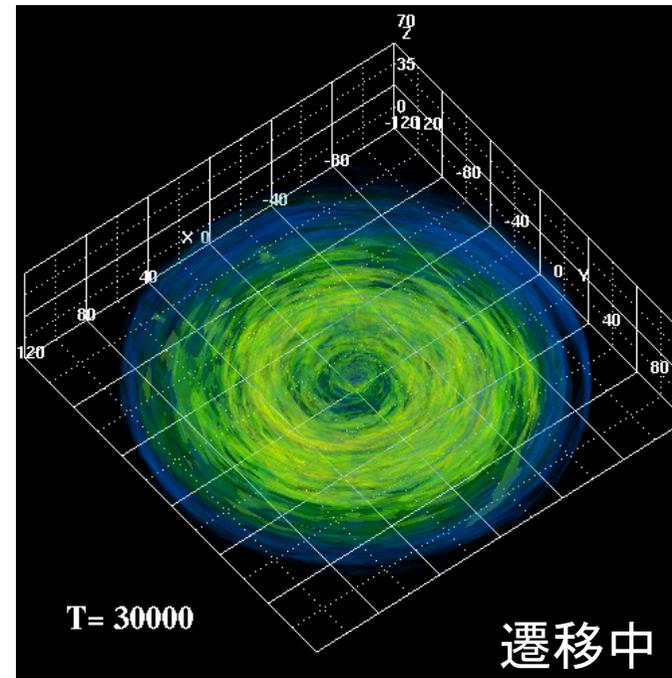
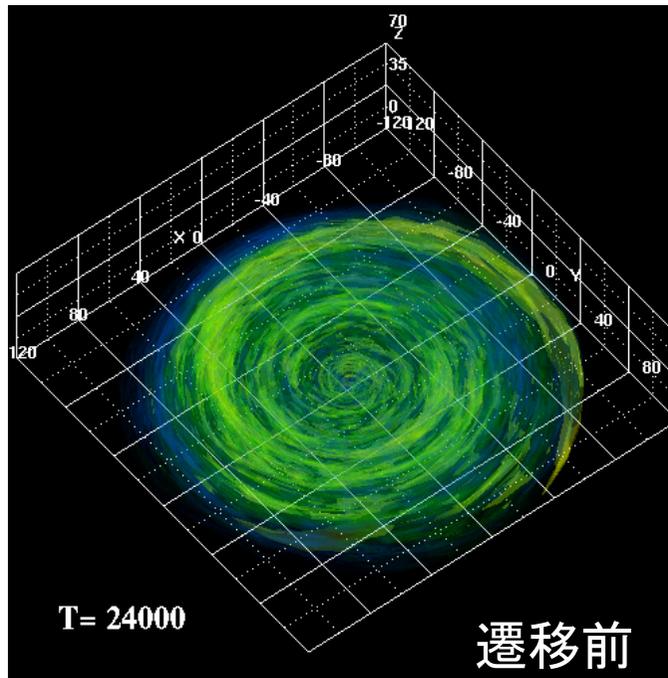
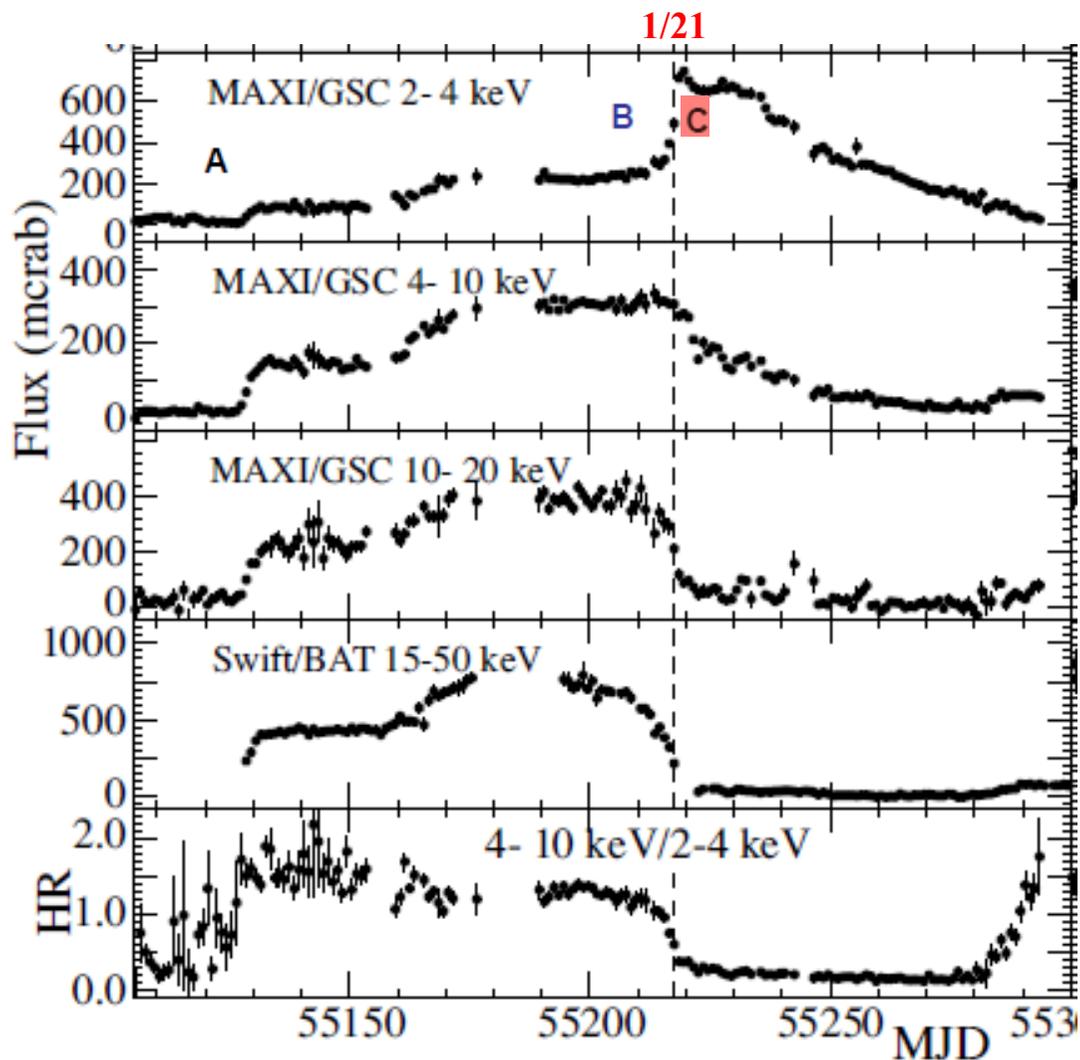


# ブラックホール降着流におけるスペクトル 状態遷移の磁気流体数値実験

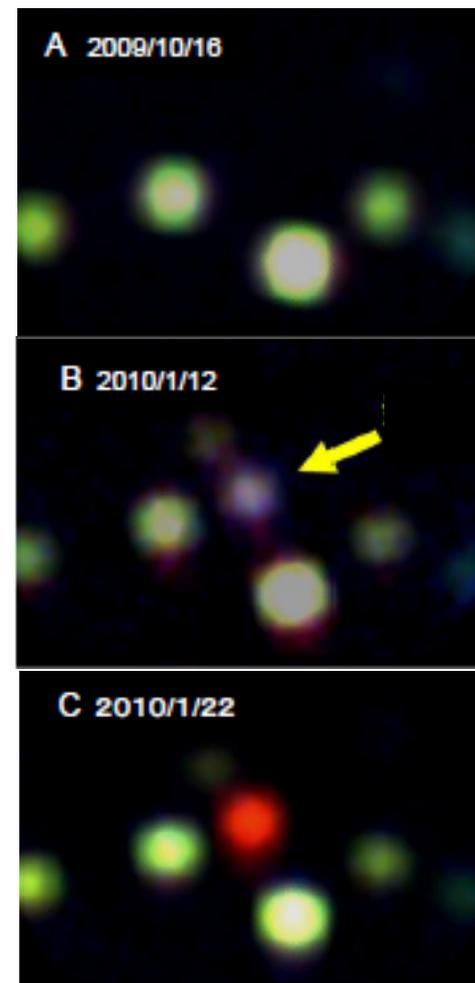


松元亮治(千葉大理)

# MAXIで観測したブラックホール新星 XTE J1752-223

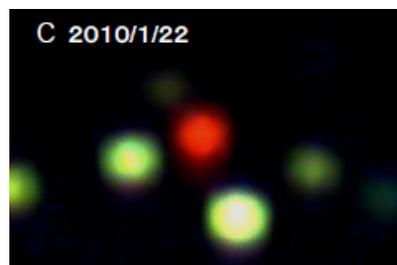


Nakahira et al. 2010

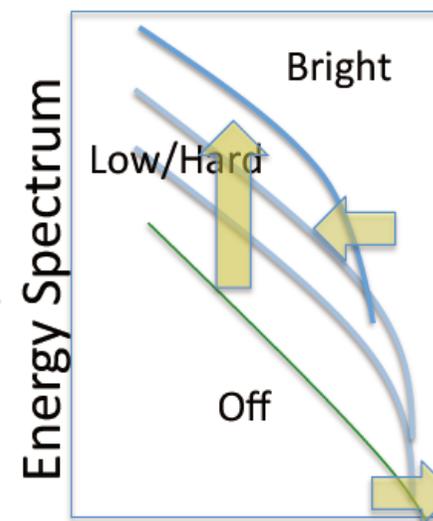
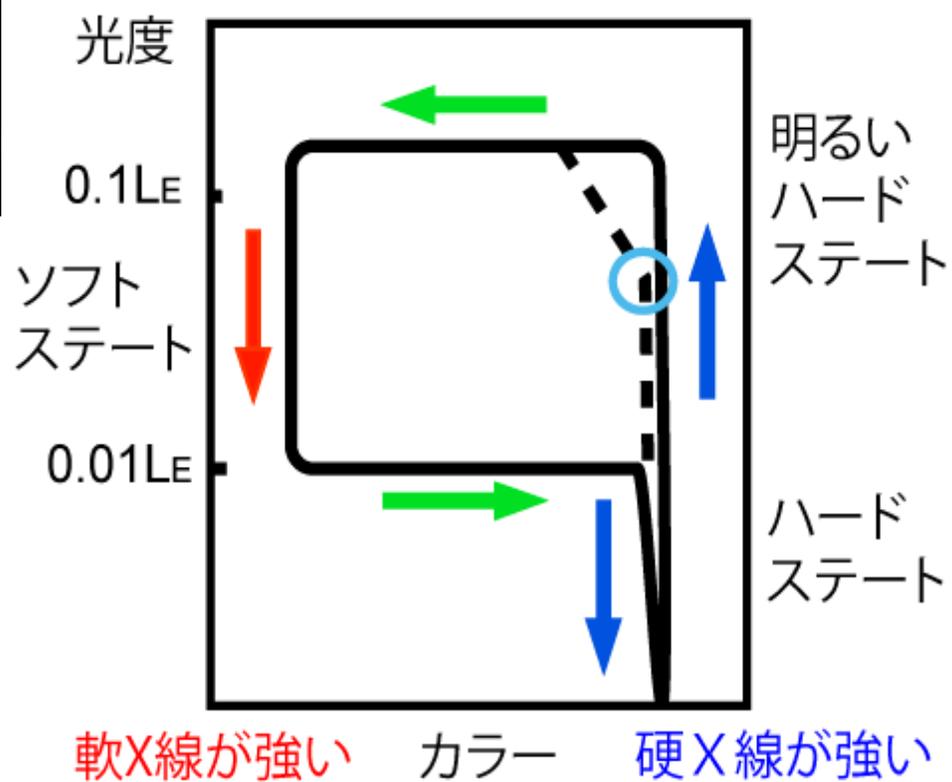
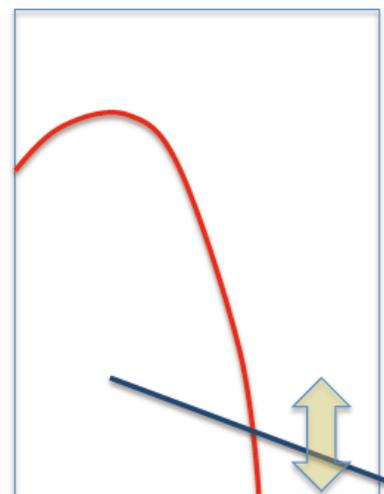


MAXI Science News #17

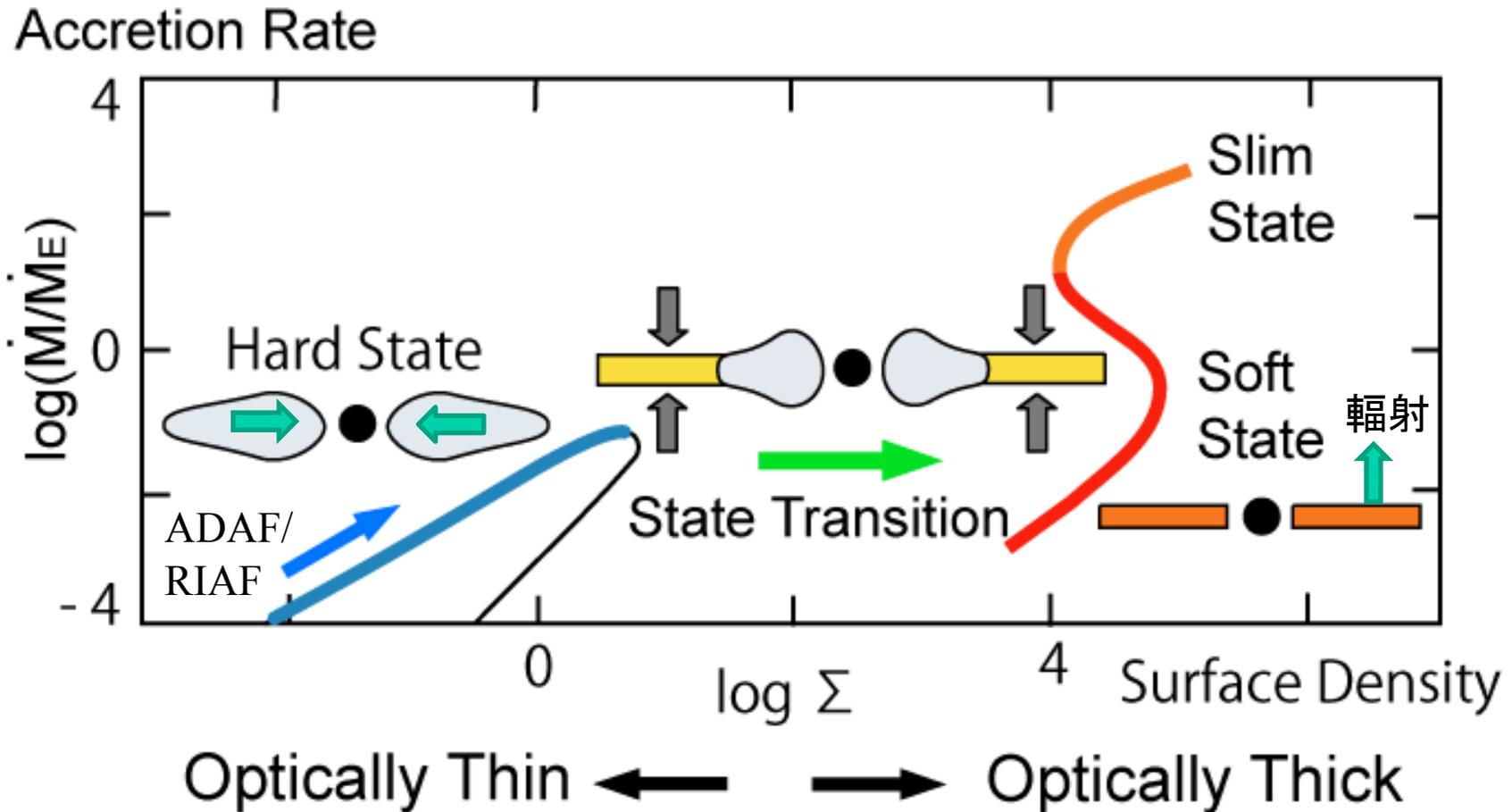
# 色－光度図上の進化



Nakahira et al. 2010

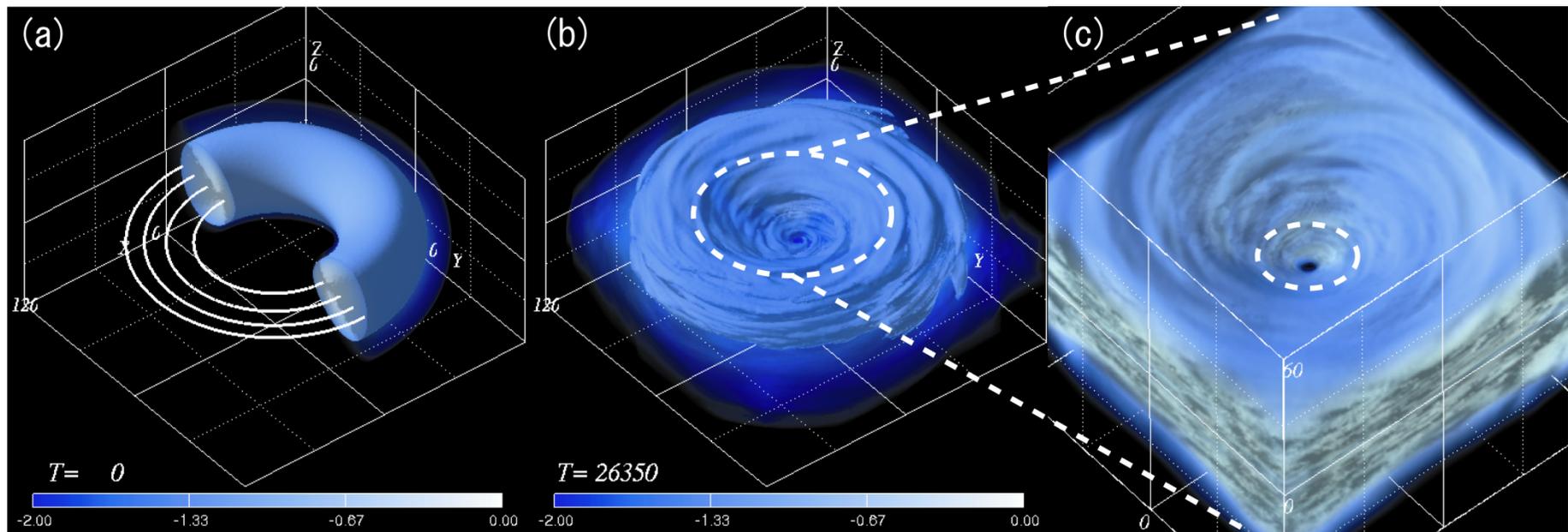


# 状態遷移の理論モデル



降着円盤の熱平衡曲線 (Abramowicz et al. 1995)

# ハードステート円盤形成の3次元磁気流体シミュレーション



Initial state

$t=26350$

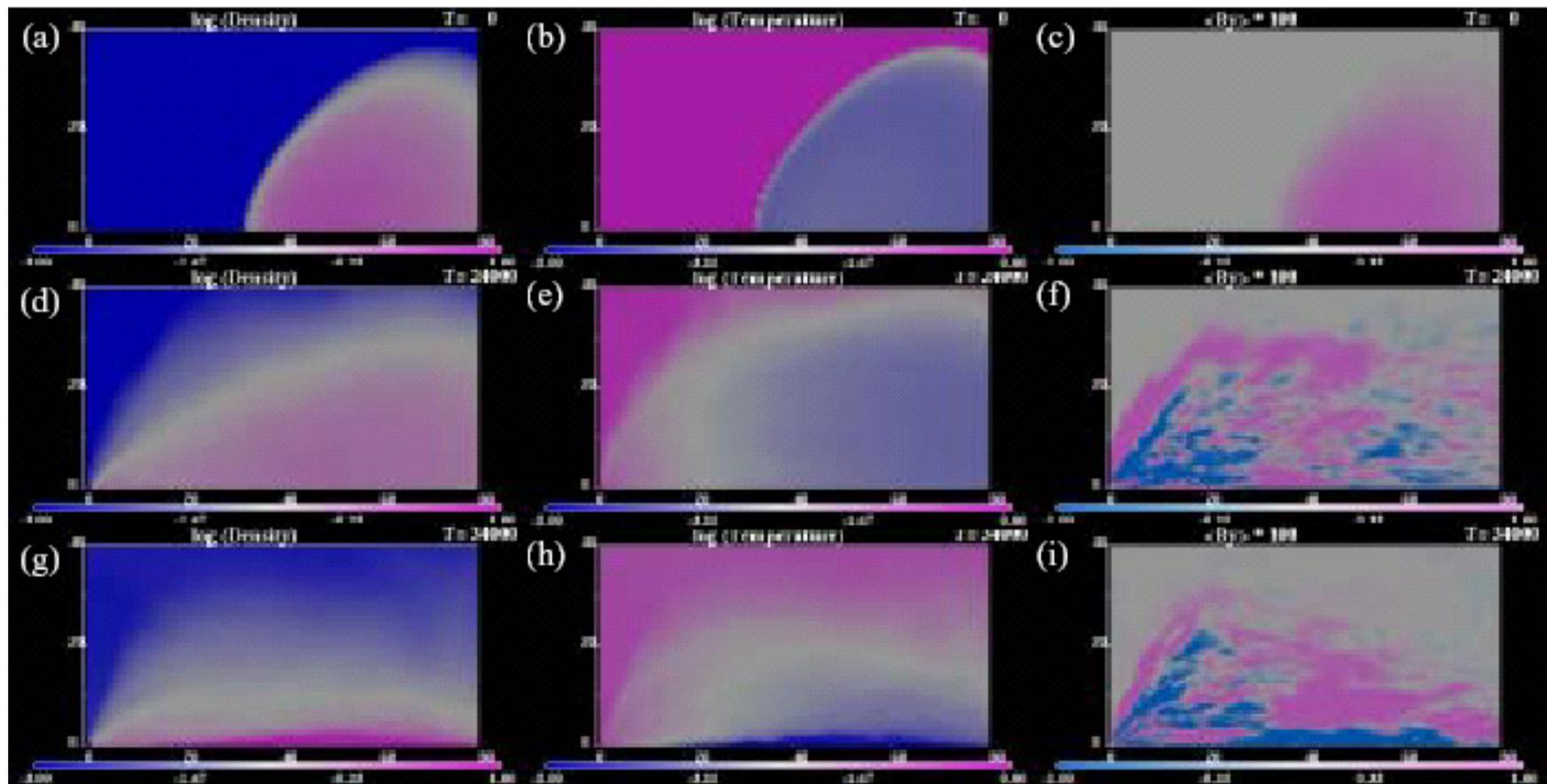
unit time  $t_0=rg/c$

Machida et al. 2003

# 光学的に薄い場合の輻射冷却考慮した 3次元MHDシミュレーション (Machida et al. 2006, PASJ 58, 193)

- 降着流が準定常的になってから輻射冷却項を加える
- 熱制動放射を仮定
$$Q_{\text{rad}} = Q_{\text{b}} \rho^2 T^{1/2}$$
- $\rho < \rho_{\text{crit}}$  となる領域(コロナ)では冷却項は加えない

# 冷却不安定性の成長

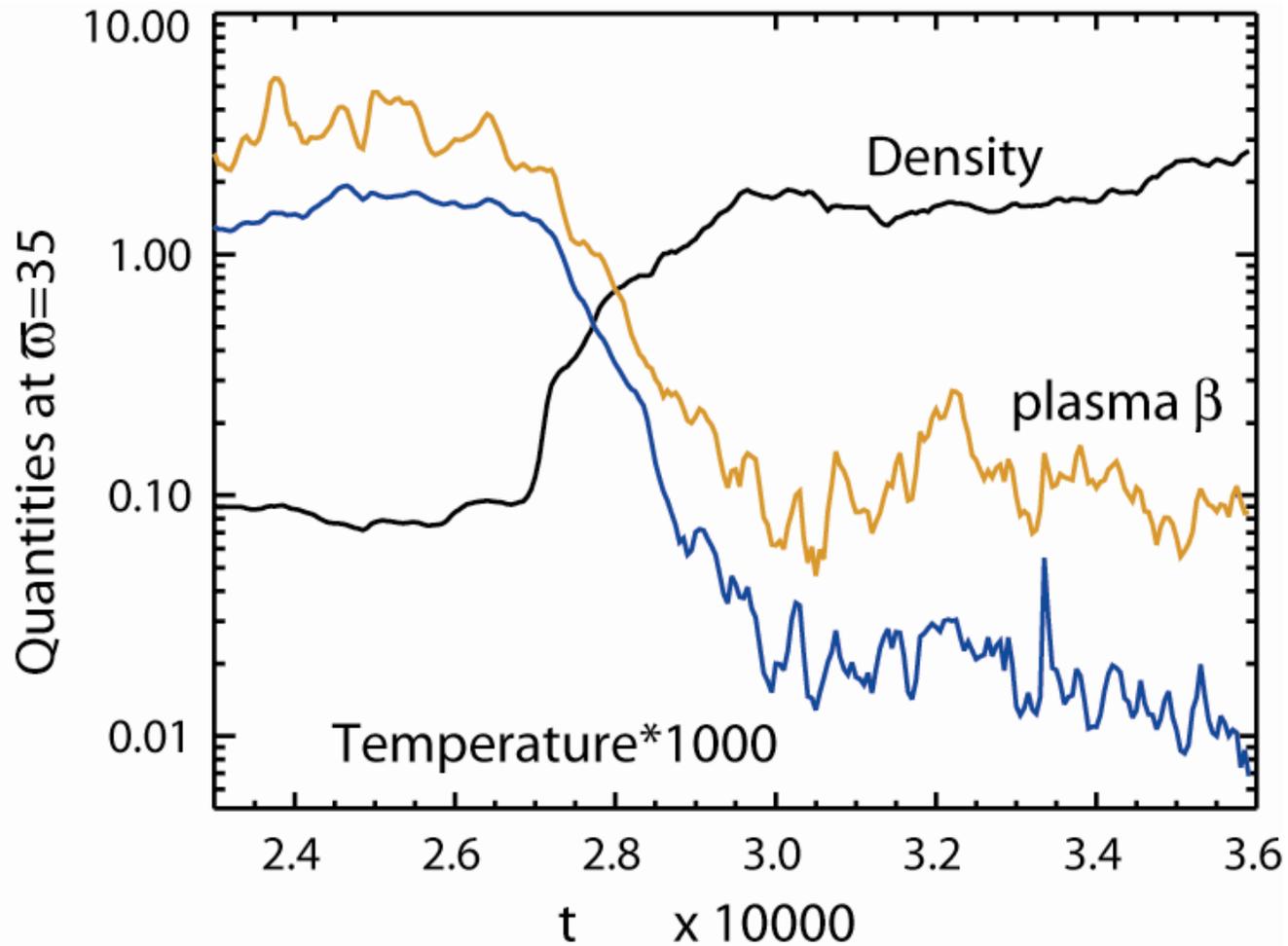


density

temperature

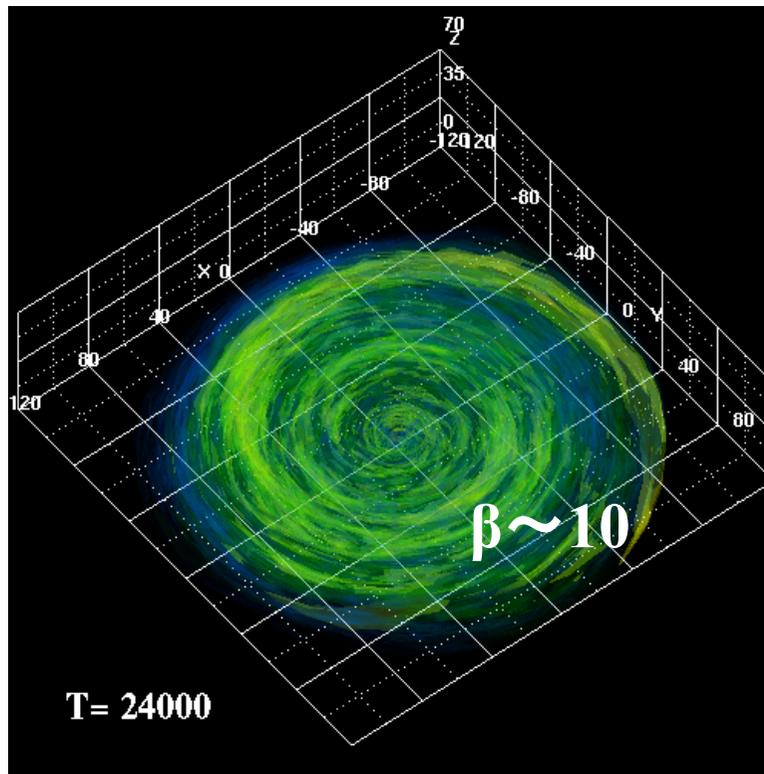
Toroidal field

# 密度、温度等の時間変化

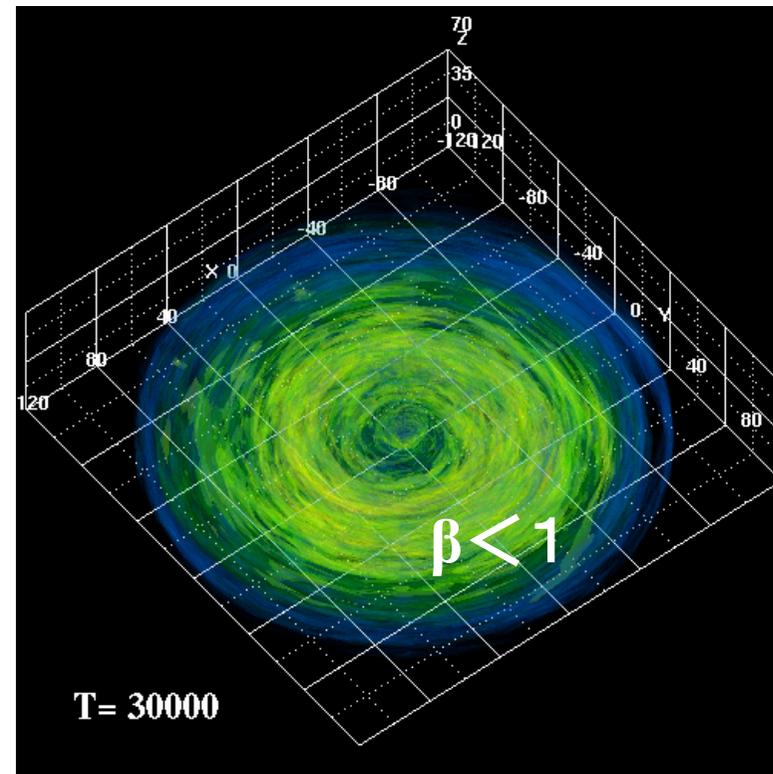


$$\beta = P_{\text{gas}} / P_{\text{mag}}$$

# 磁気圧優勢円盤の形成



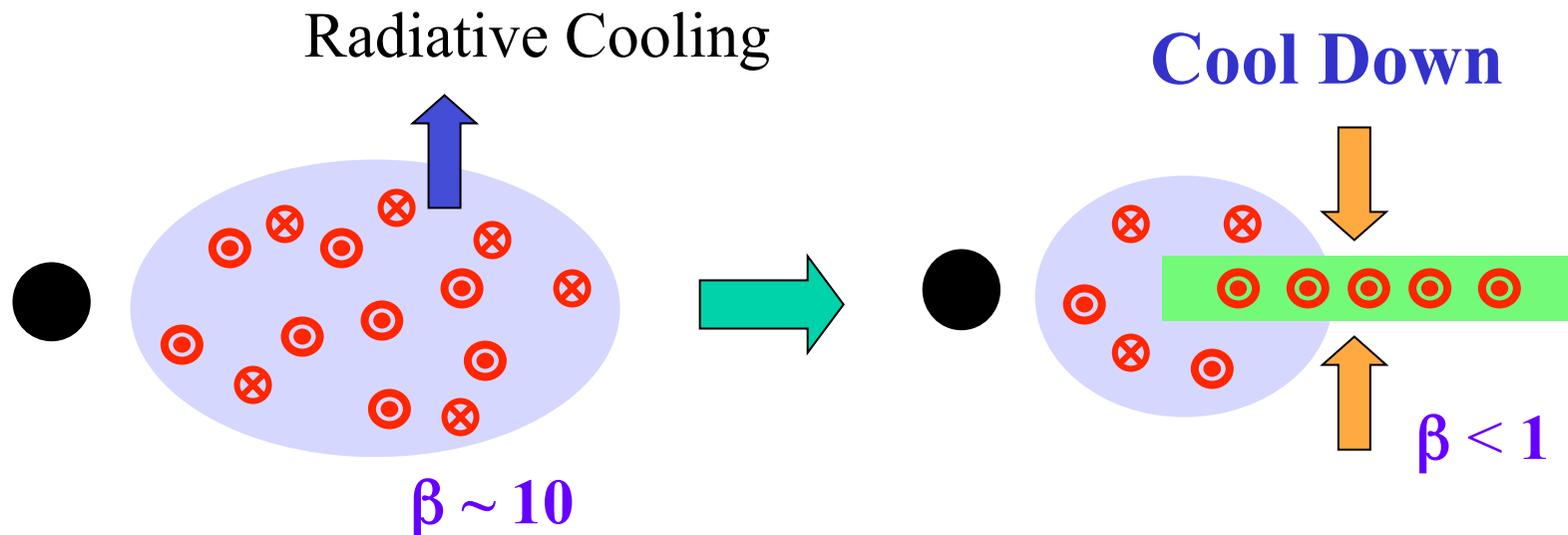
冷却不安定性成長前



遷移中

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

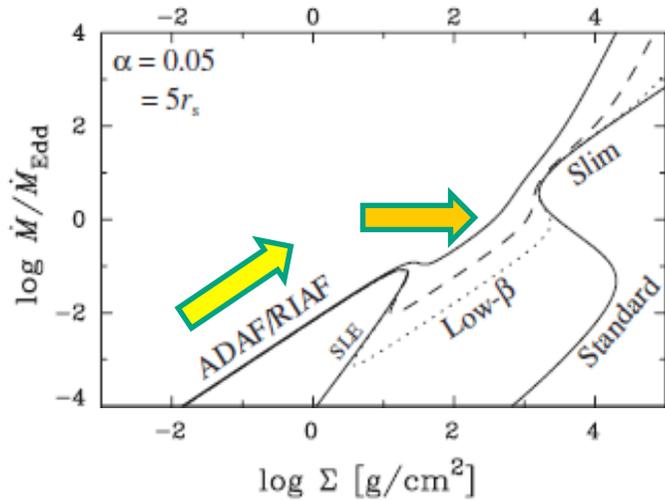
# 磁気圧で支えられた円盤の形成



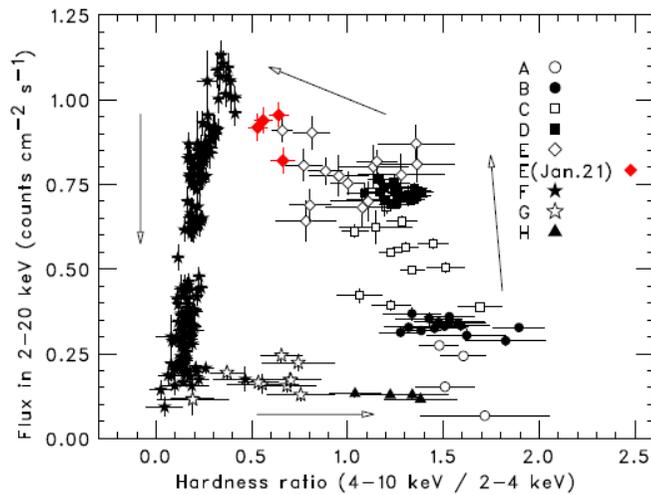
Optically Thin Hot Disk  
Supported by Gas Pressure

**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)

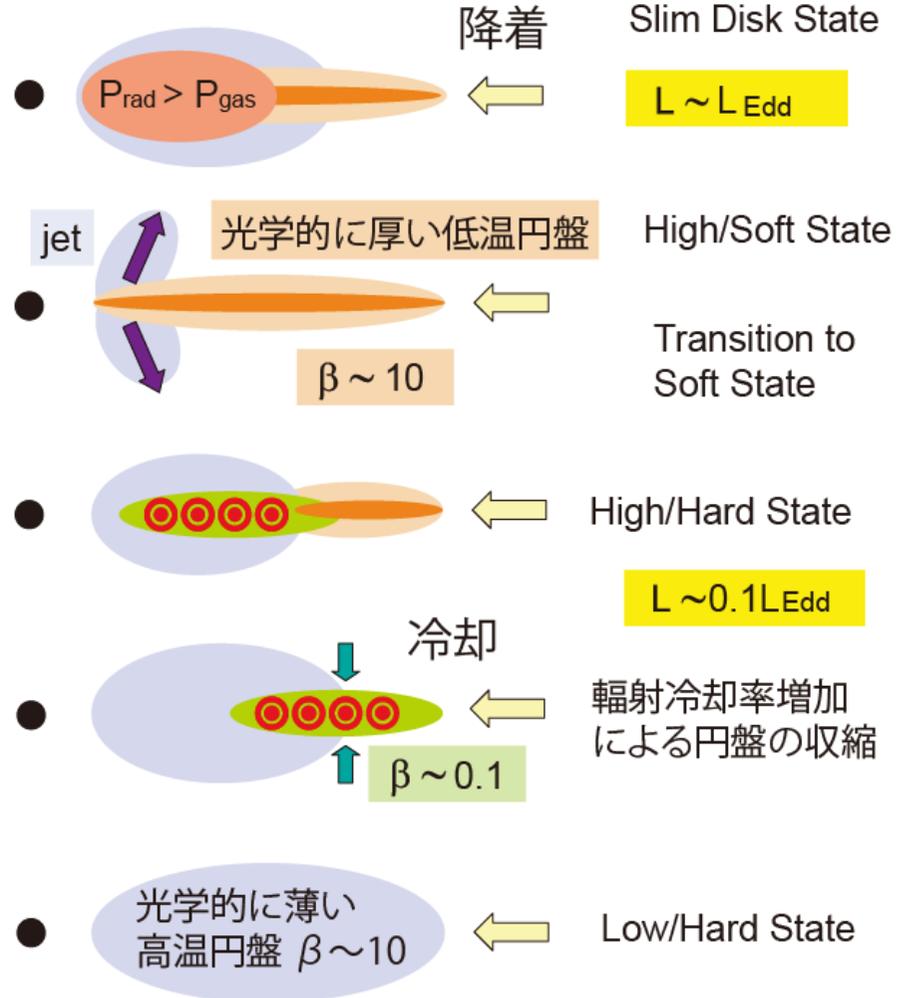


XTE J1752-223 (Nakahira et al. 2010)

降着率

大

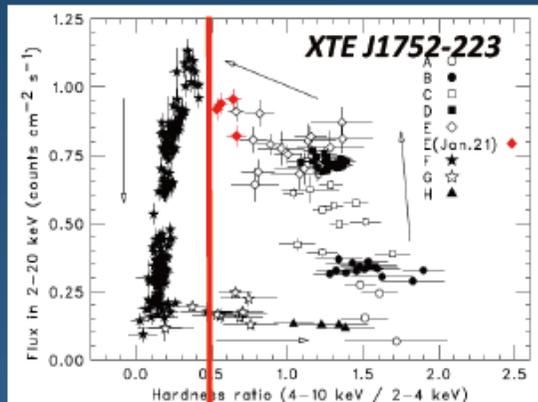
小



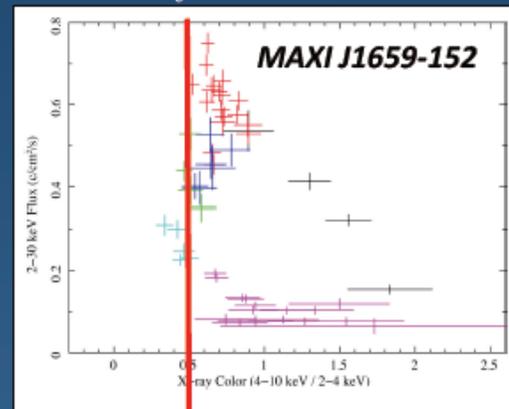
# ソフトステートに遷移しない場合

Soft-State Source or Intermediate-State Source ?

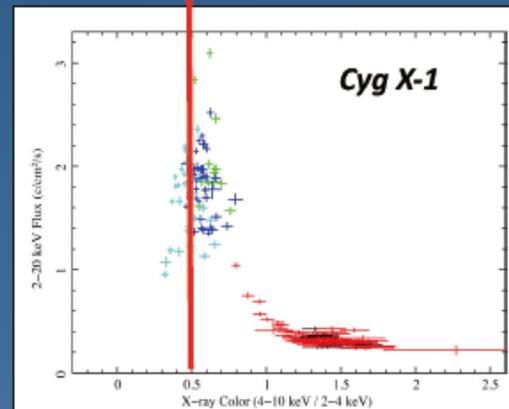
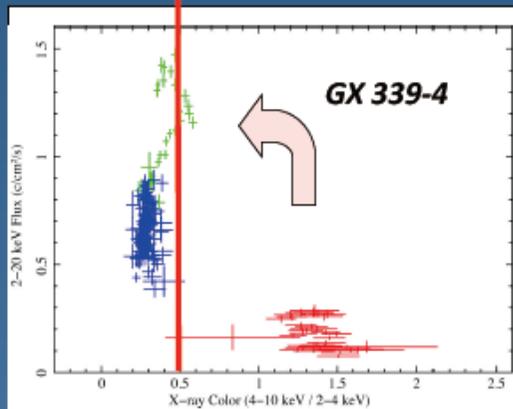
cf. Gierlinski & Newton 2006



Bright and Slow Transition



Dark and Fast Transition



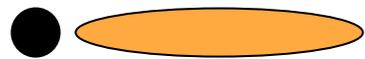
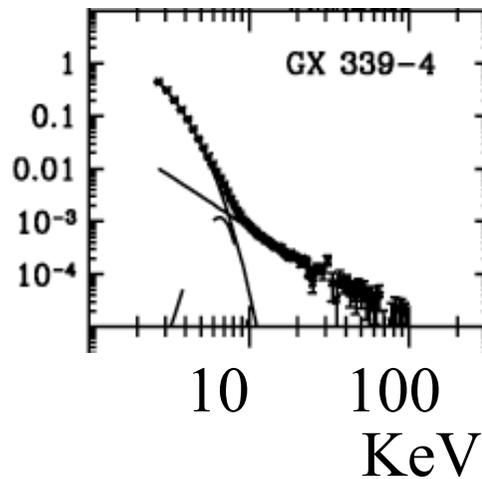
・コロナ密度  
が高くてジェッ  
トが噴出でき  
ない？

Negoro

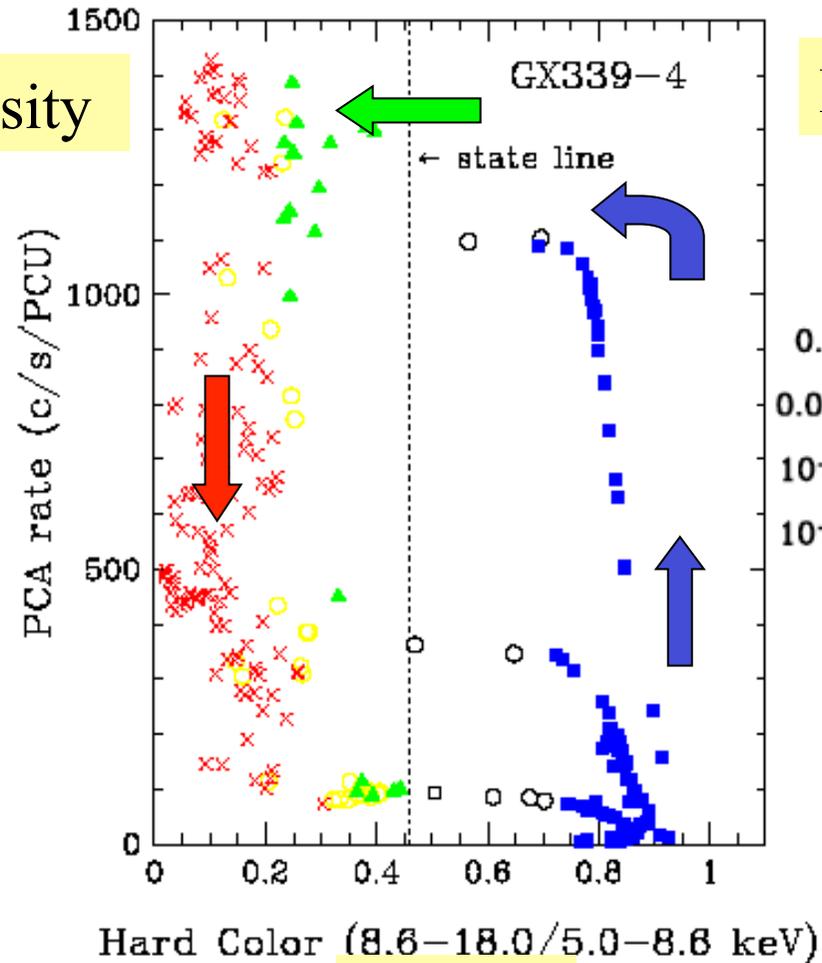
# 遷移光度がバースト毎に違う

Luminosity

Soft state



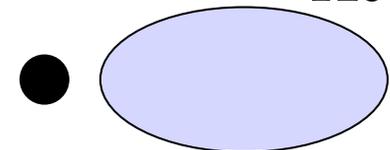
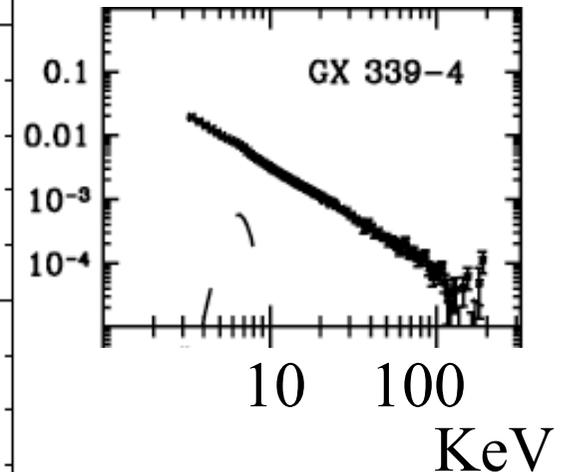
Optically thick  
cold disk



Color

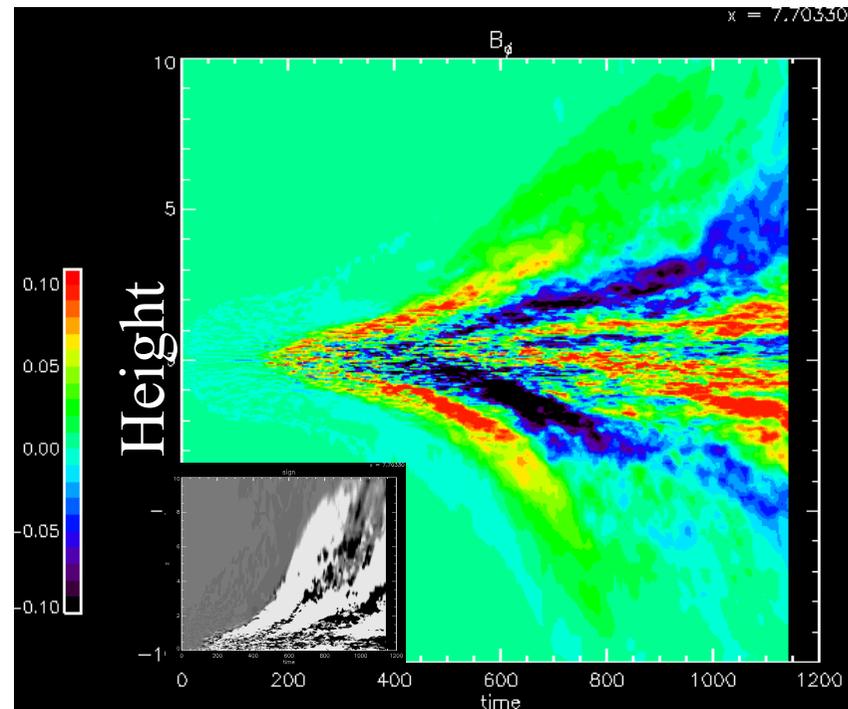
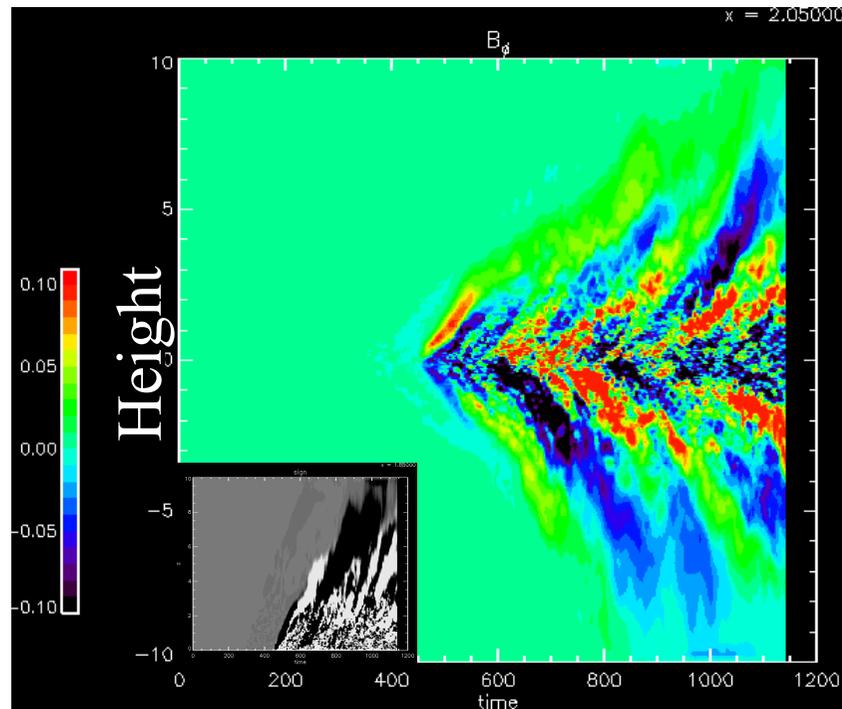
Remillard 2005

Hard state



Optically thin  
hot disk

# 円盤ダイナモの大局計算(町田)

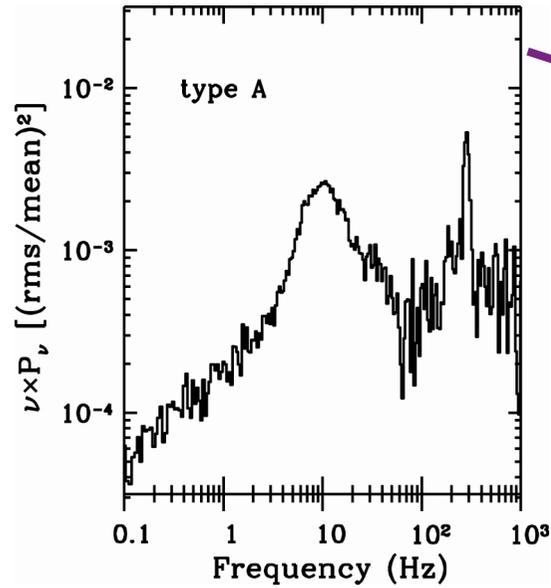


Azimuthally averaged  $B_\phi$  component Time- Height map.

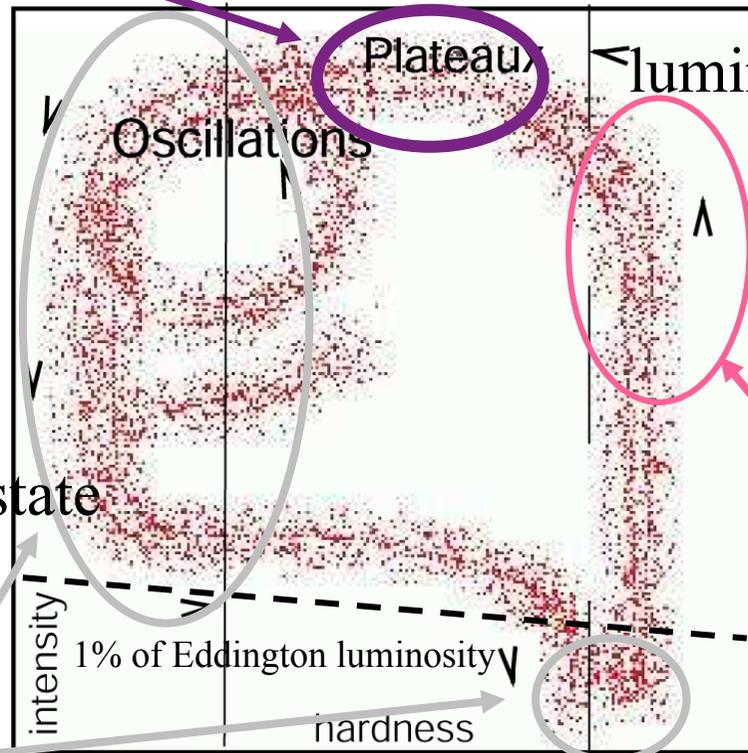
Left):  $r=2\text{kpc}$ 、Right):  $r=7\text{kpc}$

各図左下のグレースケールの図は、 $B_\phi$ の赤道面对称性の時間進化を示し、白:対称、黒:反対称を表している(赤道面上下で赤道面からの距離が等しい点の方位角磁場成分の符号が同じなら白、異符号なら黒)。**円盤内磁束量は対称性に依存する。**

# 準周期振動 (QPO) の出現

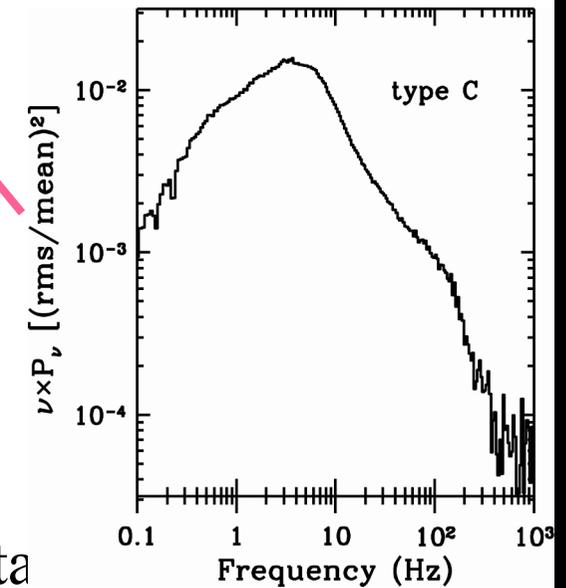


Fender et al. (2004)



luminous low/hard state

Remillard and Muno (2002)

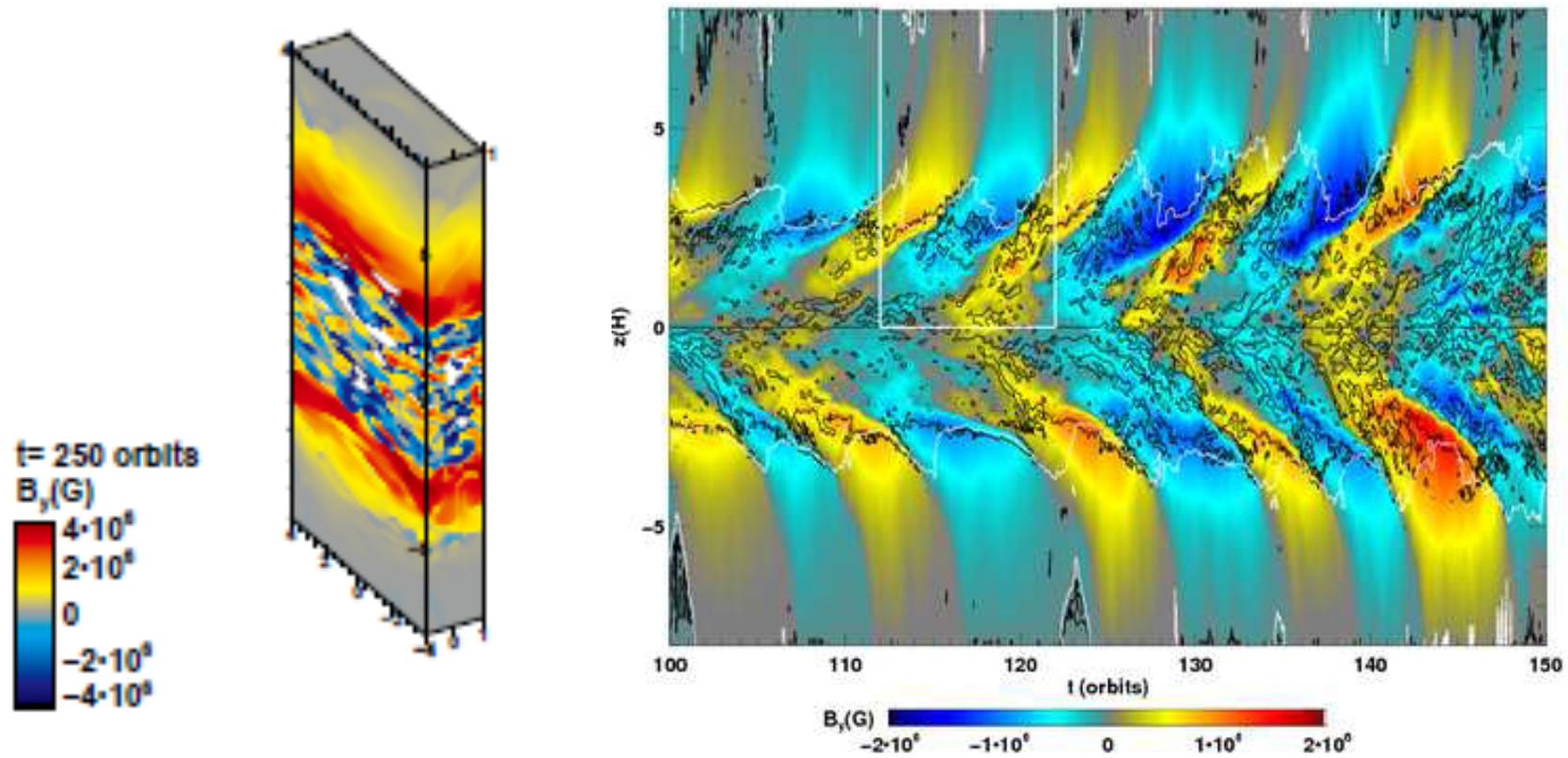


high/soft state

low/hard sta

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

# 1-10HzのQPOはダイナモ起源？



方位角磁場分布とその時間変化

白線： $\beta = 1$

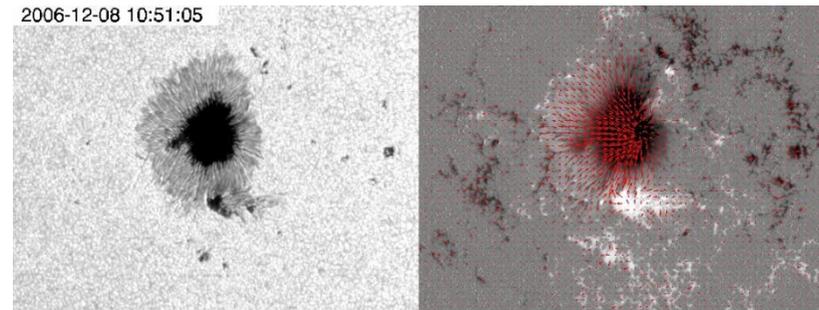
黒線： $d \ln|B|/dz < 0$

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アグラム

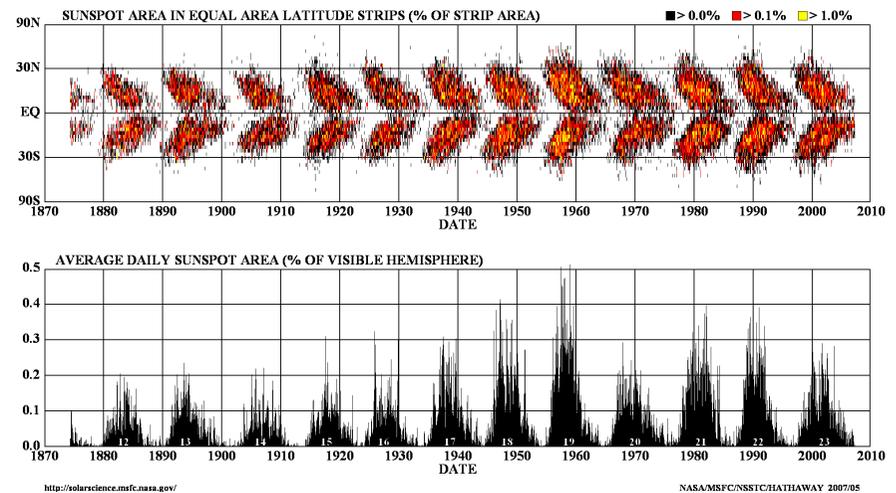


X-ray Image by HINODE  
Satellite



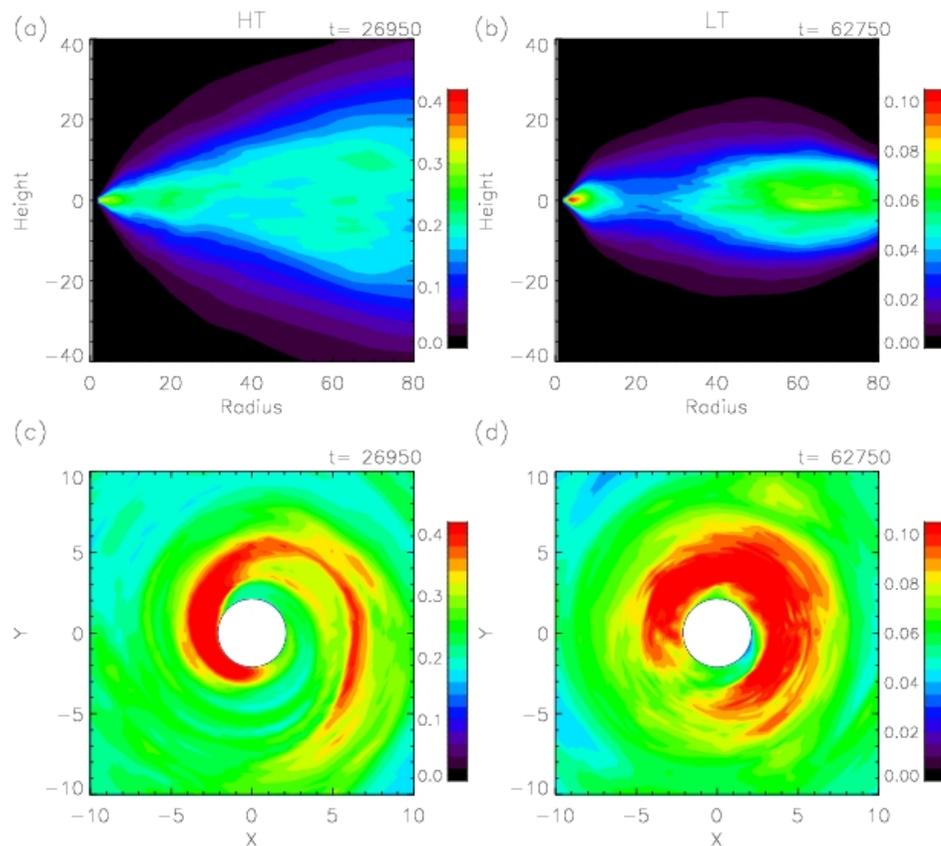
Optical image of sunspots by HINODE

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



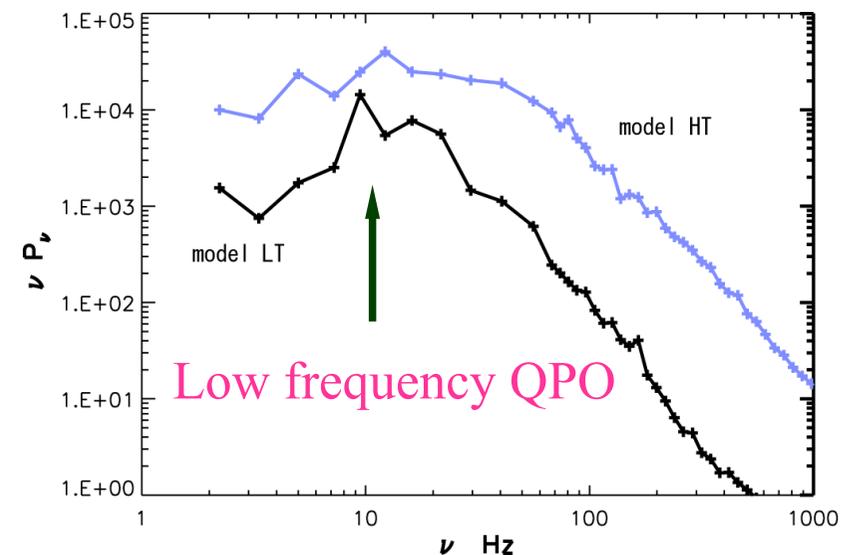
Butterfly Diagram of Sunspots (NASA)

# Inner Torusが形成される場合に QPOが発生



High temperature (HT) model

Low temperature (LT) model

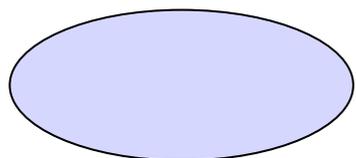
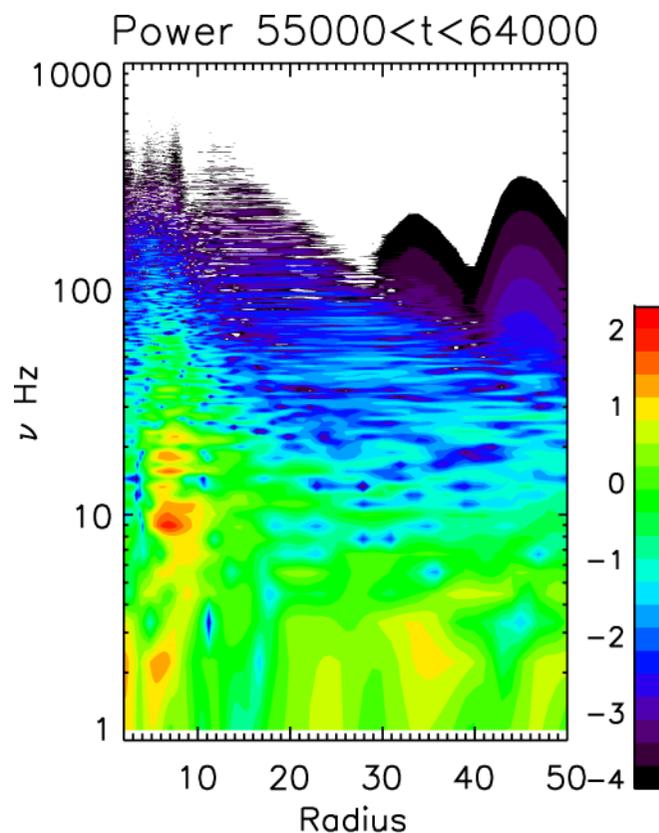
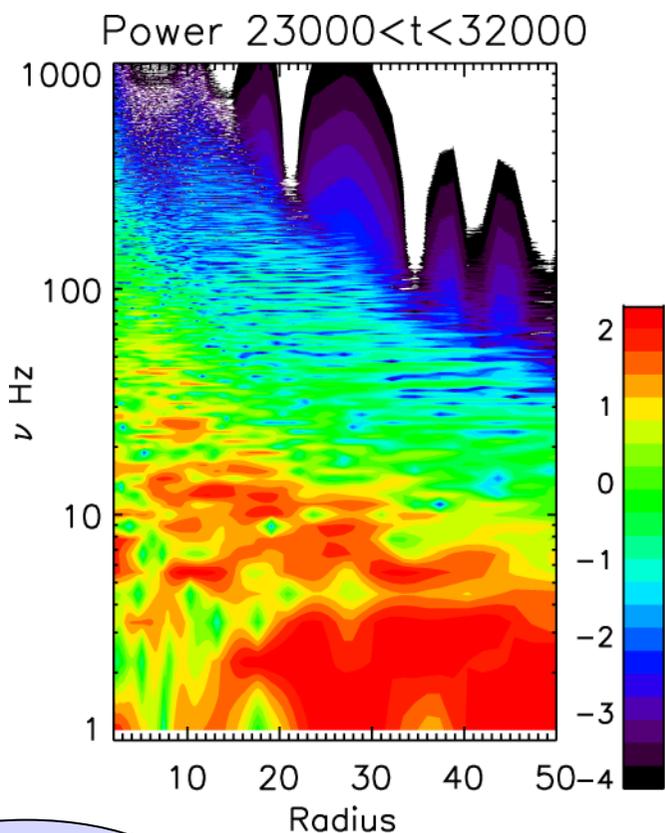


Formation of the inner torus is essential for QPOs

QPO period is about 10 rotation of the inner torus

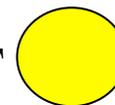
Machida and Matsumoto 2008

# 振動が局在化するとQPOが発生する



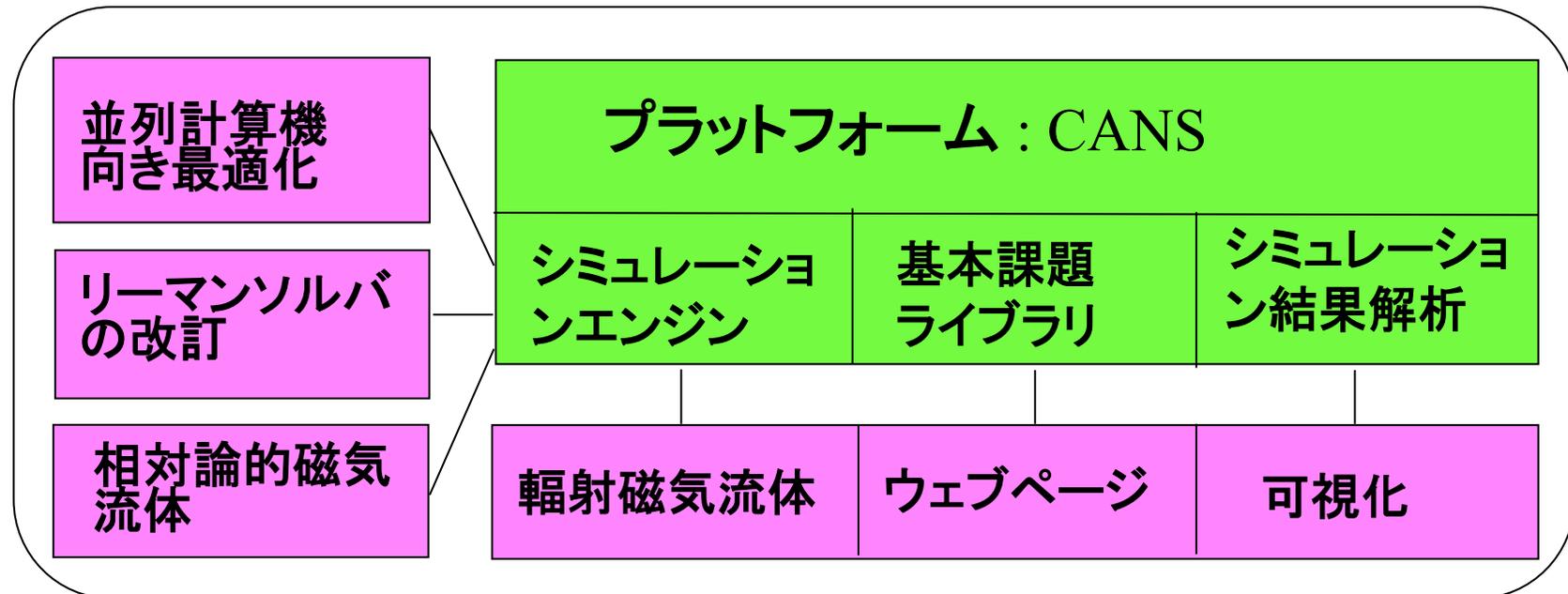
Model HT

Model LT



Machida et al. 2008

# 次世代降着円盤シミュレータの開発

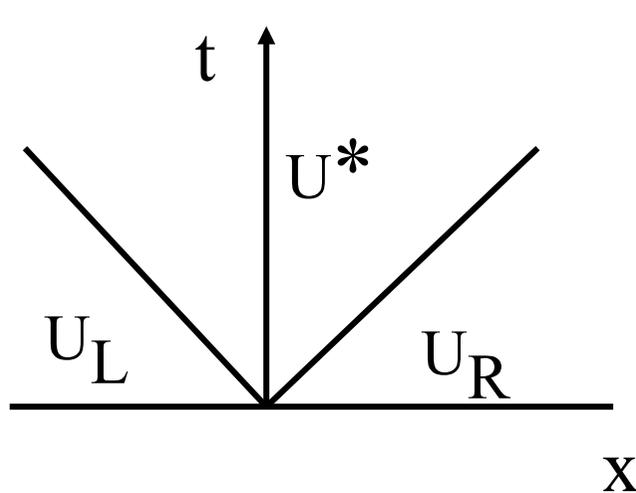


↓ 降着円盤への適用



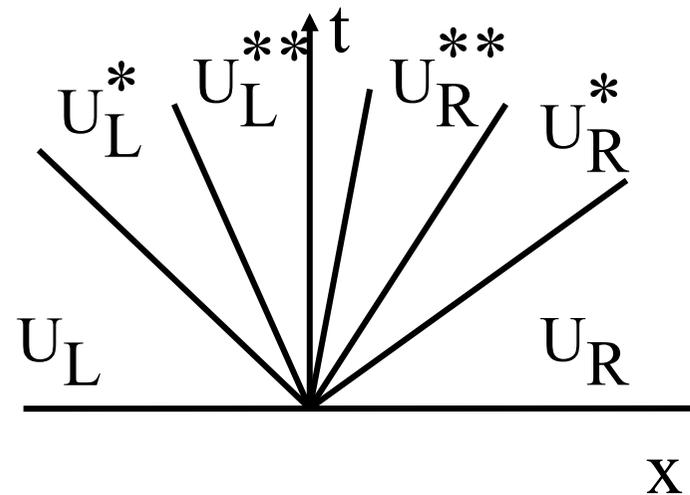
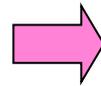
# 磁気流体シミュレーションエンジン改訂

- HLLD Scheme (Miyoshi and Kusano 2005)



HLL スキーム

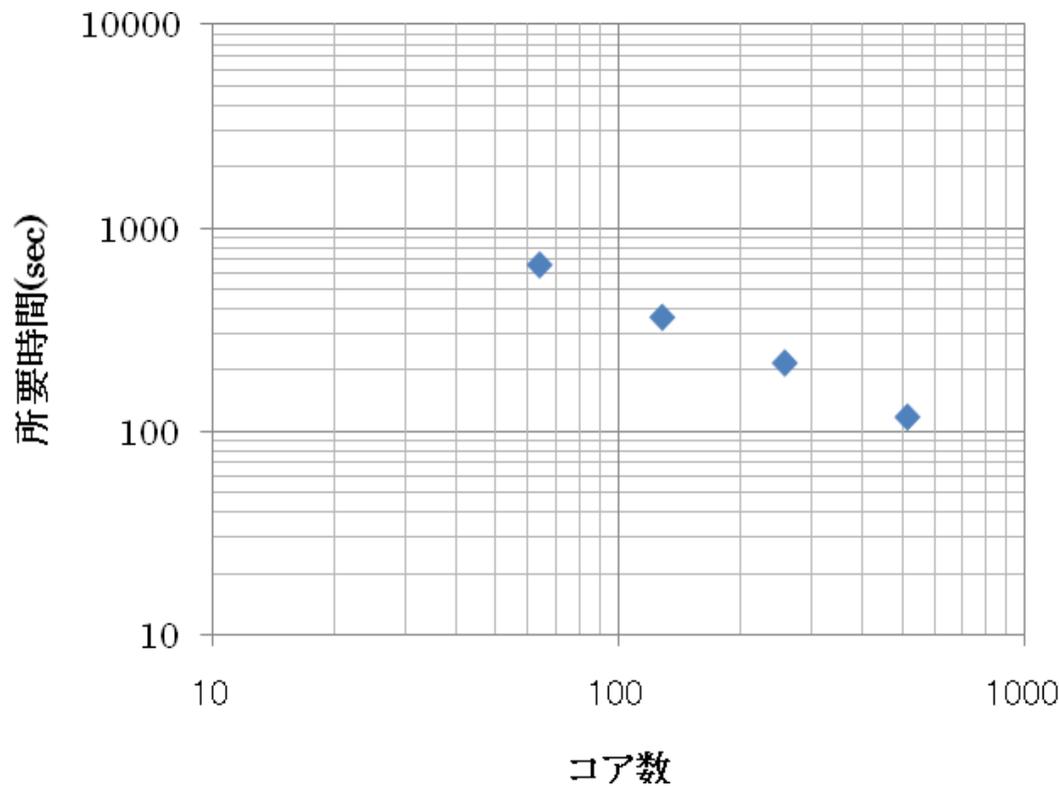
中間状態を1状態で近似



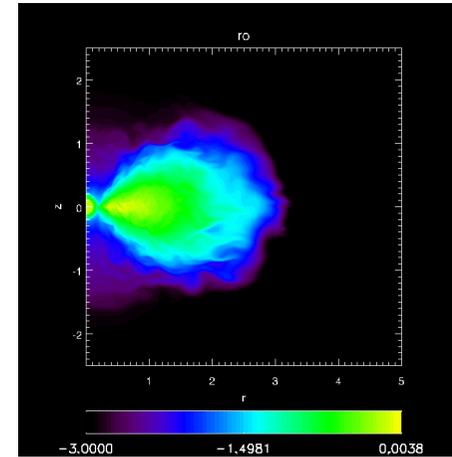
HLLD Scheme

中間状態を4状態で近似。  
密度、磁場の不連続面を  
扱うことができる。

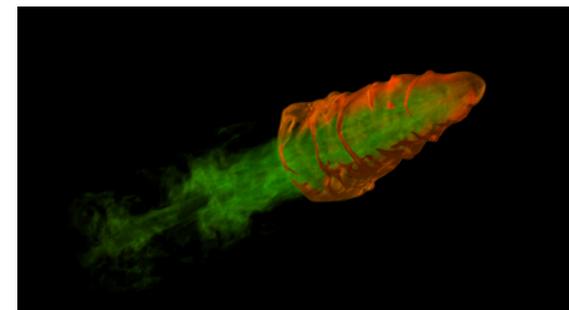
# HLLD法に基づく3次元MHDコード実装



HLLD法に基づく円筒座標系3次元磁気流体コードの並列性能。HA8000において1024×32×1024メッシュを用いた場合の100ステップあたりの所要時間



回転トーラスの磁気流体数値実験結果。15回転後の密度



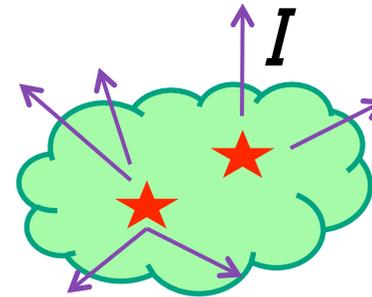
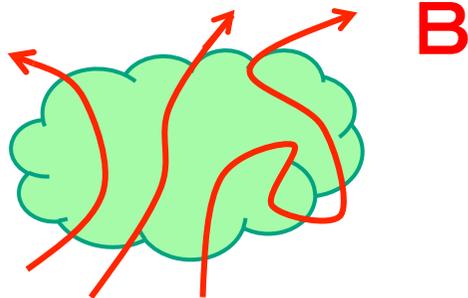
加熱・冷却を考慮したジェット伝播の3次元磁気流体数値実験結果。オレンジは低温高密度領域。

# 輻射と磁気流体の相互作用計算

磁気流体

+

輻射流体

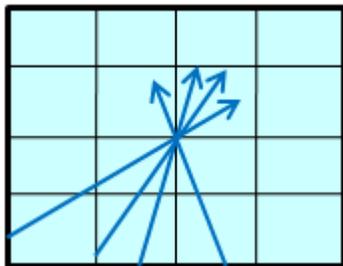


$$\rho(t,x,y,z), \mathbf{v}(t,x,y,z), P(t,x,y,z) \\ + \mathbf{B}(t,x,y,z)$$

$$+ I(t,x,y,z,\nu,\theta,\phi)$$

輻射輸送方程式を解く

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I = \eta - \chi I$$



$$N^6 \times N_{\text{step}}$$

演算量を減らすため、光線方向  
についての平均化が必要

# 1次モーメント(M1)法の実装

$$\partial_t D + \nabla \cdot (D\mathbf{v}) = 0,$$

$$\partial_t E_t + \nabla \cdot \mathbf{F}_t = 0,$$

$$\partial_t \mathbf{F}_t + c^2 \nabla \cdot \mathbf{P}_t = 0,$$

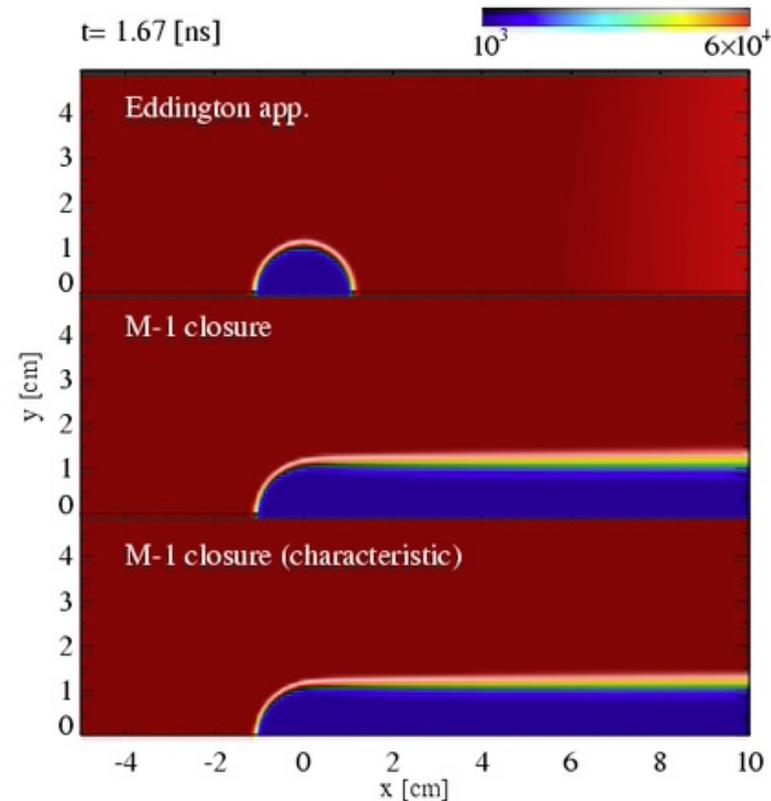
$$\partial_t \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0,$$

$$\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} = 0,$$

$$\partial_t E_r + \nabla \cdot \mathbf{F}_r = S_E$$

$$\partial_t \mathbf{F}_r + \nabla \cdot \mathbf{P}_r = S_F,$$

流束拡散制限近似は用いず、  
輻射輸送方程式の1次のモー  
メント式を解いて輻射流束を  
求める。**陽的解法が可能。**



Shadow テスト結果。上段:FLD近似、  
下段:M1スキーム。色は輻射エネ  
ルギー密度をあらわす。

Takahashi, Ohsuga et al. 2011 (投稿準備中)

# まとめと議論

- 大局的な3次元MHDシミュレーションにより、降着円盤の時間発展を現象論的なパラメータ $\alpha$ を導入せずに調べる事が可能になった。
- 輻射冷却を考慮することにより、降着円盤の状態遷移や準周期振動の発生等を再現できる。
- ハードステートからソフトステートへの遷移は円盤が磁場によって支えられた状態を経る。この状態が明るいハードステートに対応する。
- 3次元輻射磁気流体コードを整備中。

End