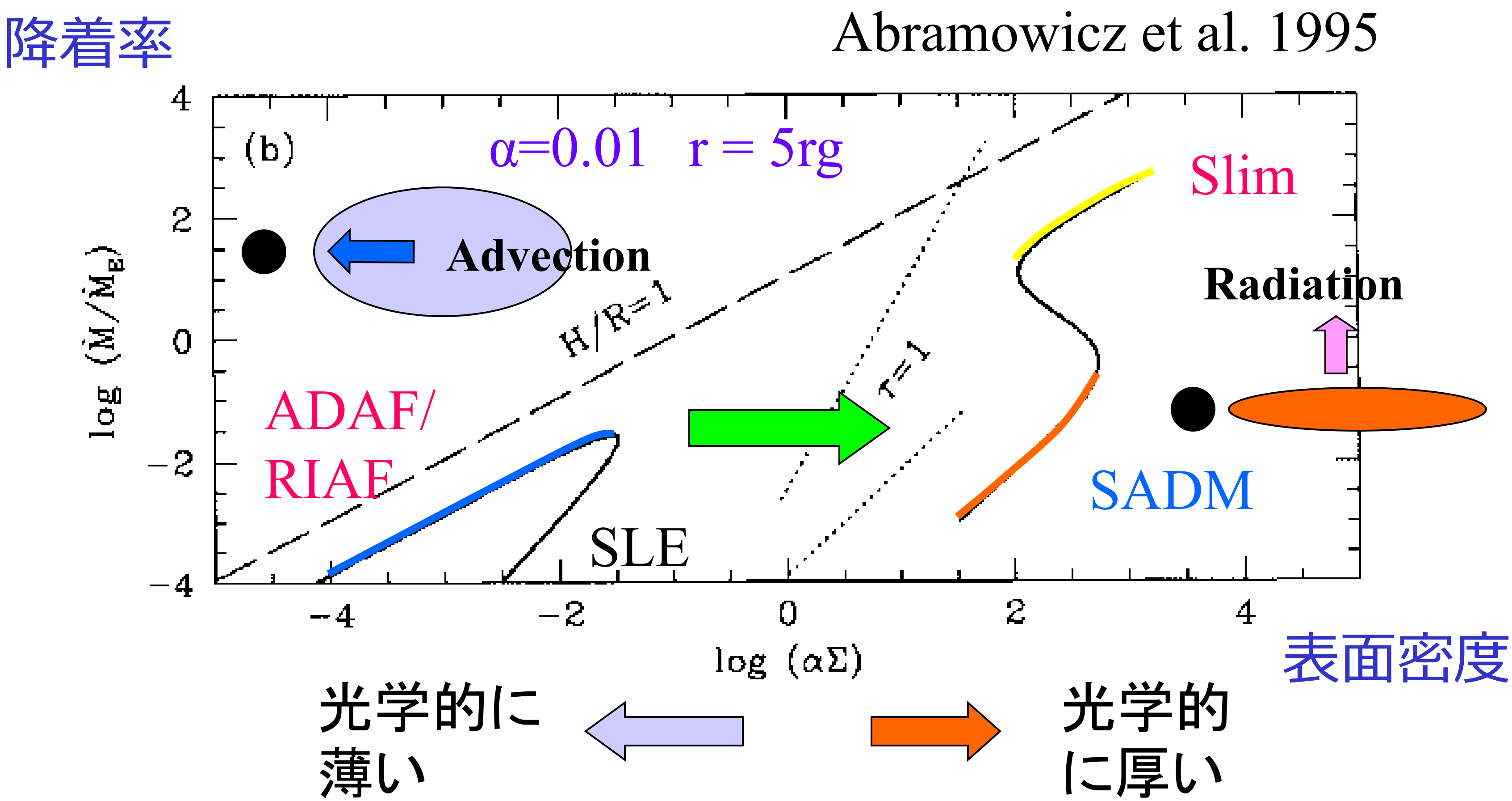
MAXI Science News #17

MAXIで観測されたブラックホール新星XTE J1752-223の進化

色ー光度図上の進化

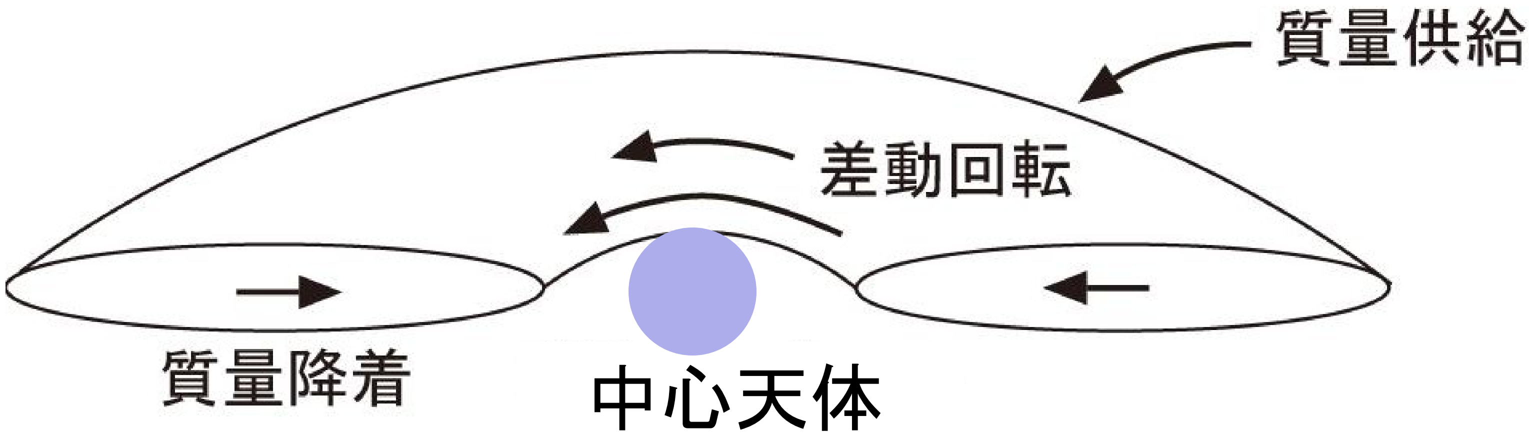

Luminosity
Remillard 2005
Soft state
Hard state
GX 339−4
GX339−4
← state line
PCA rate (c/s/PCU)
Hard Color (8.6−18.0/5.0−8.6 keV)
Color
KeV
KeV
Optically thick
cold disk
Optically thin
hot disk

状態遷移の理論モデル



降着率
Abramowicz et al. 1995
(b)
α=0.01 r = 5rg
Slim
Advection
Radiation
H/R=1
τ=1
ADAF/
RIAF
SADM
SLE
log (Ṁ/Ṁ_E)
log (αΣ)
表面密度
光学的に
薄い
光学的
に厚い

降着円盤の角運動量輸送問題

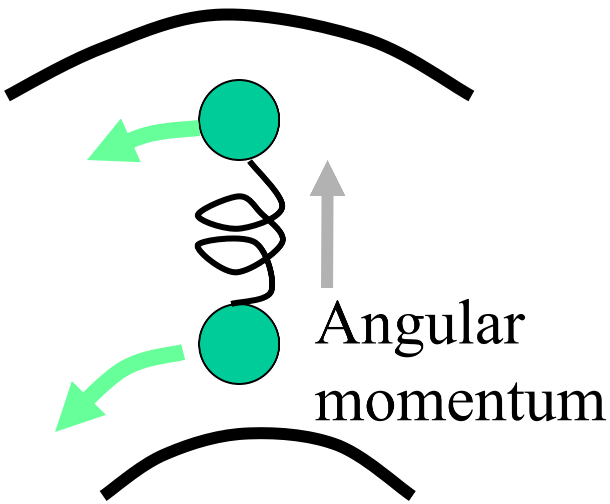


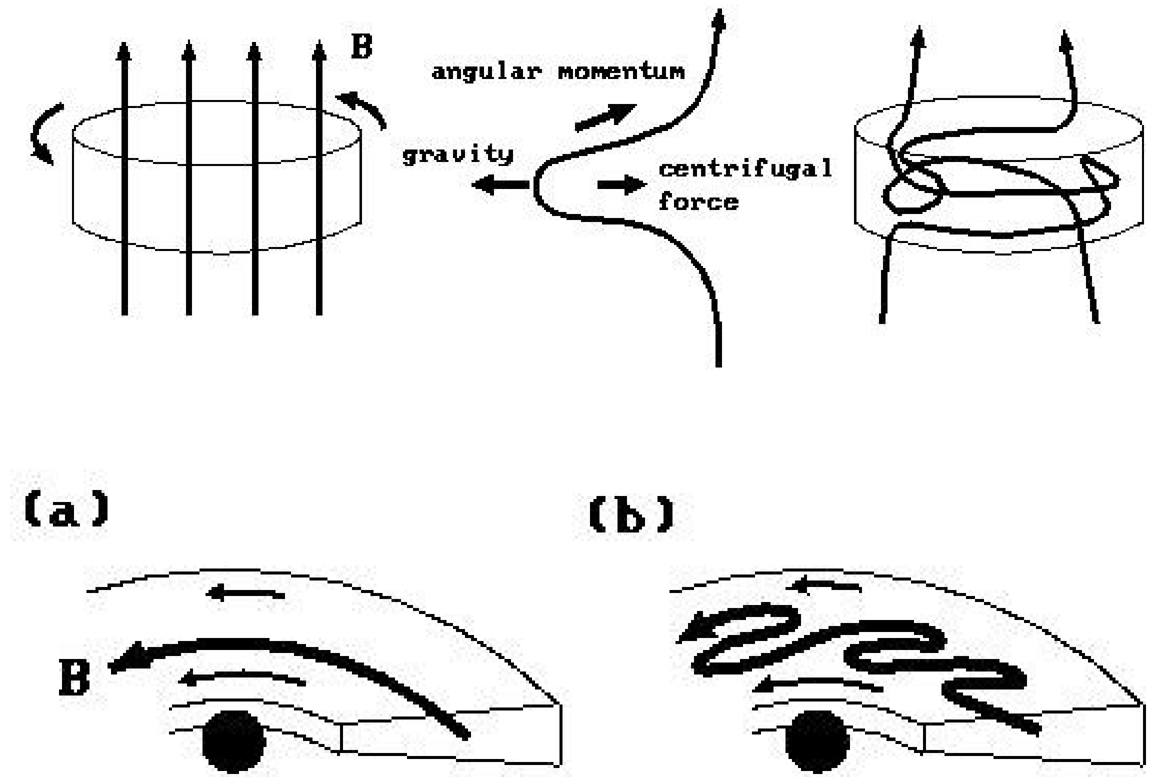
回転物質が落下するためには角運動量を失う必要がある。

標準理論では粘性ストレス　$T_{r\varphi}=-\alpha P$　と仮定

- 観測とモデルの比較から　$\alpha = 0.01 \sim 0.1$
- 流体乱流では　$\alpha = O(0.001)$　　too small !

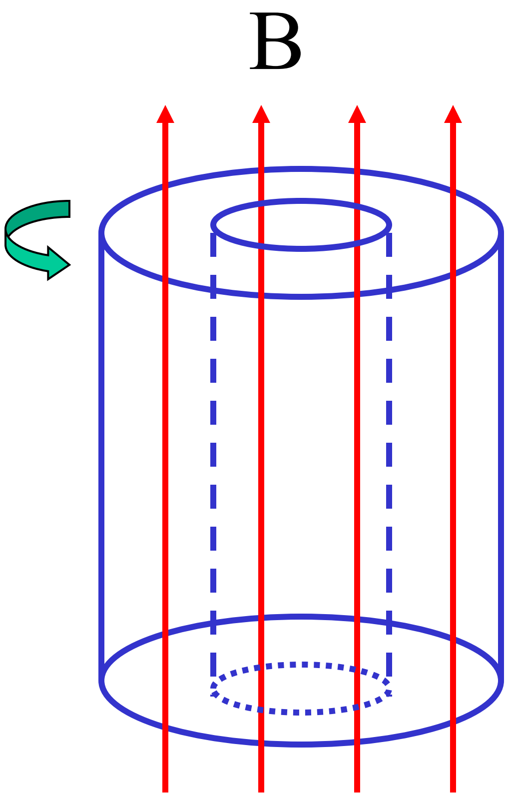
差動回転円盤における磁気回転不安定性





Balbus and Hawley (1991)

磁気回転不安定性の円筒モデルシミュレーション



- 重力と初期角運動量分布は動径座標rのみに依存
- 円筒プラズマはポリトローピックな状態方程式 $P=K\rho^{1+1/n}$にしたがい、回転平衡状態にある
- 円筒プラズマの外は初期には等温で静止

磁気流体方程式

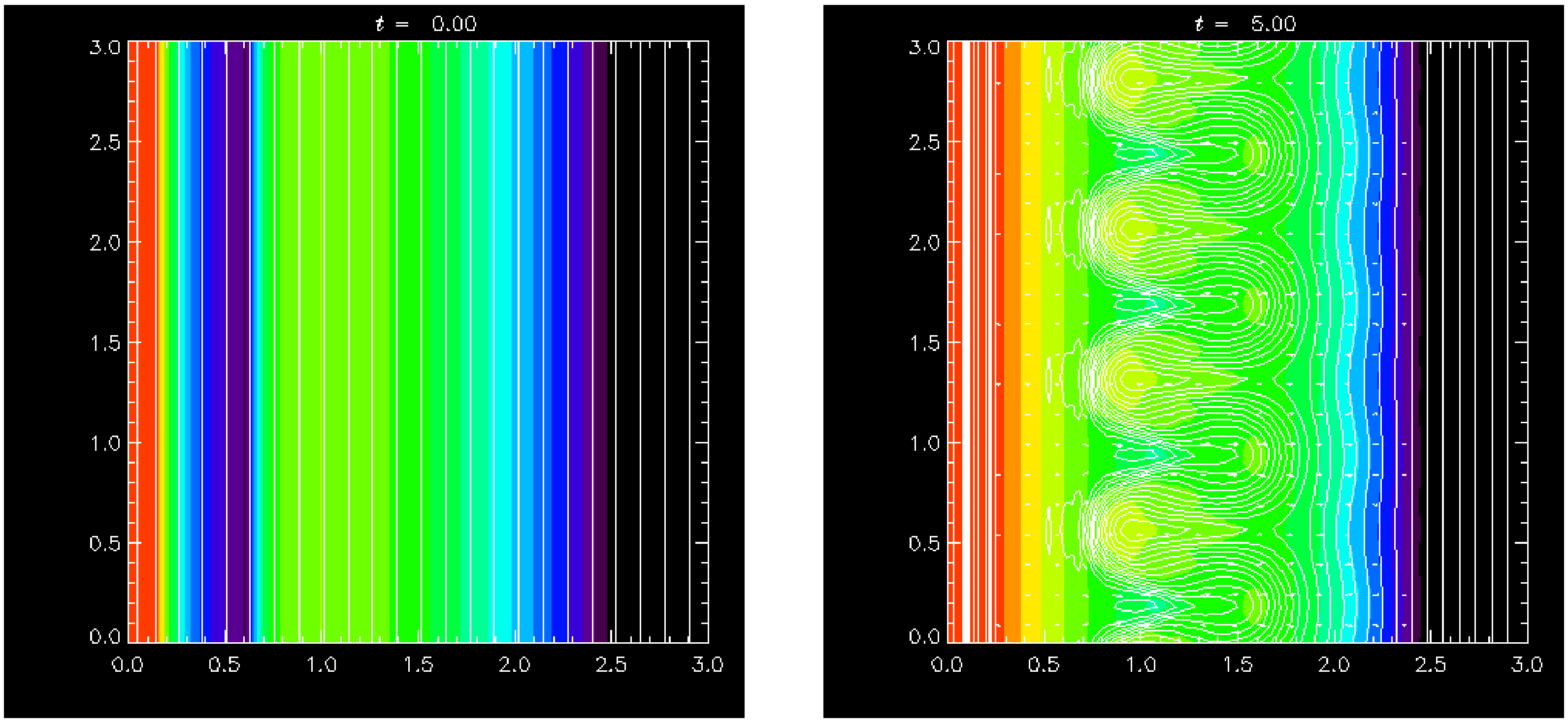
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0$$

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

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

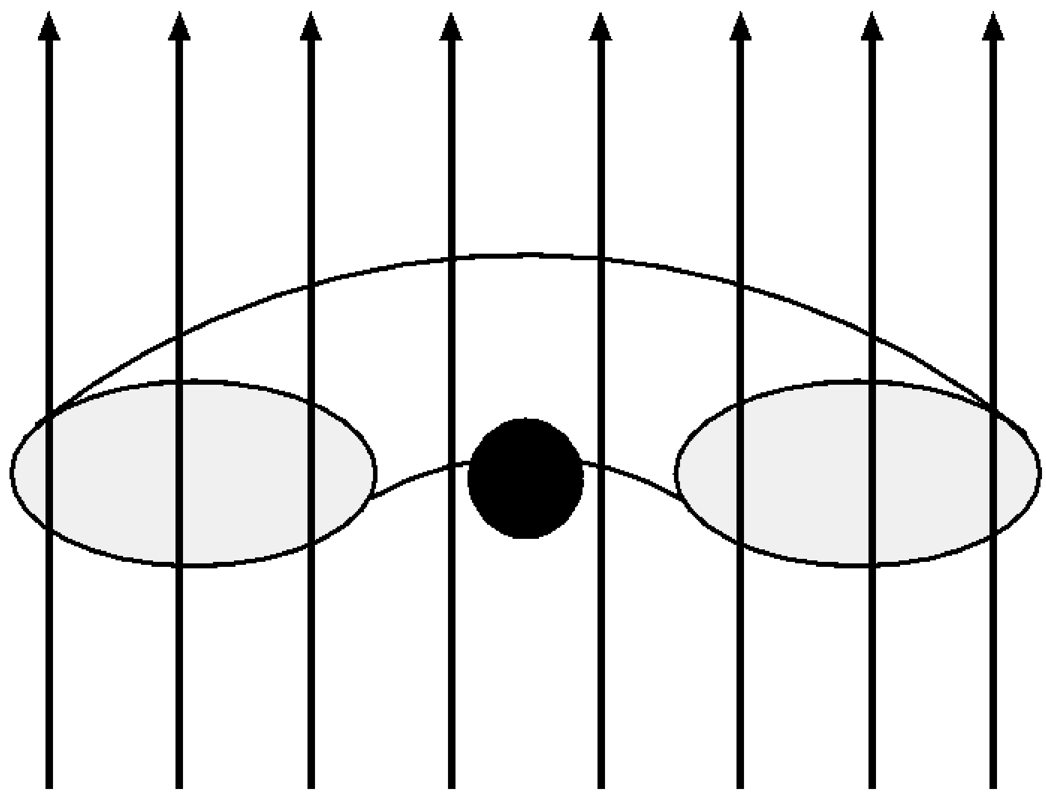
$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\rho \varepsilon \mathbf{v}) + P \nabla \mathbf{v} = Q_J + Q_{vis} - Q_{rad}$$

シミュレーション例

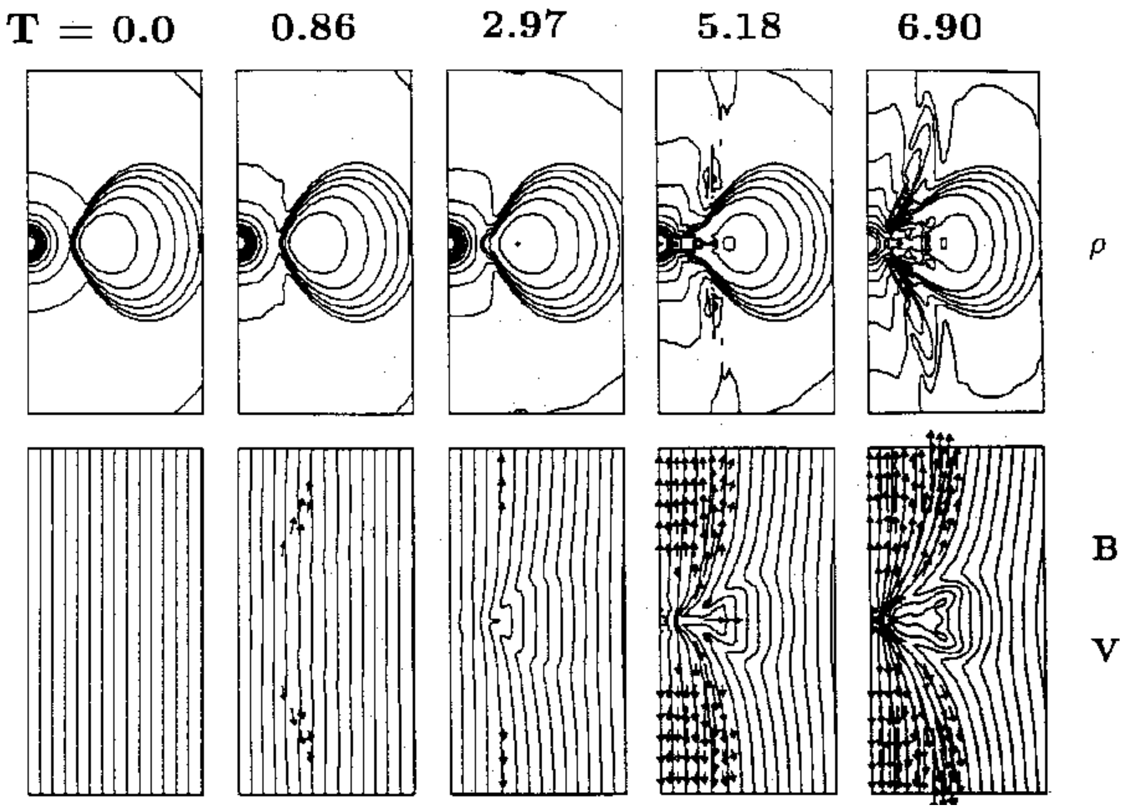


軸対称円筒モデルにおける磁気回転不安定性の時間発展。実線は磁力線、カラーは密度分布。

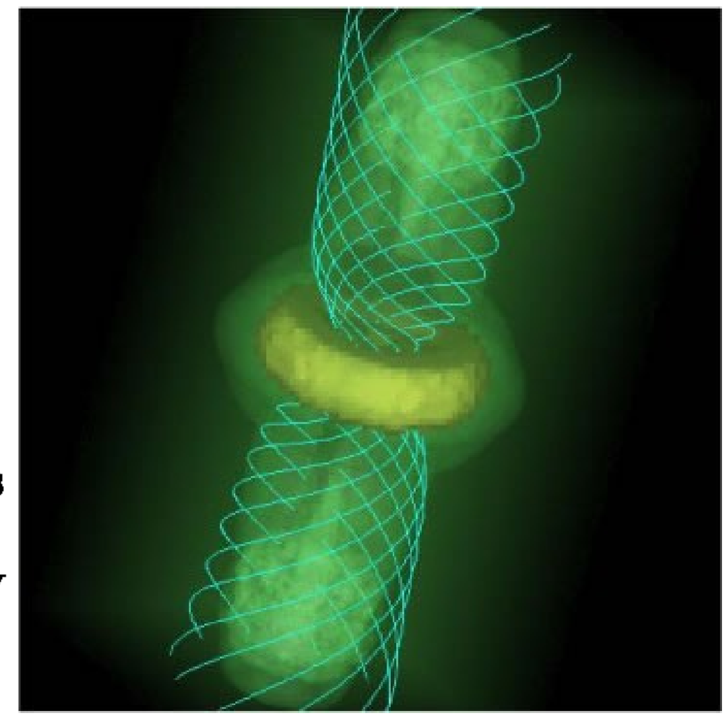
鉛直磁場に貫かれたトーラスの大局的MHD数値実験



軸対称２次元シミュレーション結果

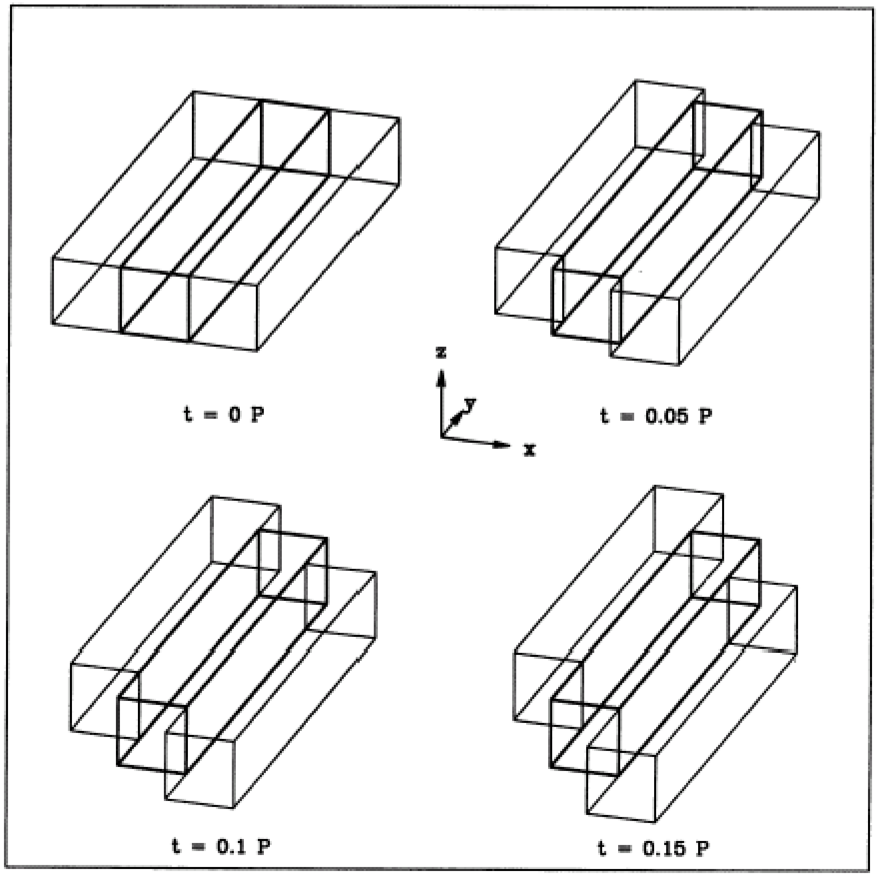


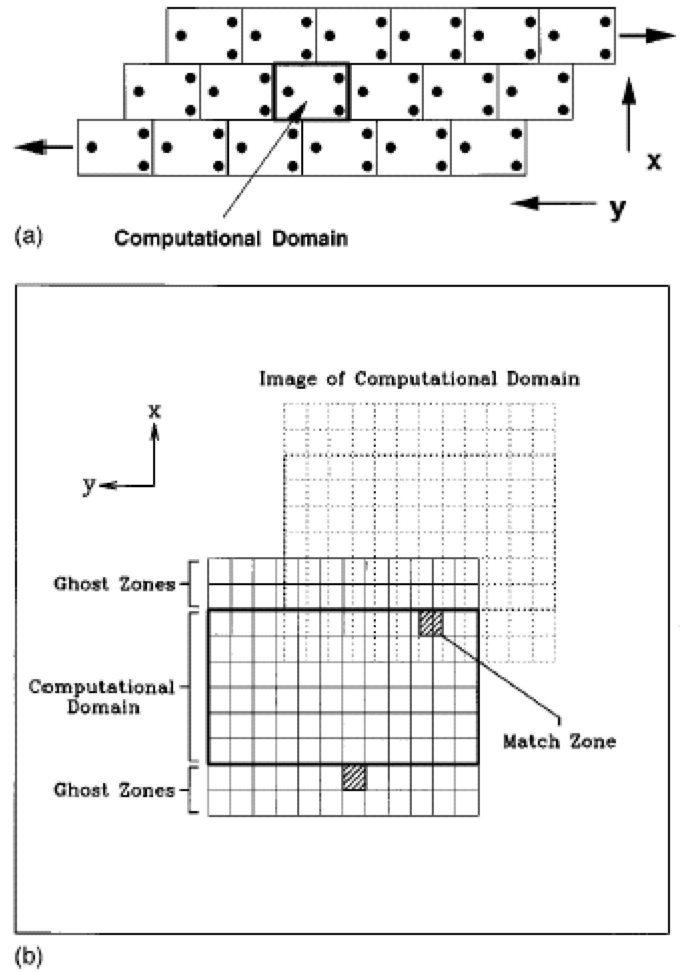
Matsumoto et al. 1996



Kuwabara et al. 2000

局所シアリングボックス近似

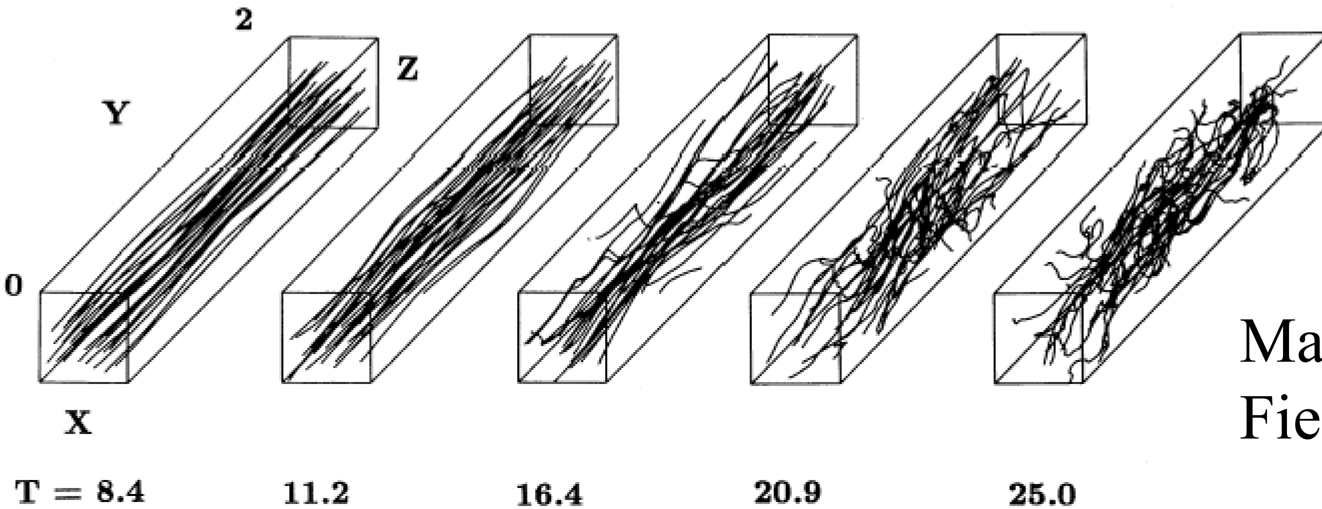




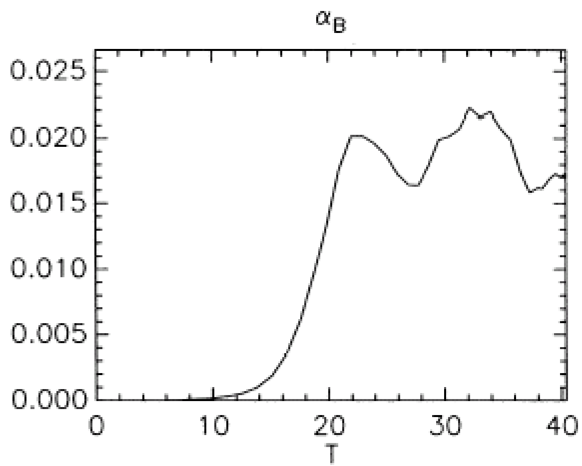
Hawley et al. 1995, ApJ 440, 742

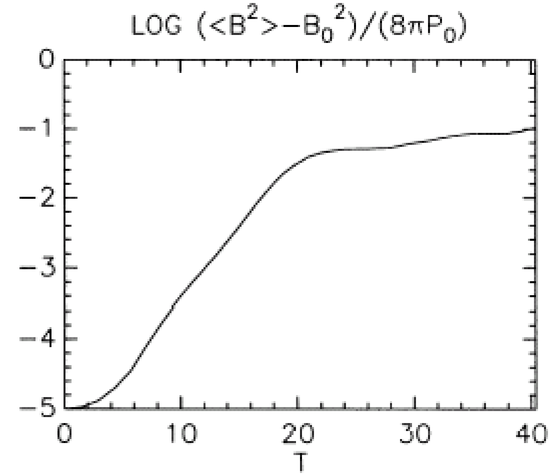
Shearing periodic boundary condition

３次元MHDシミュレーション例



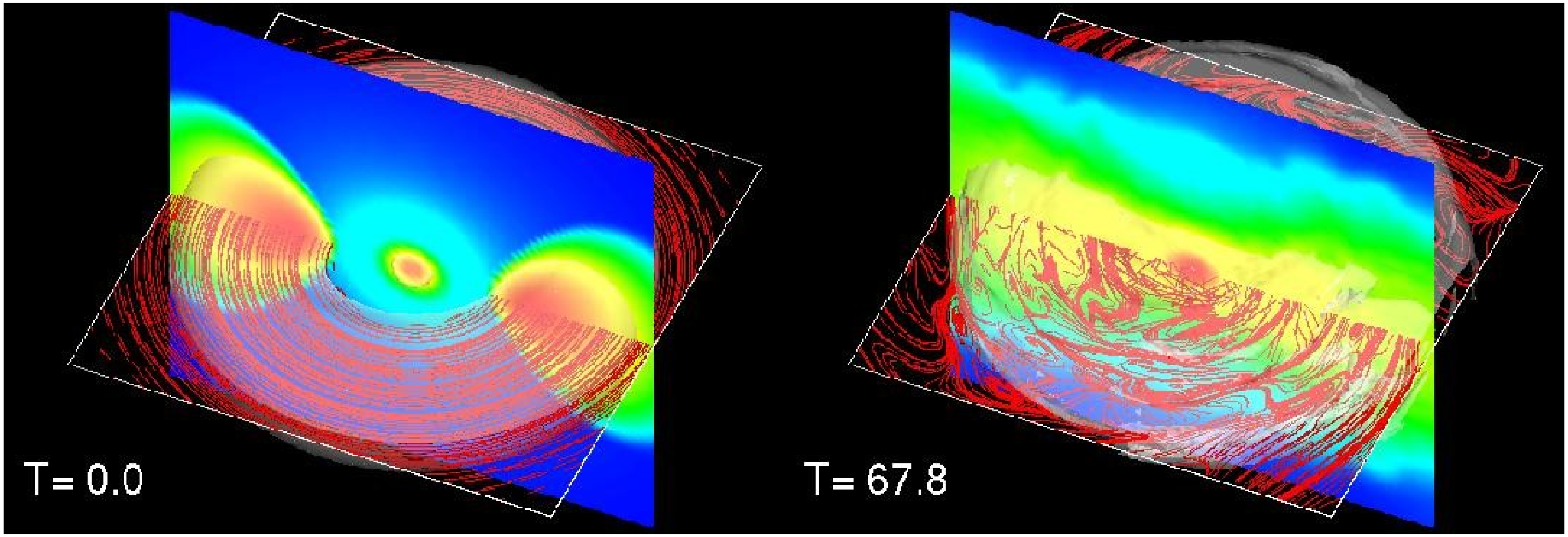
Magnetic
Field Lines





Matsumoto
and Tajima
1995, ApJ
445, 767

回転トーラスの大局的3次元MHDシミュレーション



Initial Condition

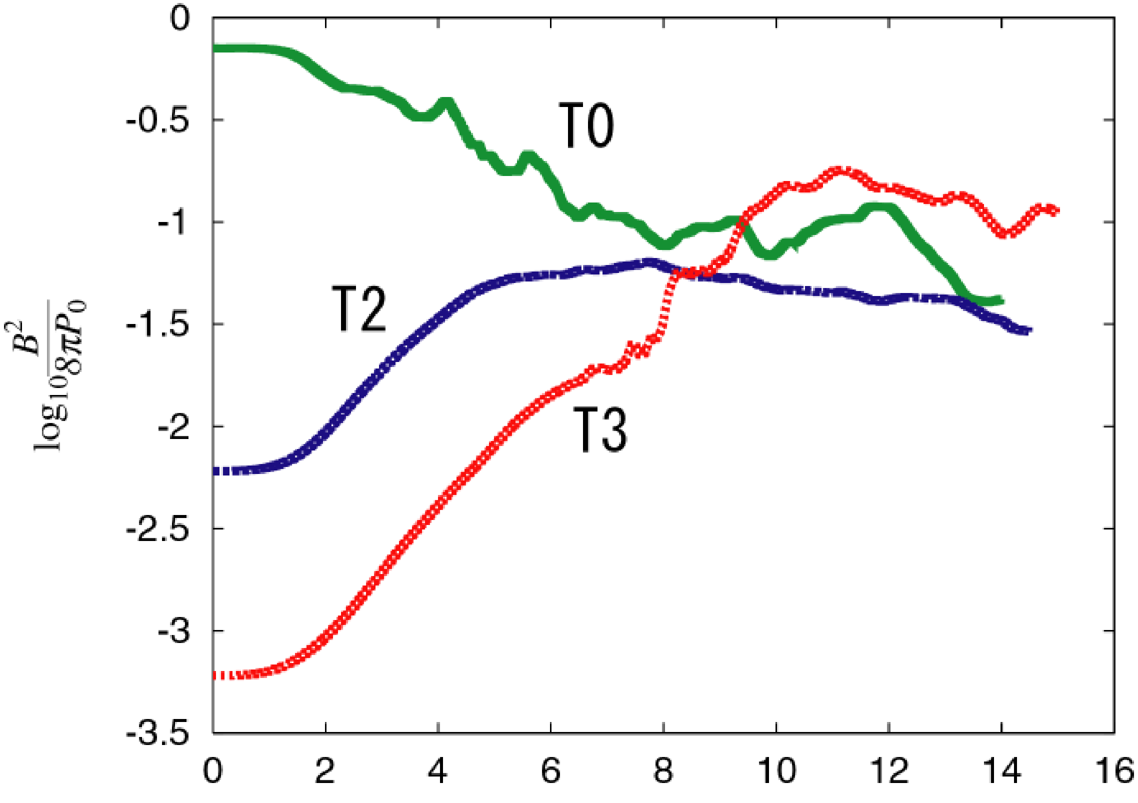
β = Pgas/Pmag=100

After 10 Rotation Period

200*64*240 grid points

Matsumoto 1999

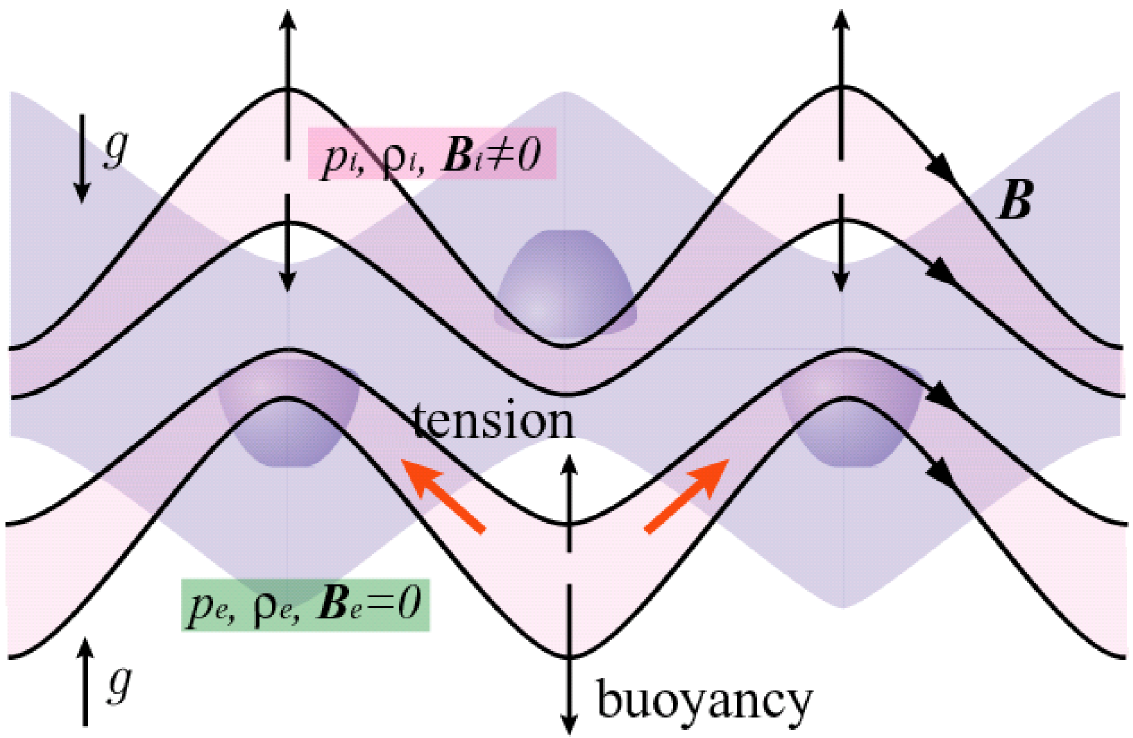
Amplification of Magnetic Energy



$\beta \sim 10$

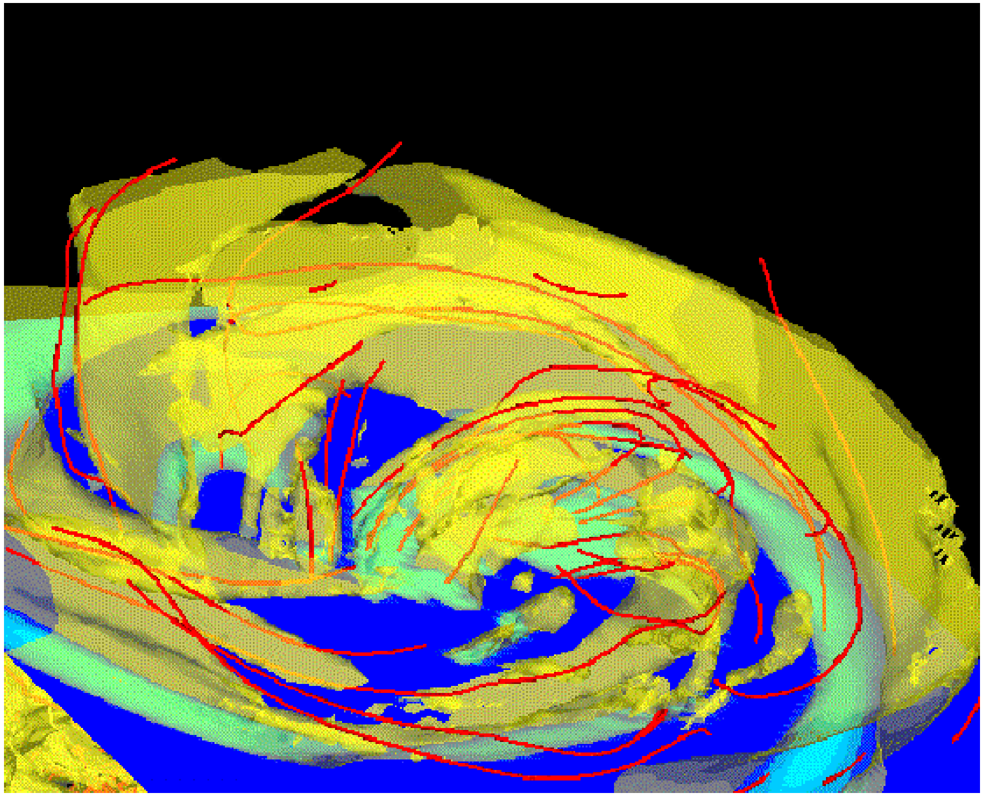
ORBIT

パーカー不安定性による磁束流出



Parker (1966), Matsumoto et al. (1988)

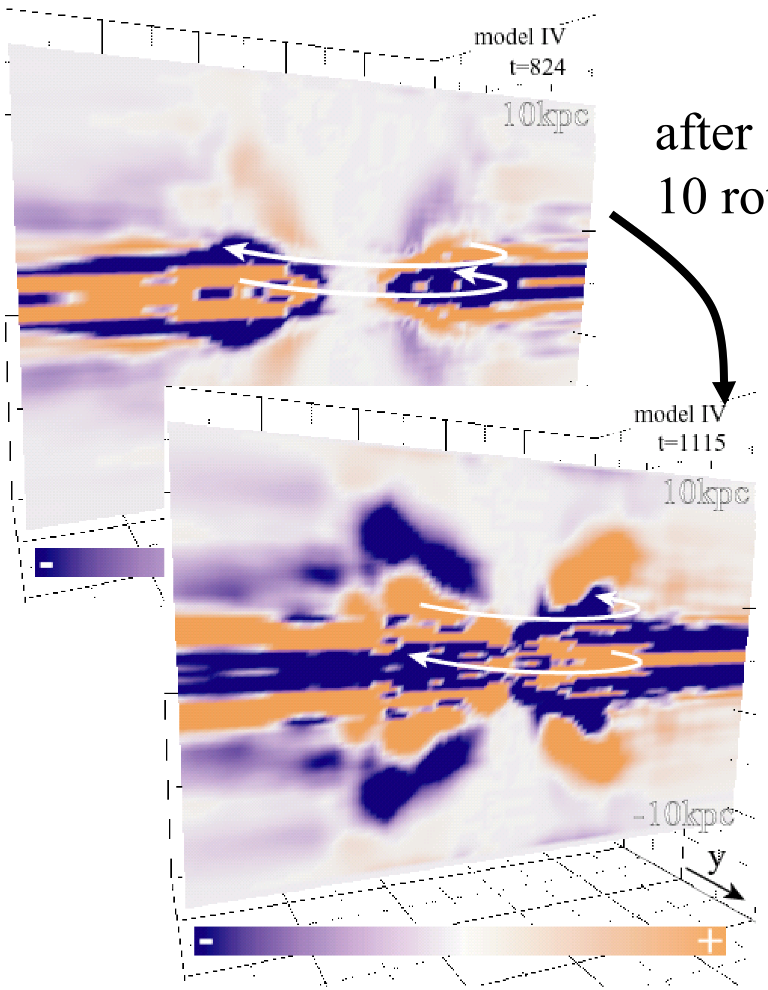
円盤コロナ中の磁気ループ形成



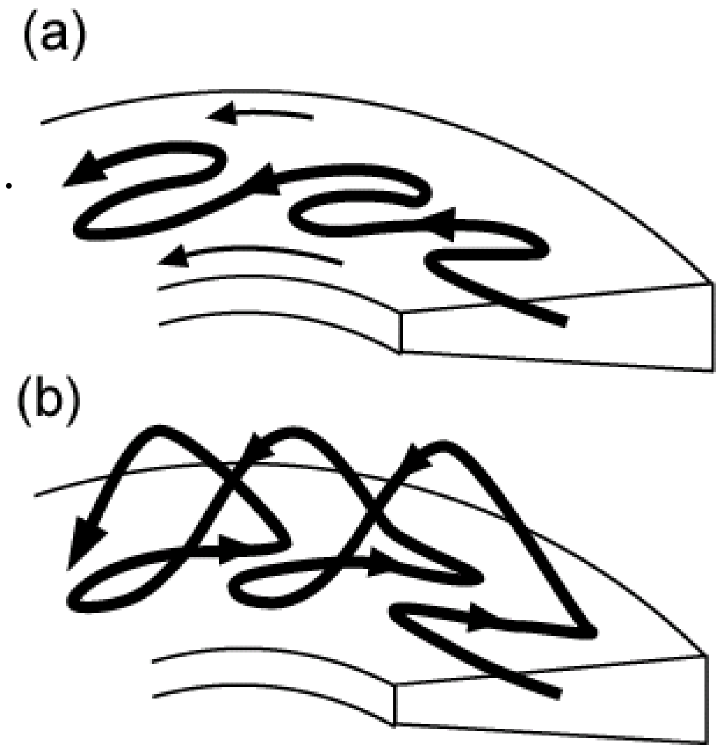
Machida et al. 2000

Magnetic Field Lines and Isosurface of Magnetic Field Strength for a model Starting from $\beta = 1$

円盤ダイナモシミュレーション



after
10 rotation…

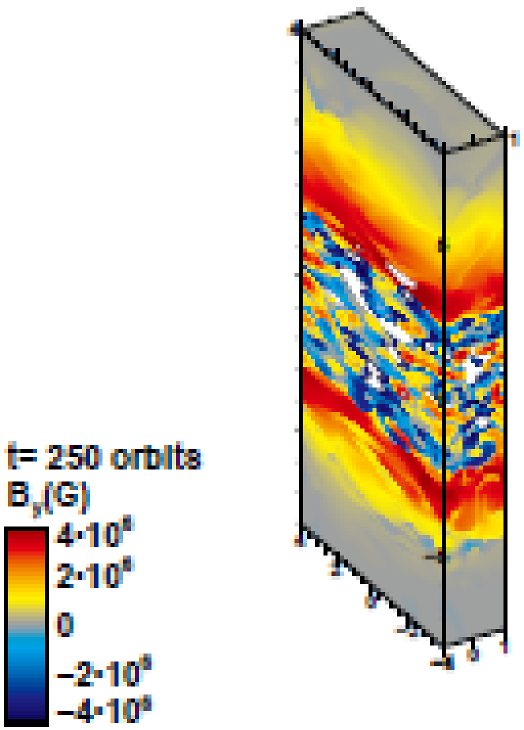


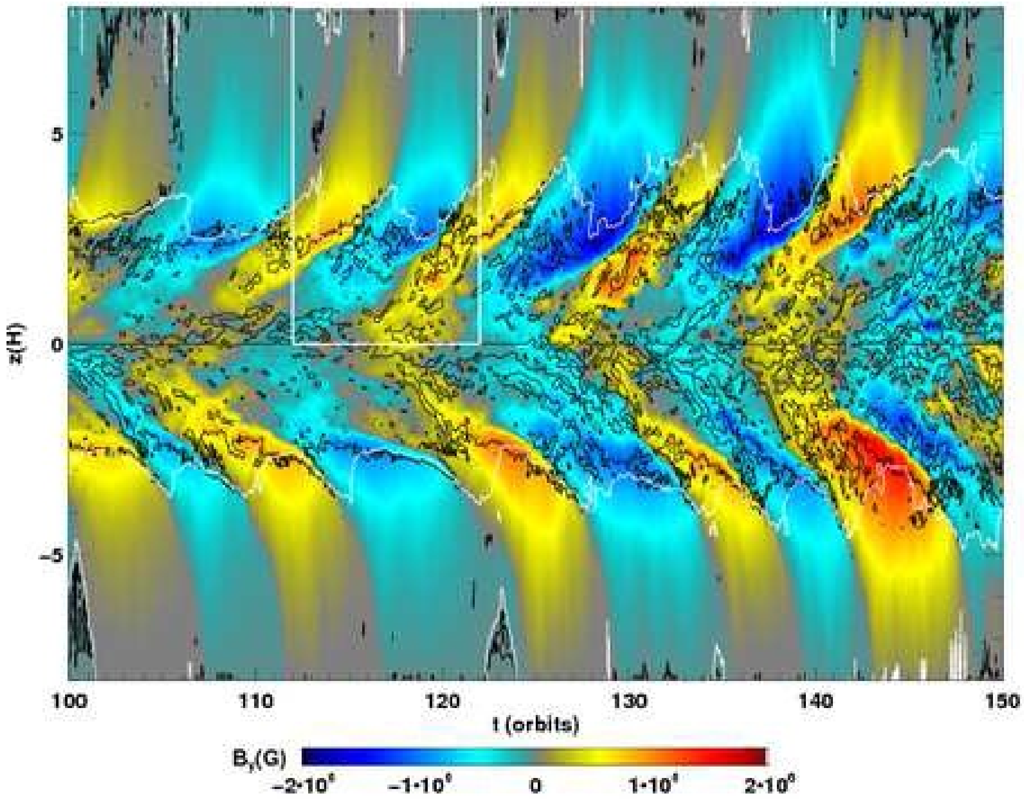
(a) Growth of MRI

(b) Growth of Parker Instability

Nishikori et al. 2006

局所モデルによる円盤ダイナモ計算



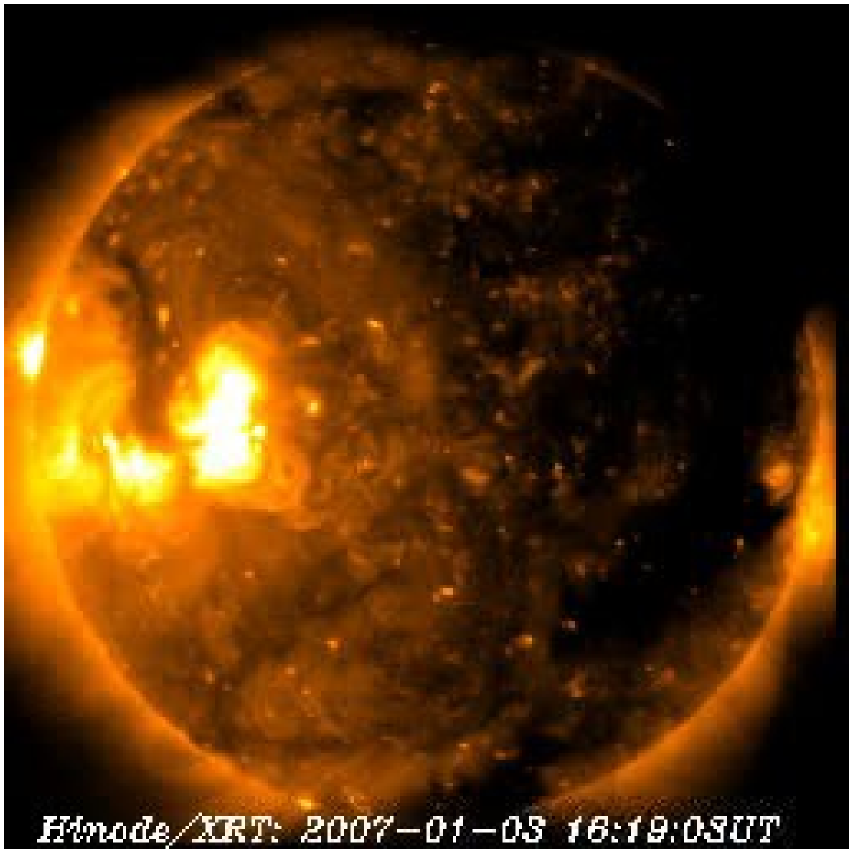


方位角磁場分布とその時間変化　白線:β＝1

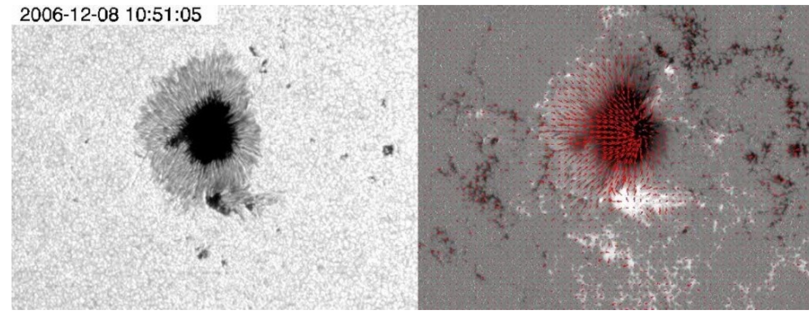
黒線:　$d\ln|B|/dz < 0$

Shi et al. 2010　局所3次元MHD計算結果

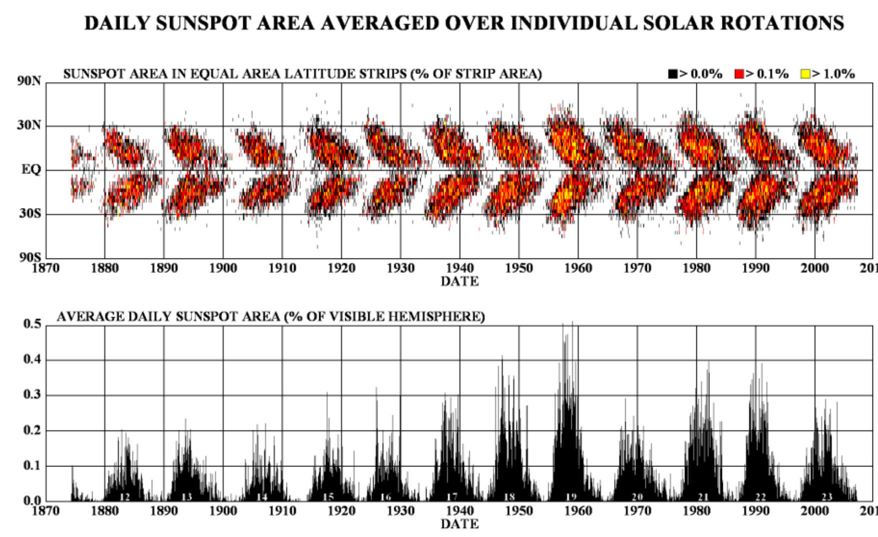
太陽活動のバタフライダイヤグラム



X-ray Image by HINODE Satellite

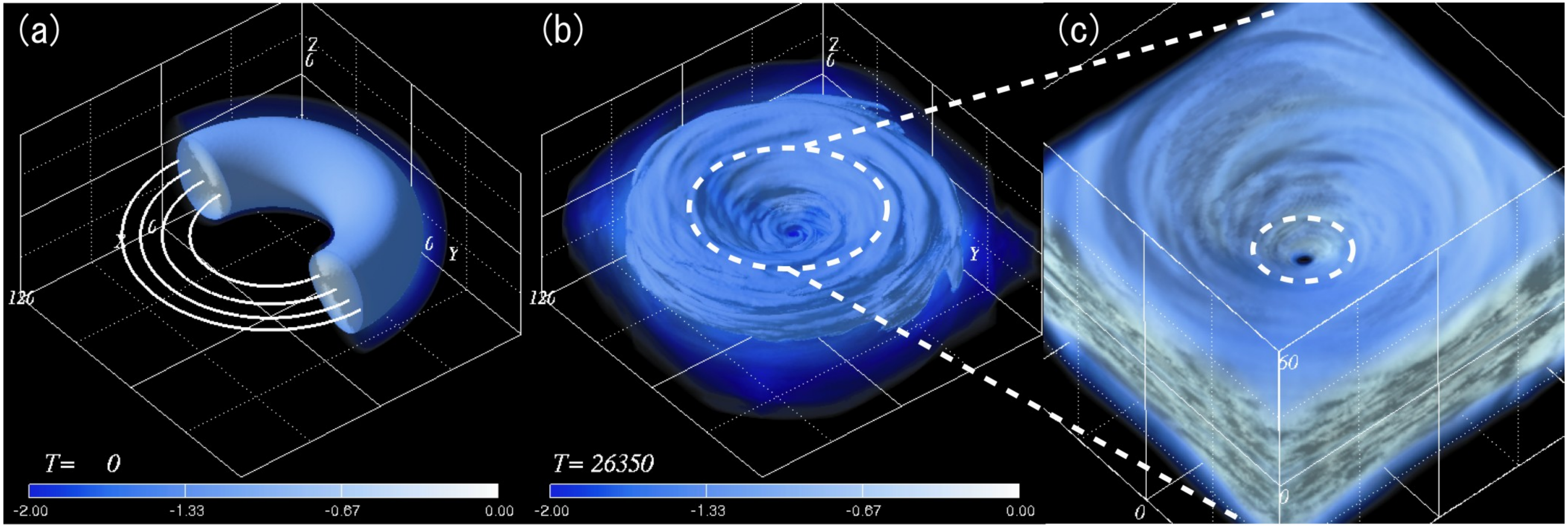


Optical image of sunspots by HINODE



Butterfly Diagram of Sunspots (NASA)

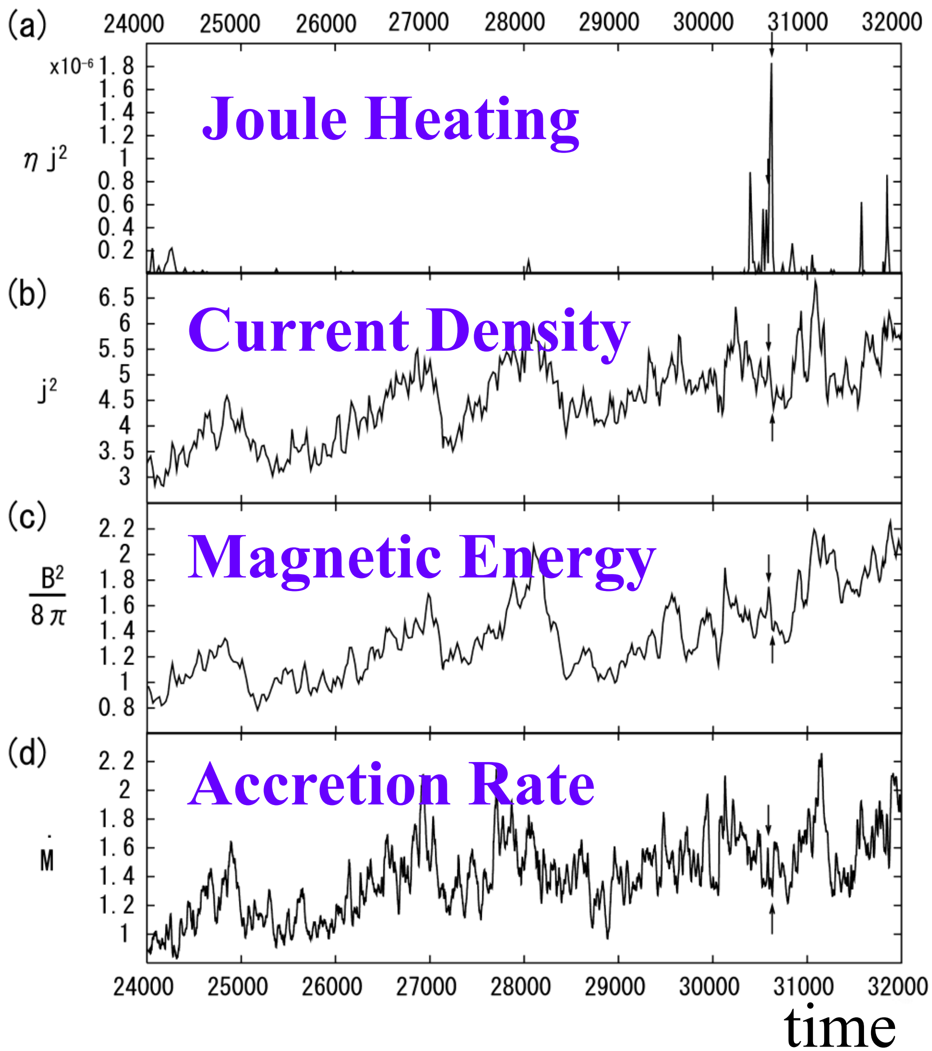
ブラックホール降着流の大局的3次元磁気流体シミュレーション



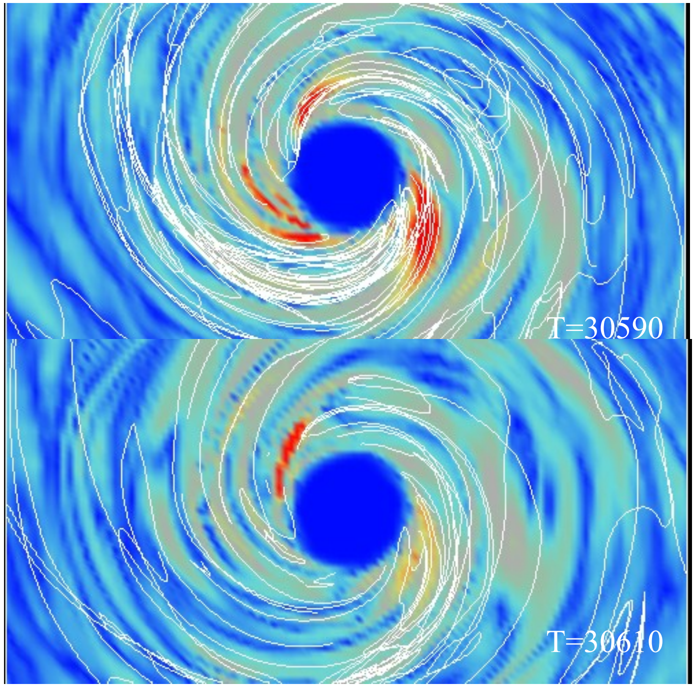
Initial state t=26350 unit time t_0=rg/c

Machida and Matsumoto 2003

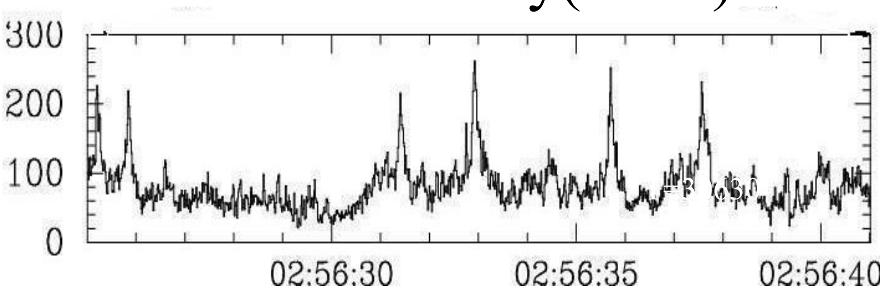
降着円盤における磁気エネルギー解放



Machida et al. 2003



Current density(color)

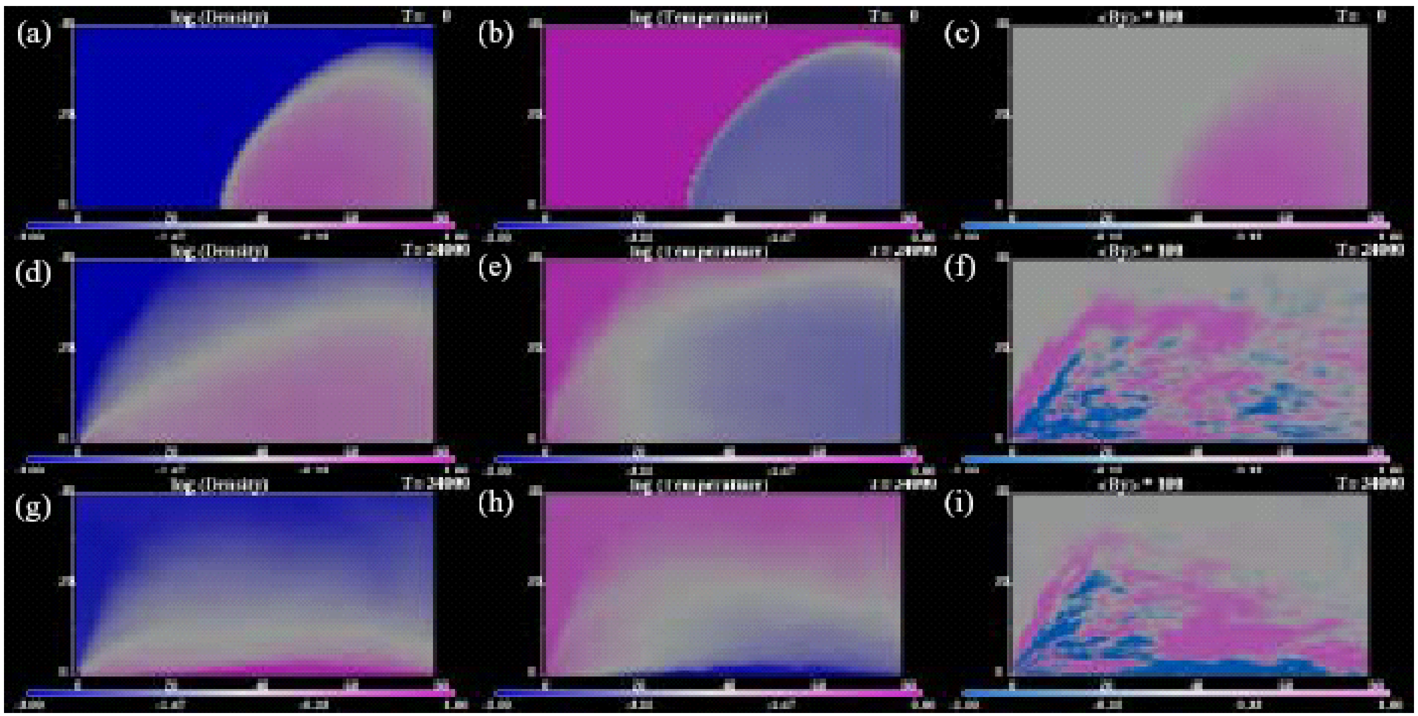


Time variabilities of Cyg X-1 (Negoro 1995)

ブラックホール降着円盤の
状態遷移シミュレーション

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

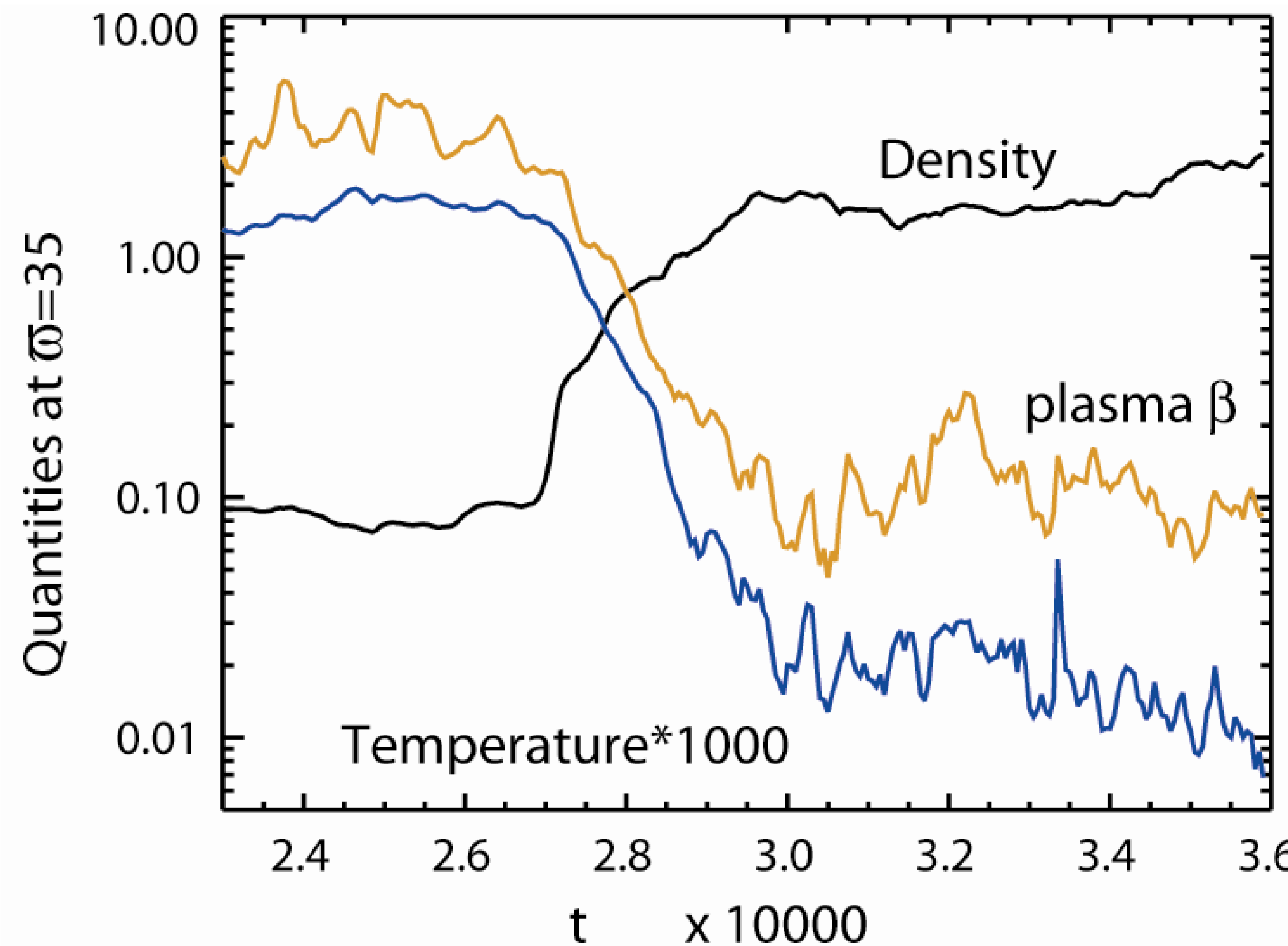
Radiative Cooling：Qrad ＝ $Q_b \rho^2 T^{1/2}$



density　　temperature　　Toroidal field

Machida et al. 2006, PASJ 58, 193

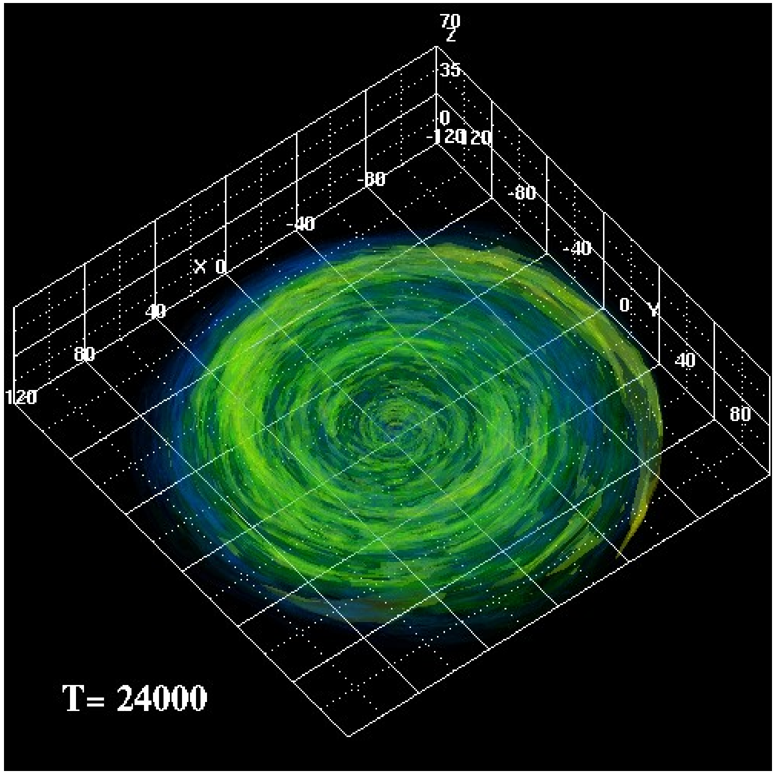
Time Evolution



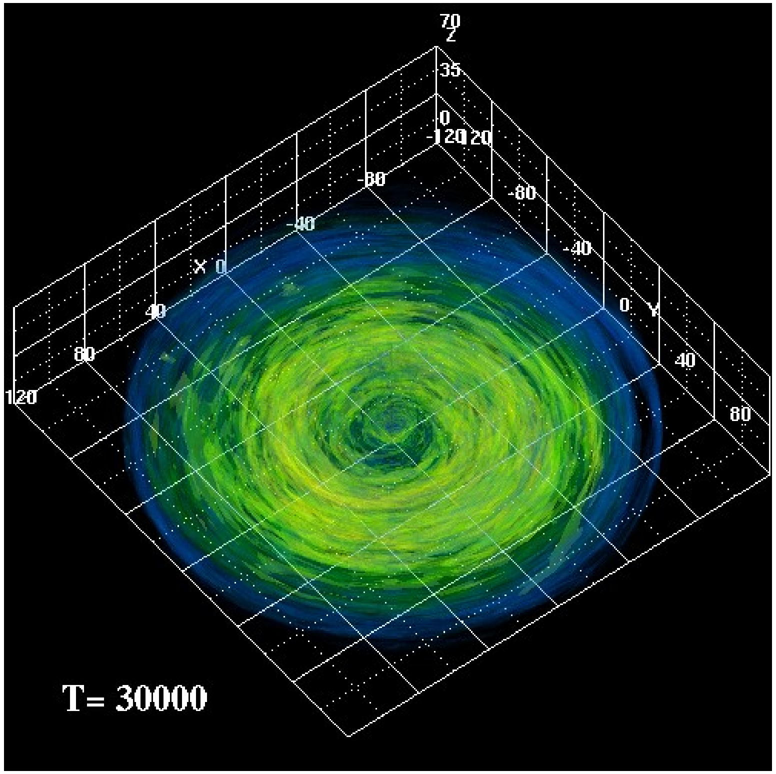
$\beta = P_{gas}/P_{mag}$

Machida, Nakamura and Matsumoto 2006

磁気圧優勢円盤の形成

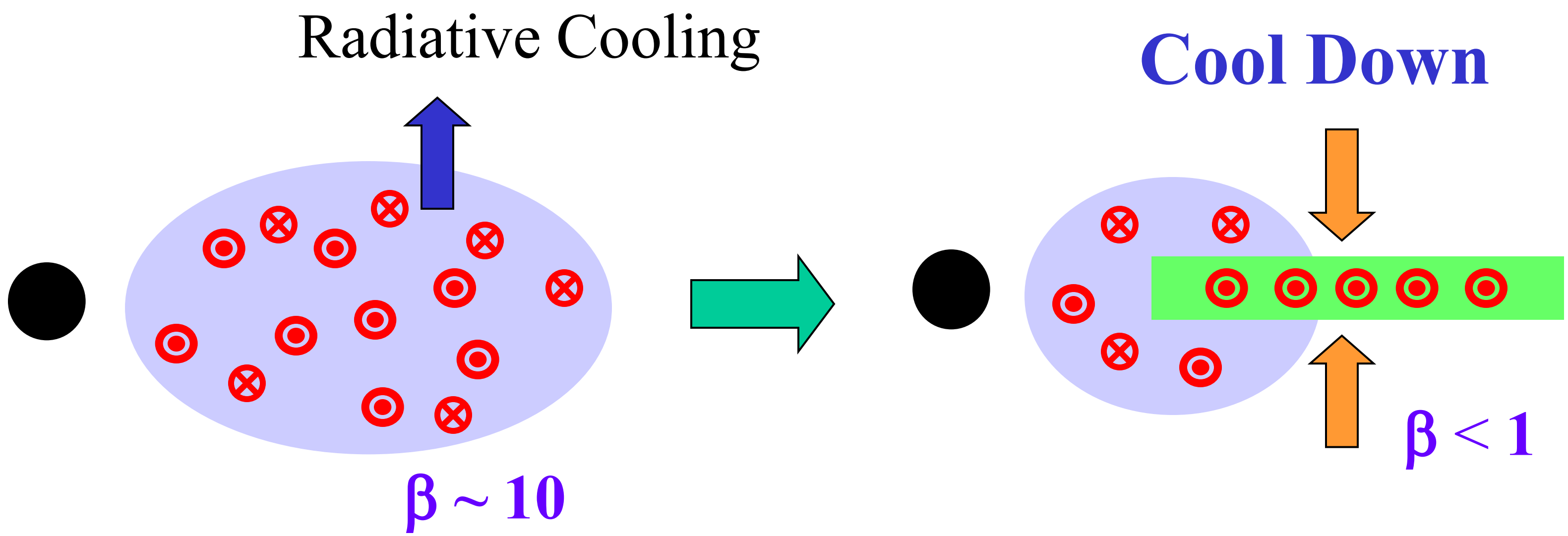


Before the transition



After the transition

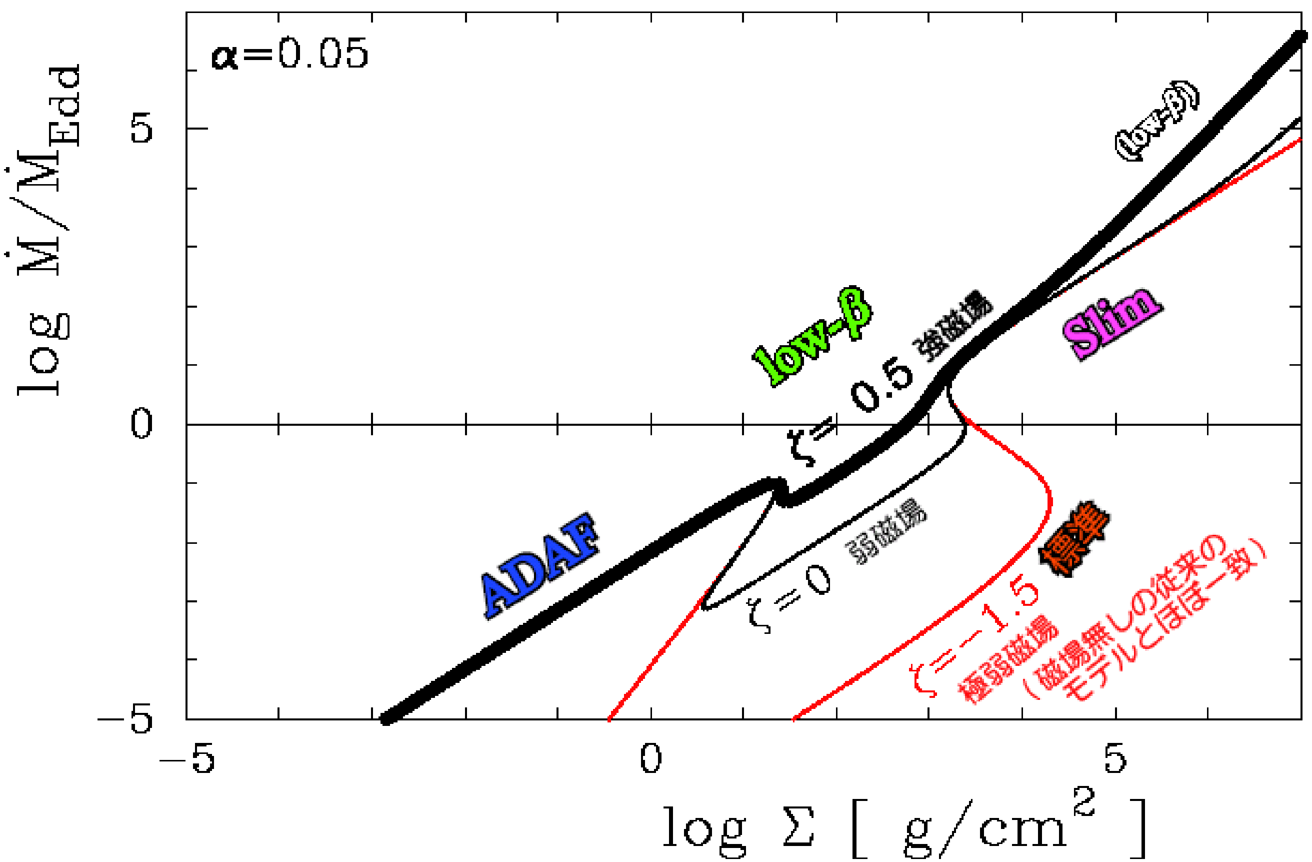
磁気圧で支えられた円盤の形成



Optically Thin Hot Disk
Supported by Gas Pressure

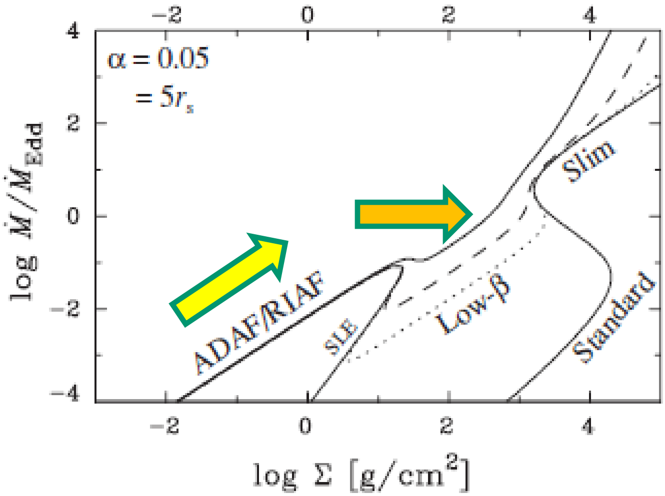
Optically Thin Cool Disk
Supported by Magnetic Pressure

磁場を考慮した熱平衡曲線

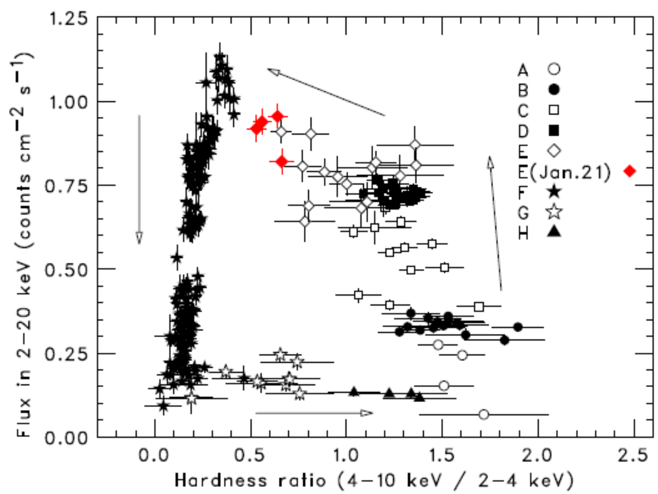


Oda et al. 2008

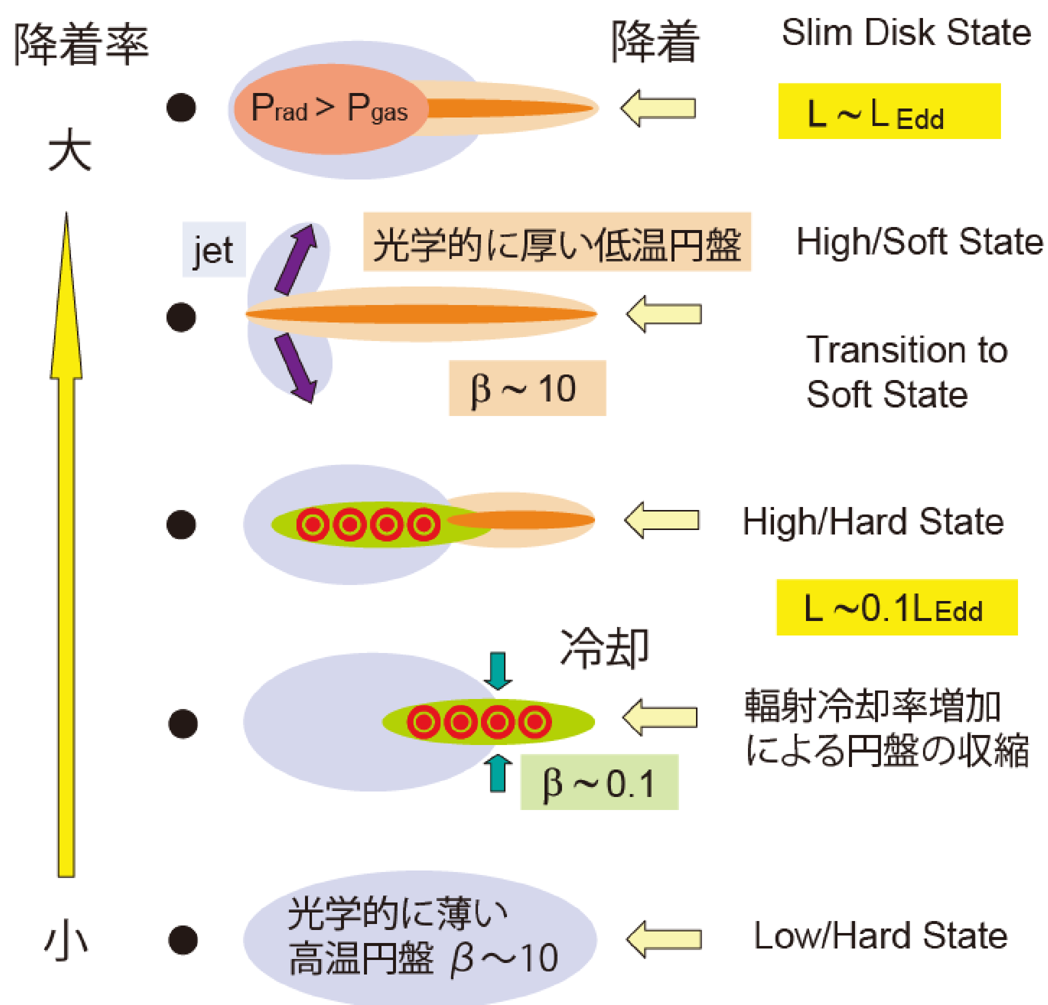
降着率増増大に伴う降着円盤の進化



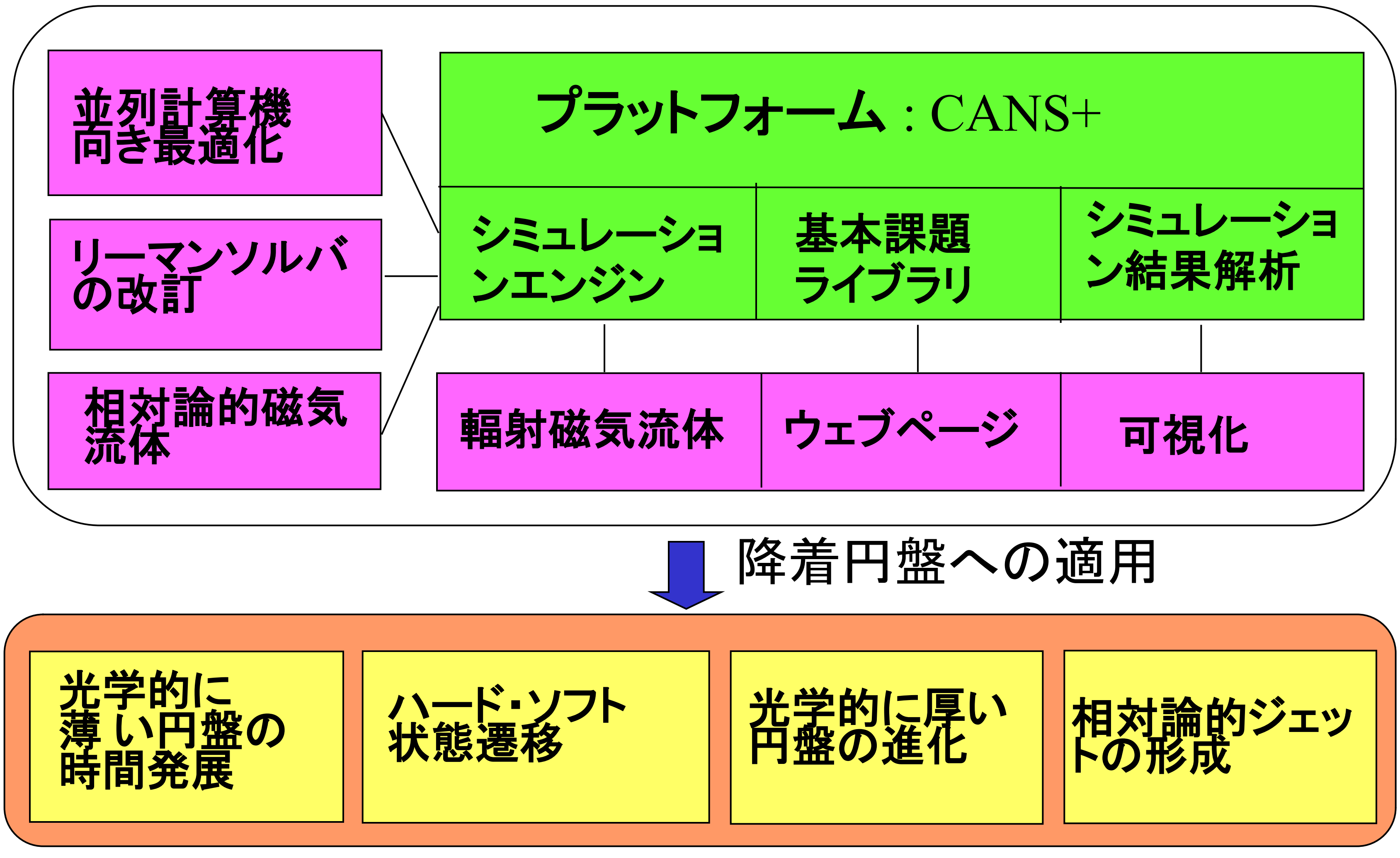
定常モデル（Oda et al. 2009）



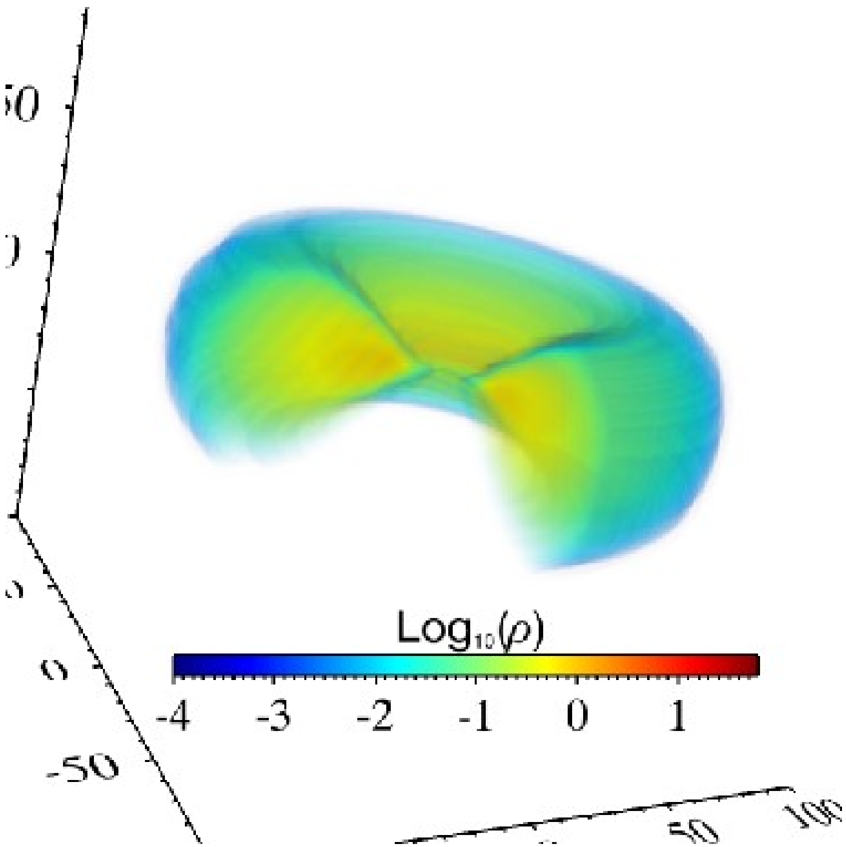
XTE J1752-223（Nakahira et al. 2010）



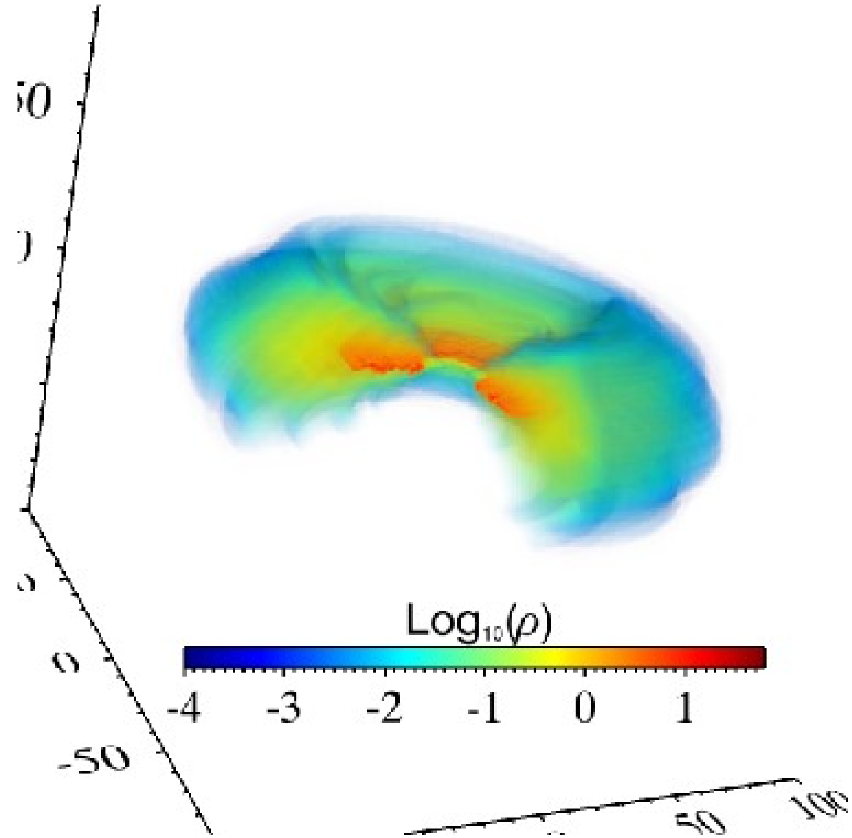
次世代降着円盤シミュレータの開発



Global MHD Simulations of the Hard-to-Soft Transition

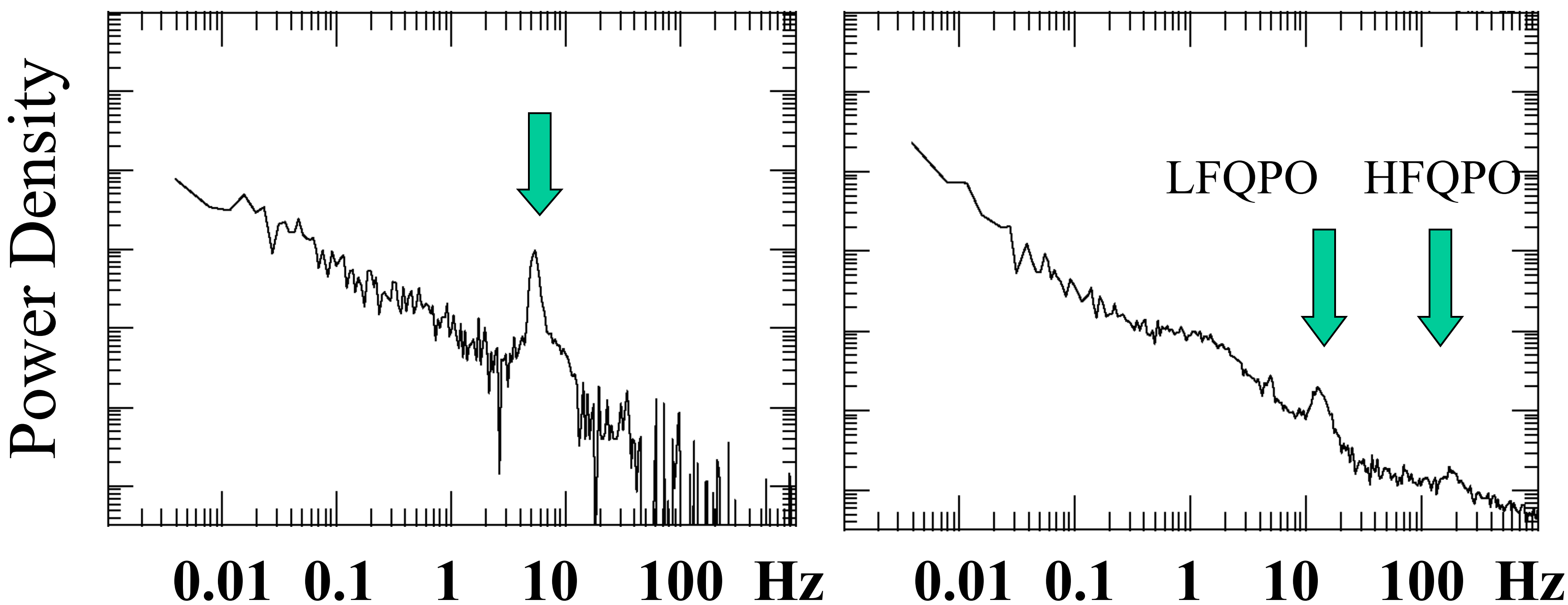


Include cooling term after quasi-steady disk is formed for simulations using（256,64,256）mesh points



Formation of cool, dense region after cooling instability grows

ブラックホール候補天体で観測される準周期振動（QPOs）

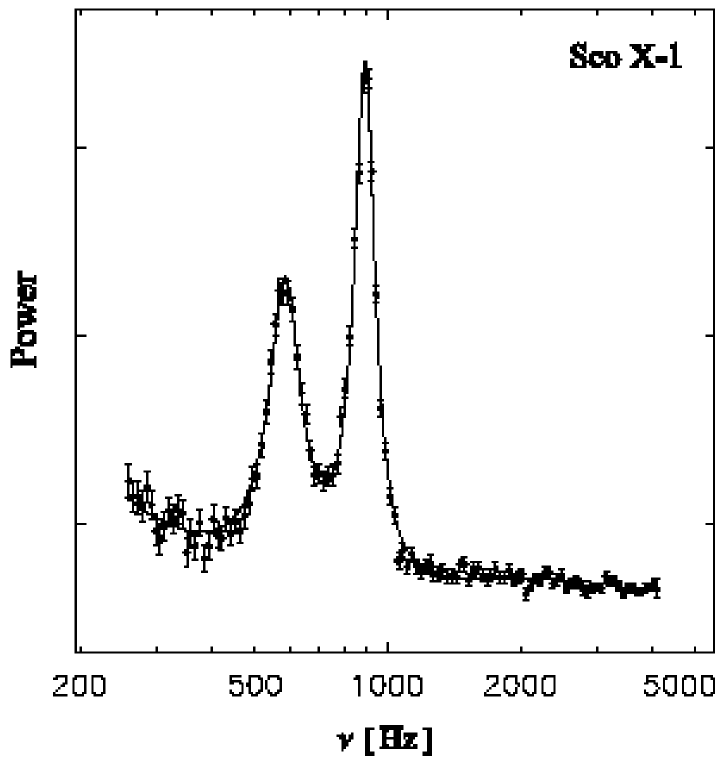


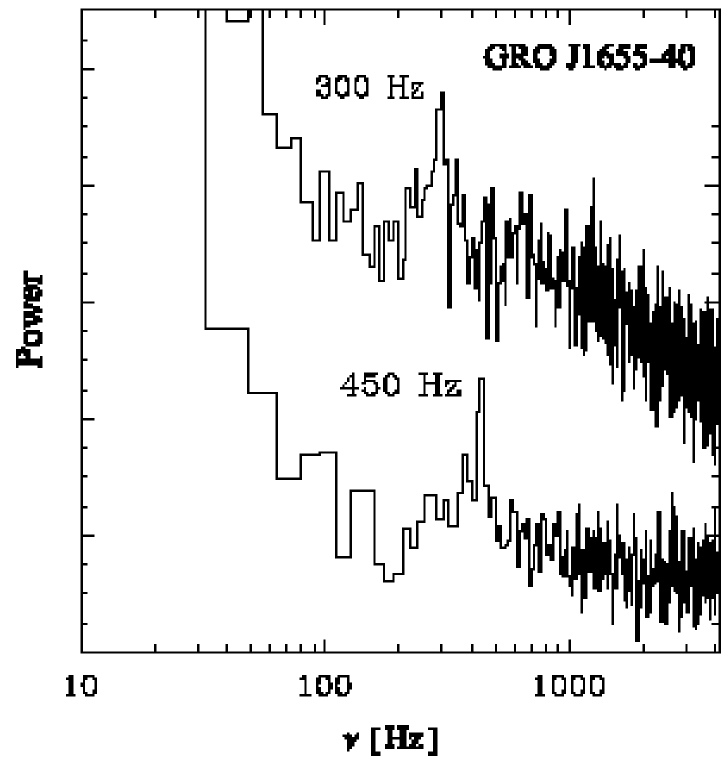
GX 339-4

XTE J1550-564

McClintock and Remillard 2004

Twin Peaks in HFQPOs

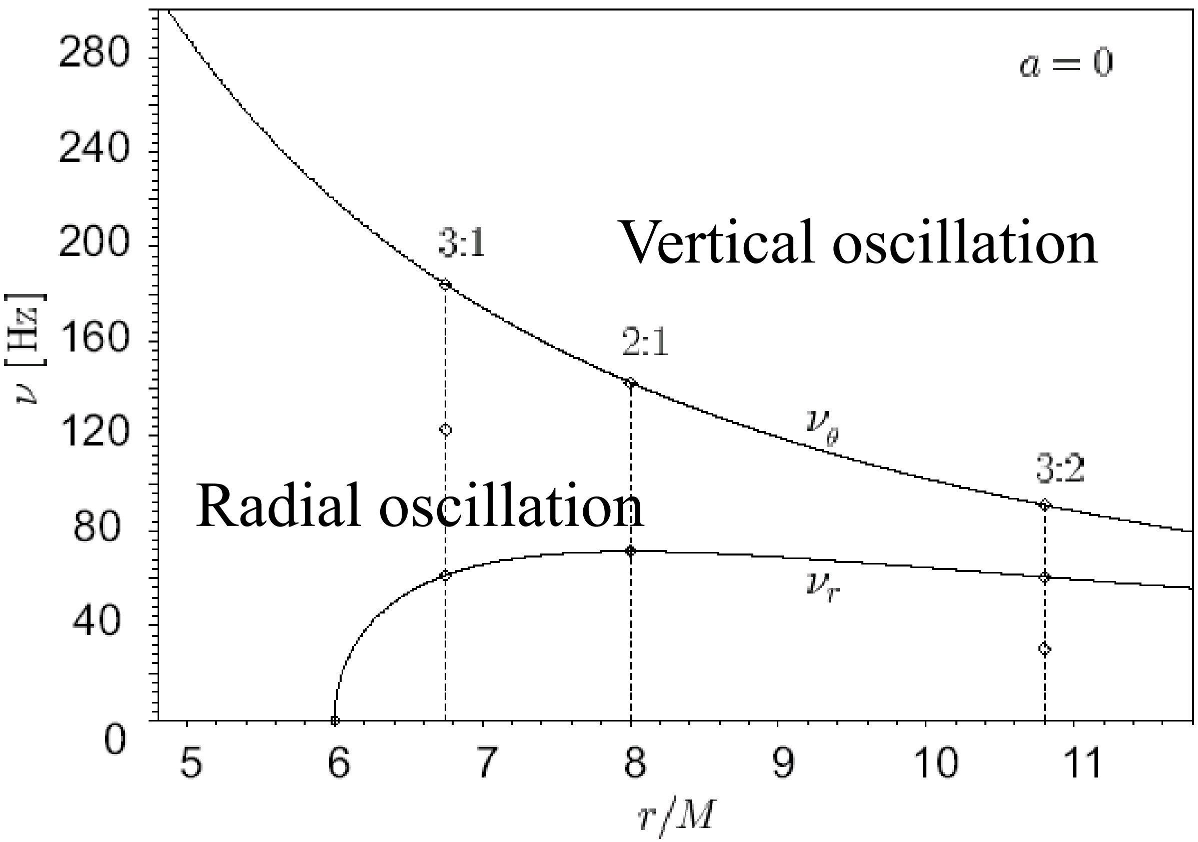




Sco X-1 (van der Klis et al.1997)

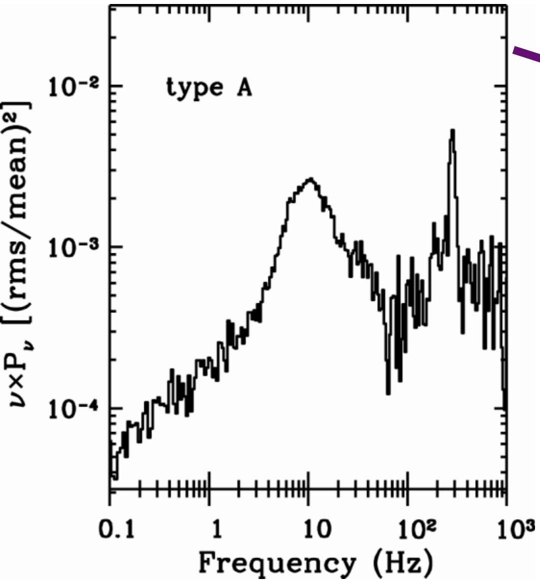
GRO J1655-40 (Strohmayer 2001)

Resonance Model of Twin QPOs

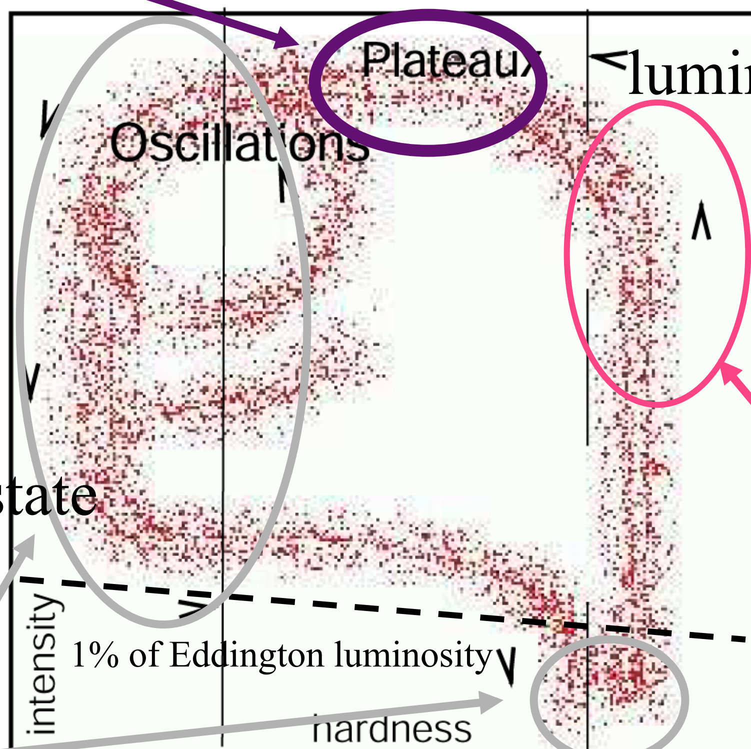


Abramowicz and Kluzniak 2001, 2004

Appearance of QPOs



Fender et al. (2004)

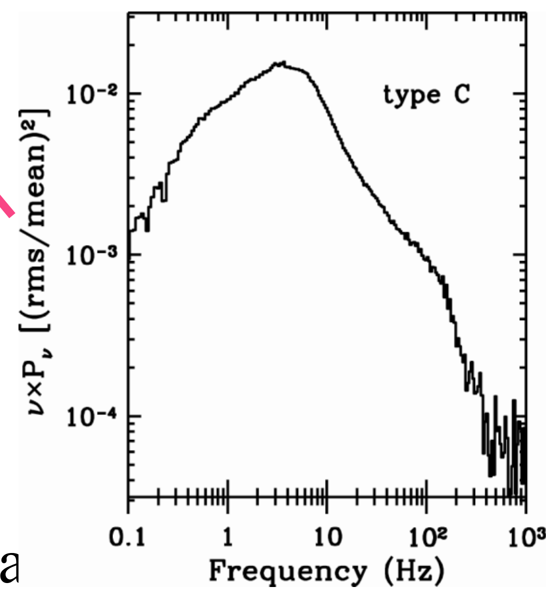


luminous low/hard state

high/soft state

low/hard sta

Remillard and Muno (2002)



No QPO in high/soft state and standard low/hard state

まとめ

- 光学的に薄い円盤、スリム円盤、ブラックホール近傍等では移流を考慮する必要がある。
- 京都グループの寄与は大きいがスリム円盤、ADAF等で世界をリードするチャンスはあった。
- αモデルの成功は磁気乱流による角運動量輸送の良い近似になっていたためと考えられる。
- αを導入しない3次元磁気流体計算では幾何学的に薄い標準円盤を扱うことが最も難しい。状態遷移過程の計算は可能になったのでAGN等に適用し、観測とも比較していきたい。

END