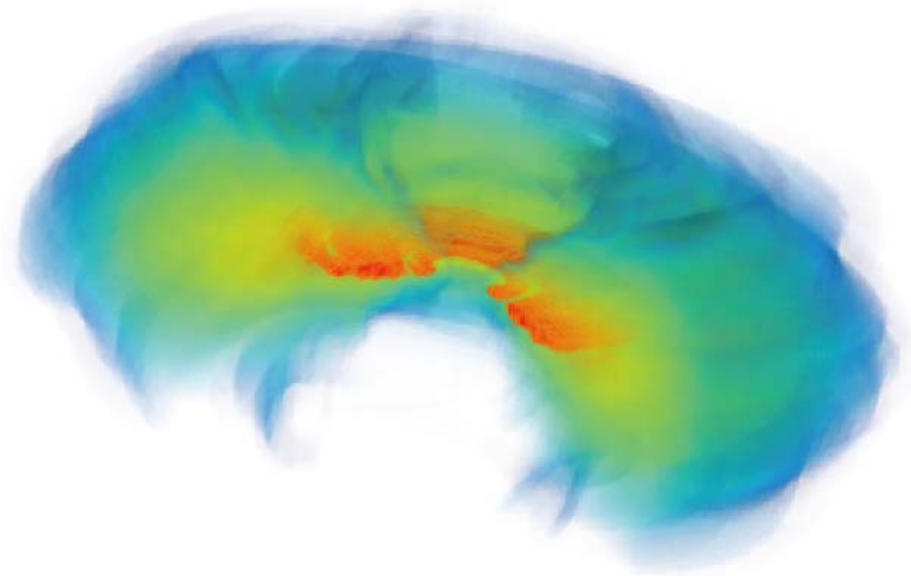
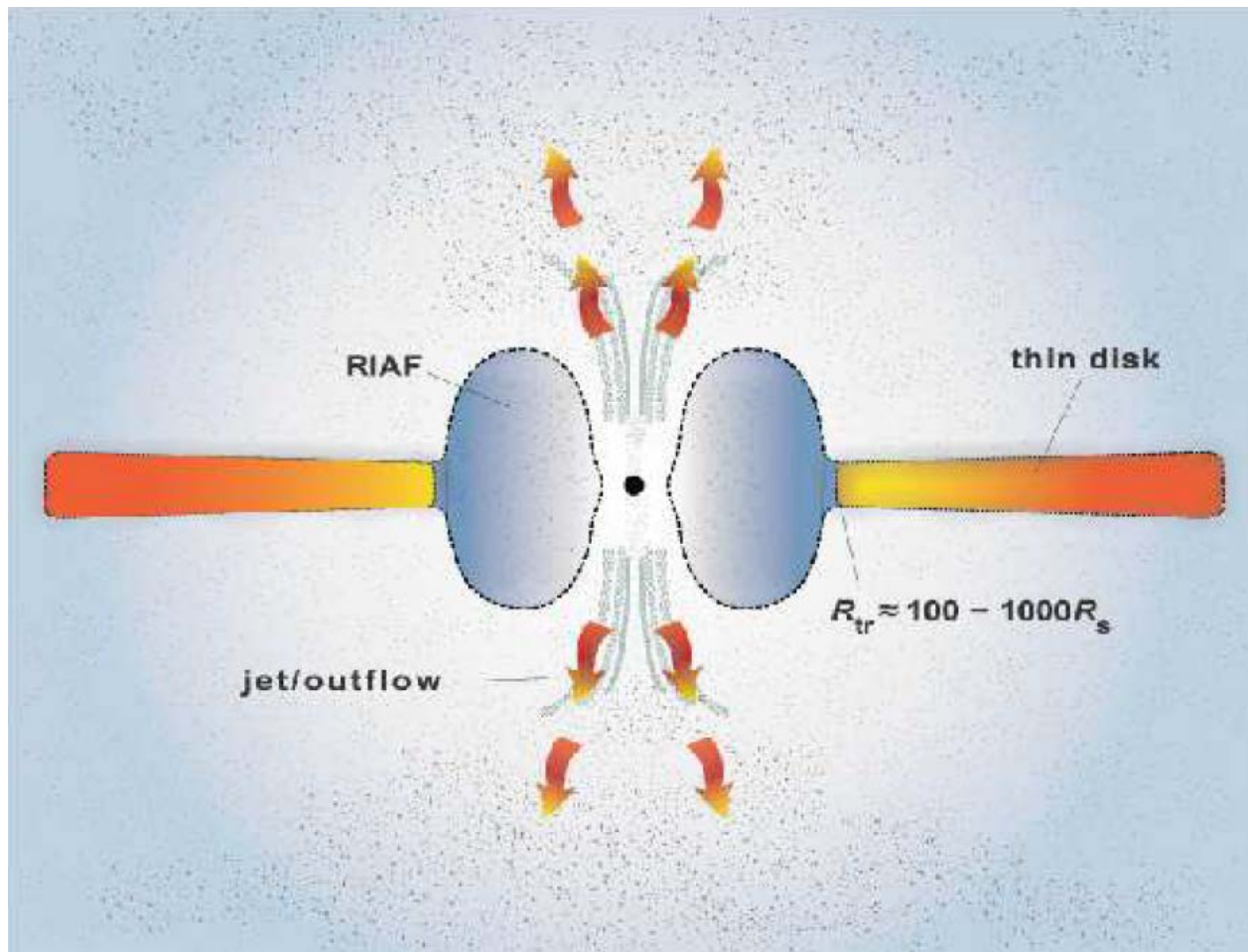


活動銀河中心降着円盤の 状態遷移シミュレーション

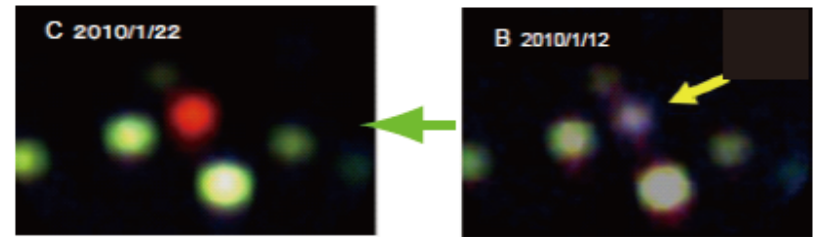
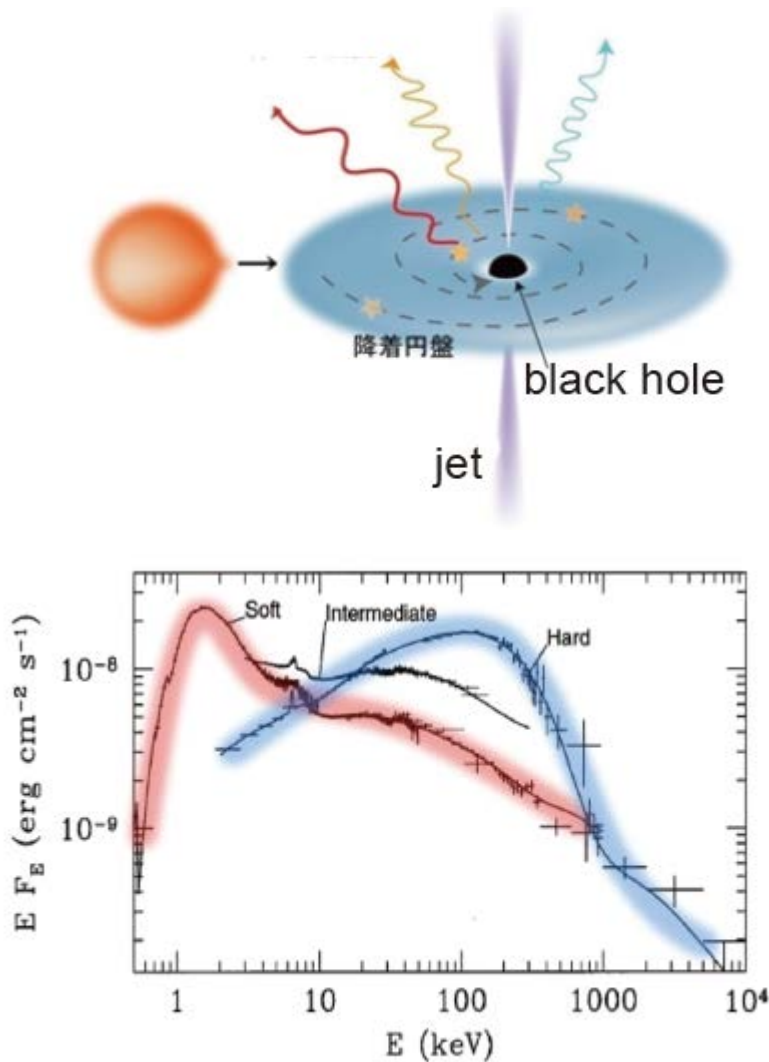


松元亮治(千葉大)

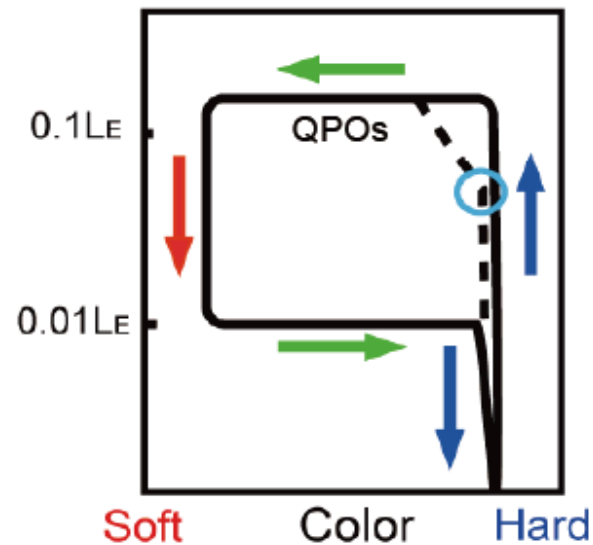
活動銀河中心核エンジン



ブラックホール候補天体の状態遷移



Luminosity

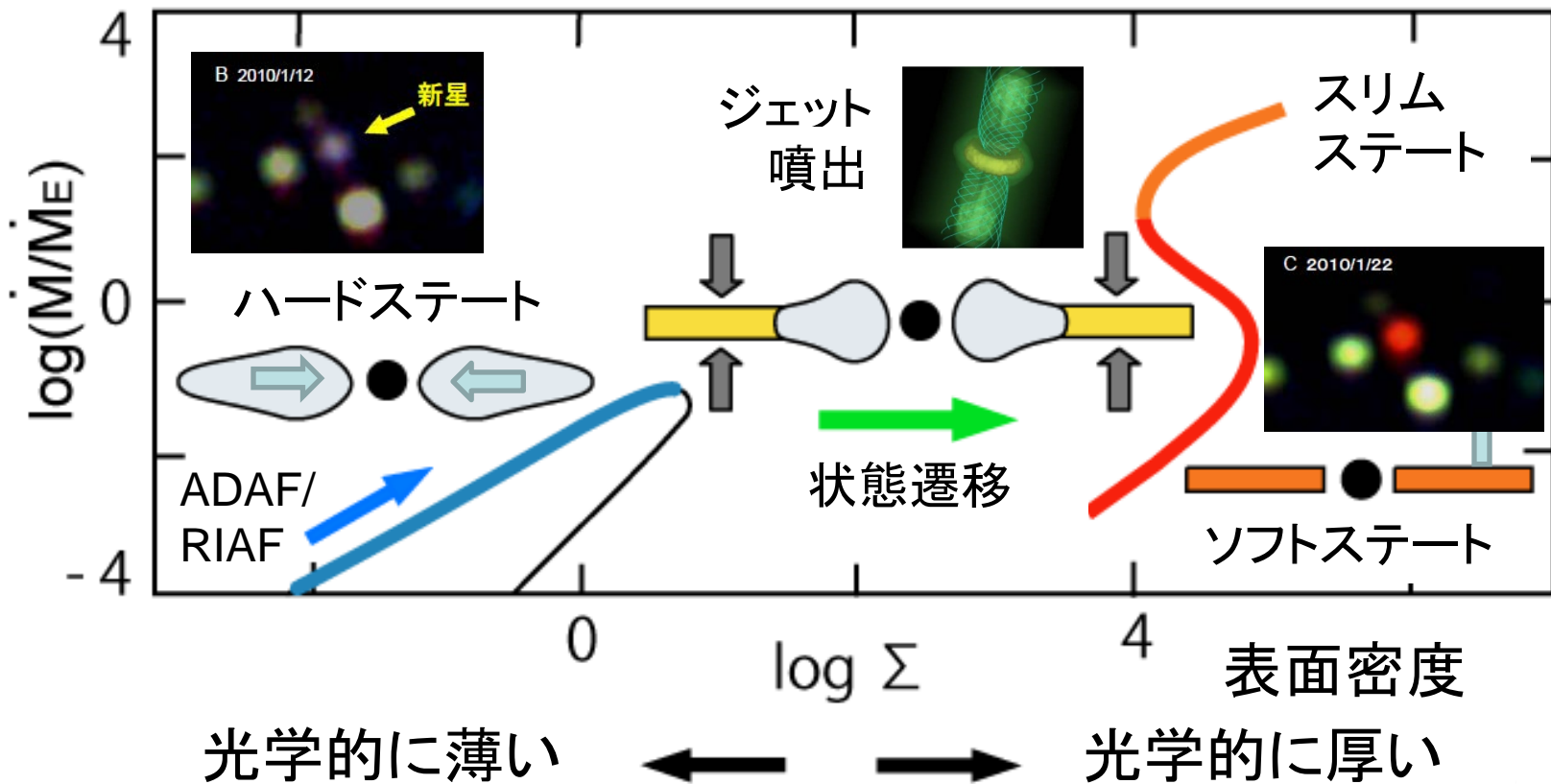


A state transition observed in a black hole candidate XTE J1752-223 and its evolution in the color-luminosity plane (MAXI Science News #17)

Cyg X-1のスペクトル (Gierlinski 1999)

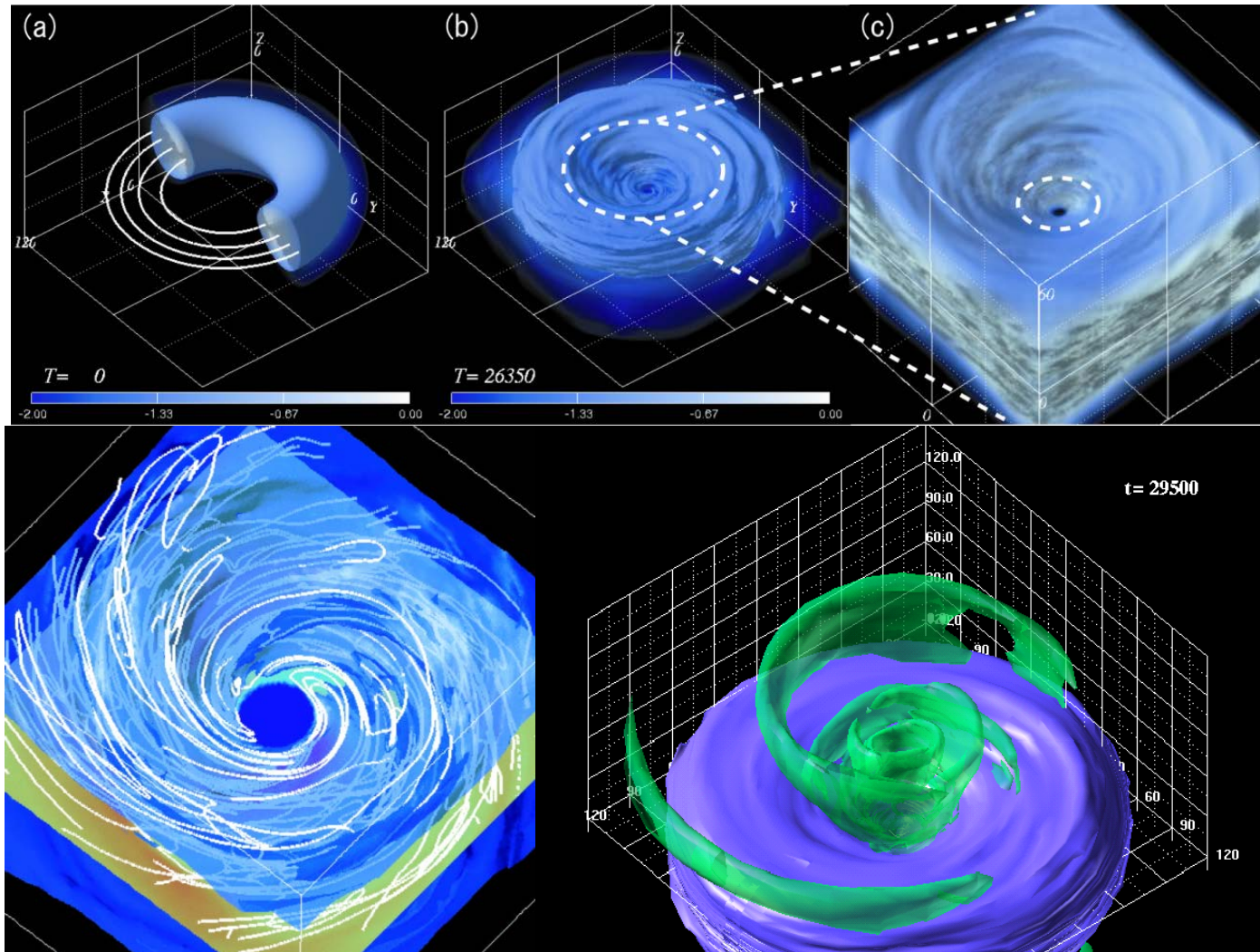
状態遷移の理論モデル

降着率



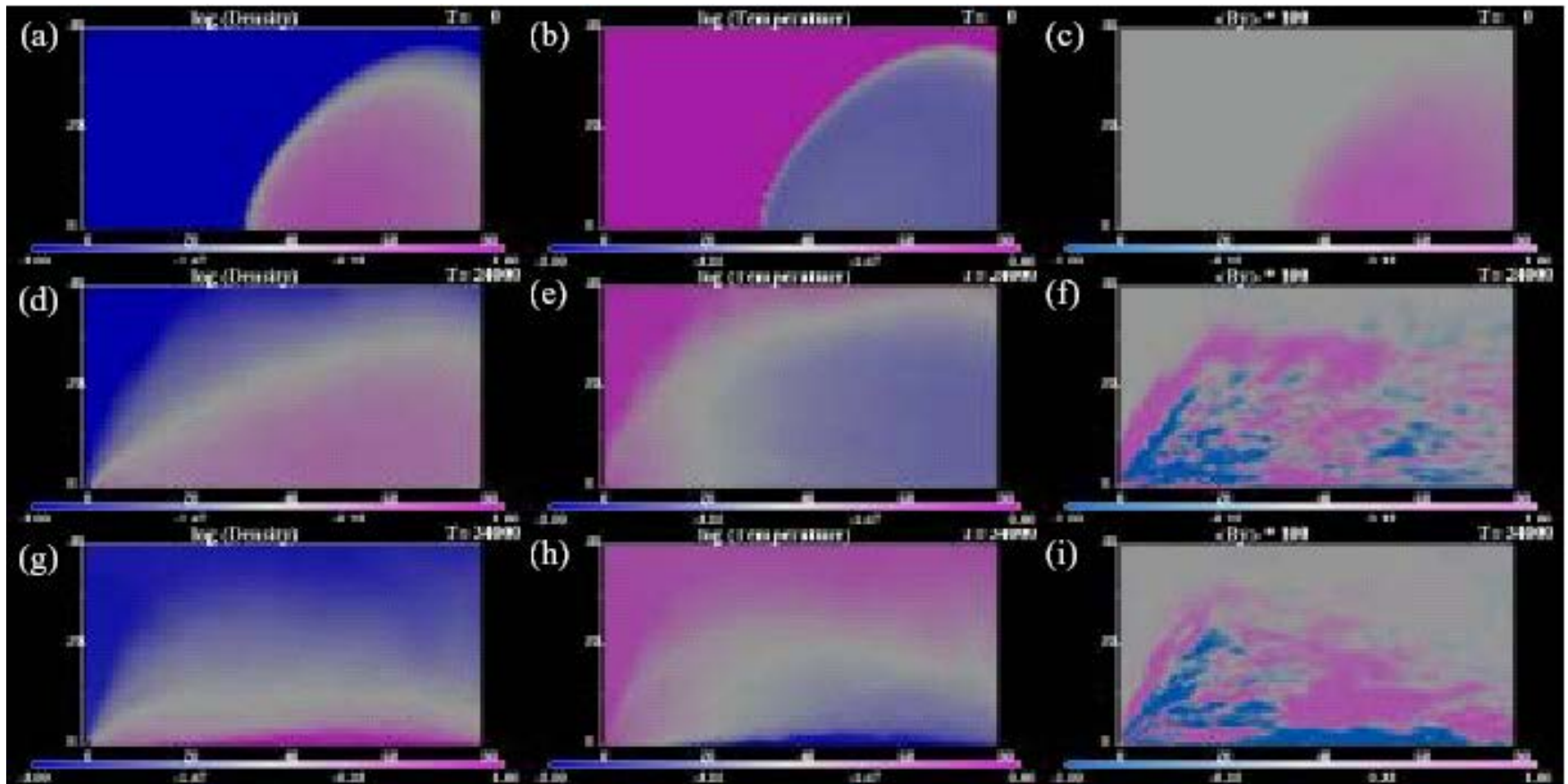
降着円盤の熱平衡曲線(Abramowicz et al. 1995)

ブラックホール降着流の3次元 磁気流体シミュレーション



Machida and
Matsumoto
2003

輻射冷却を考慮したシミュレーション

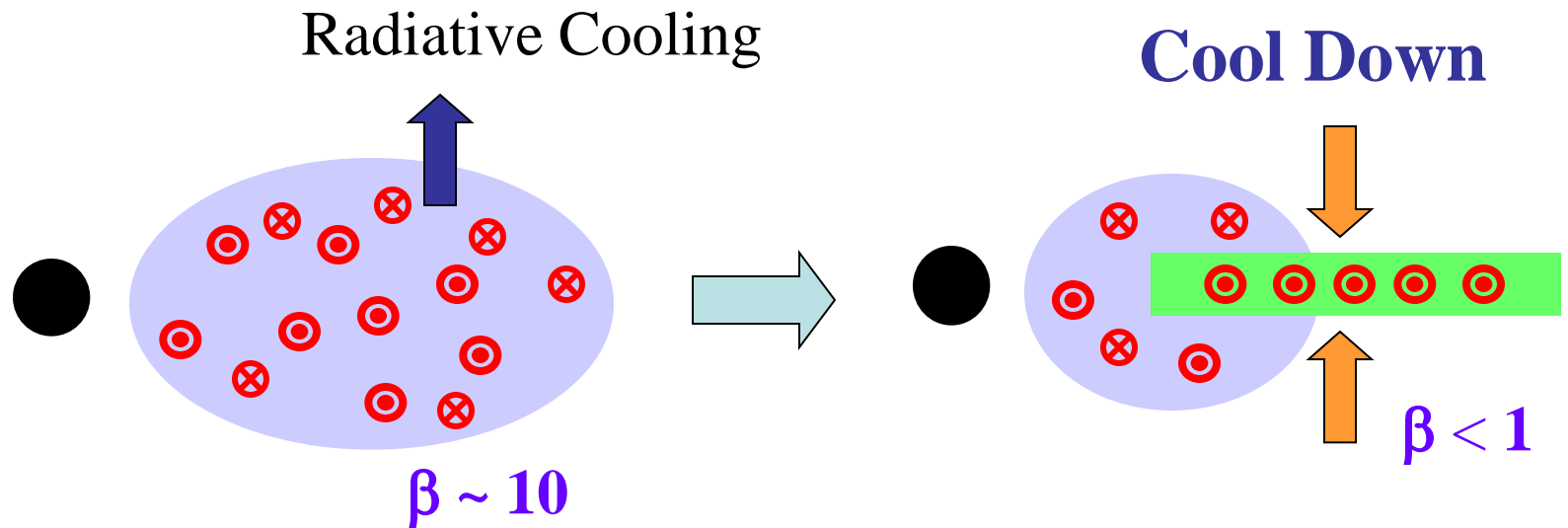


density

temperature

Toroidal field

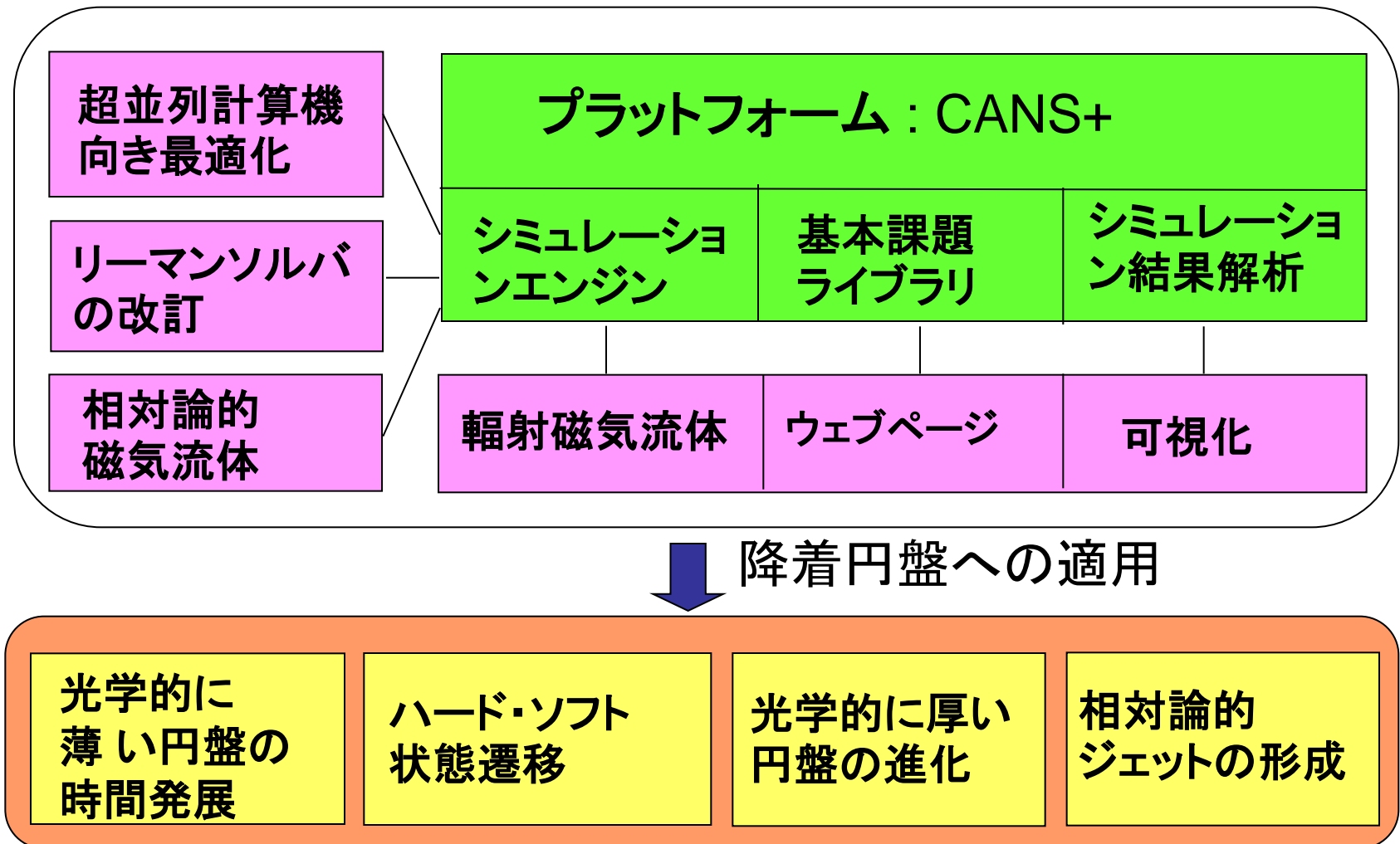
磁気圧で支えられた円盤の形成



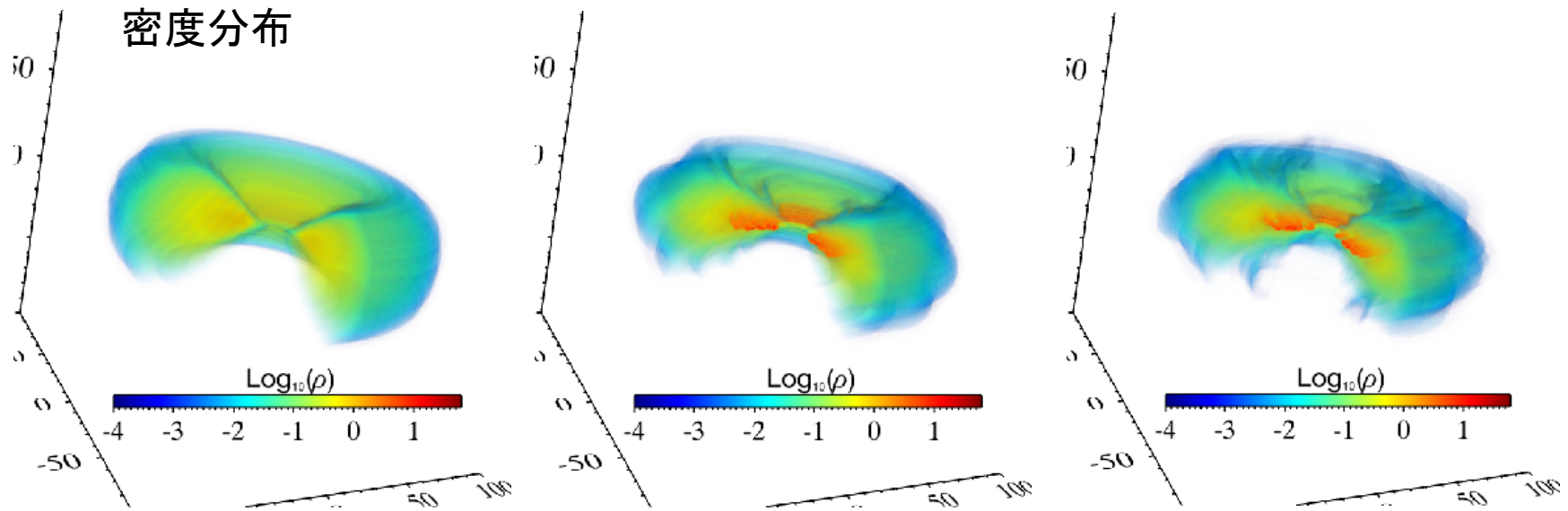
Optically Thin Hot Disk
Supported by Gas Pressure

Optically Thin Cool Disk
Supported by Magnetic Pressure

降着円盤シミュレータの改訂



輻射冷却を考慮した数値実験結果

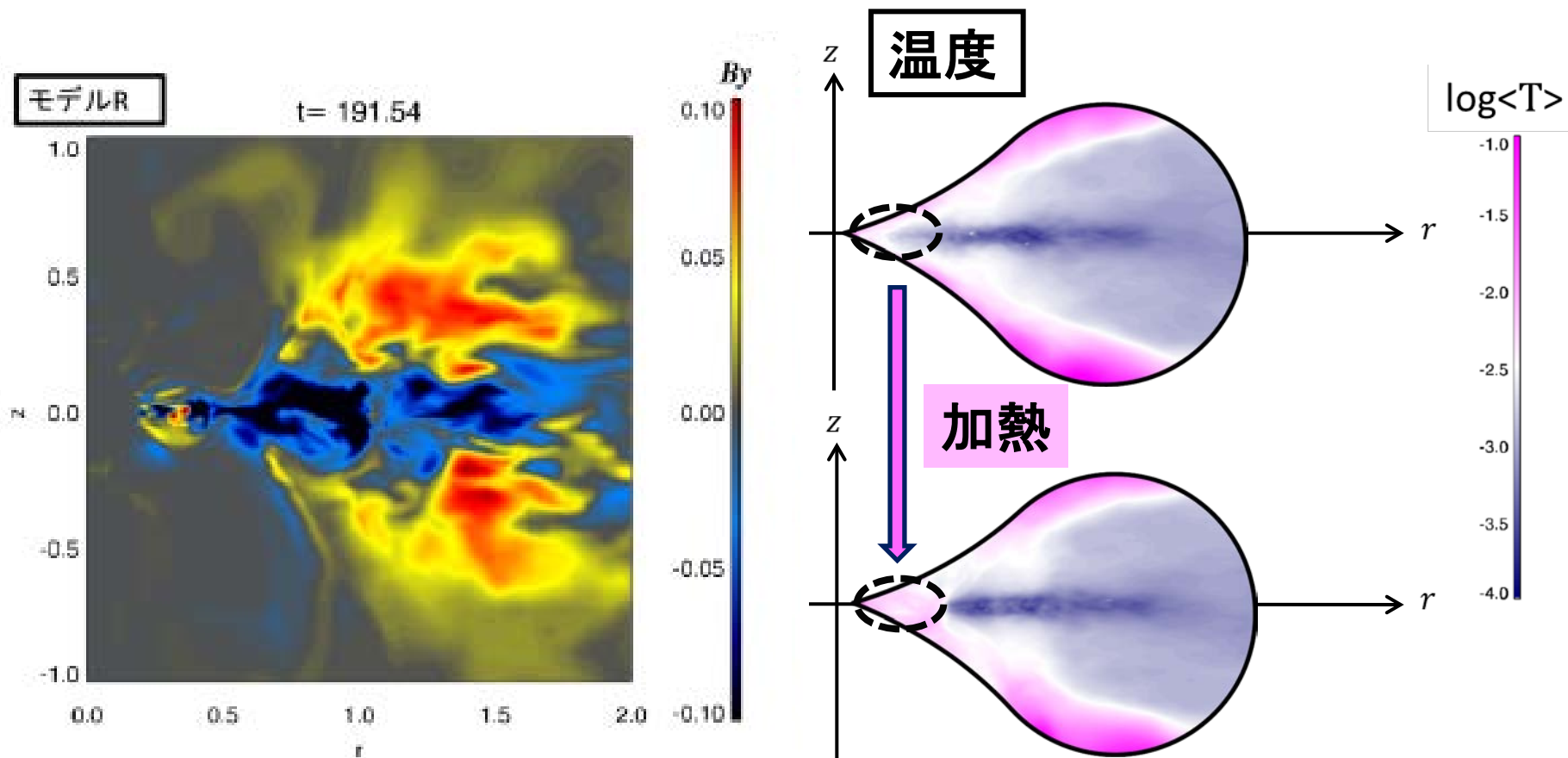


(256,64,256)メッシュ
計算で準定常降着流
が形成された後、輻射
冷却項を加える
(赤道面上下とも計算
領域に含める)

冷却不安定性の成長
による低温高密度領
域の形成(従来のシ
ミュレーションコード
ではこの段階までしか計
算できていなかった)

ブラックホール近傍の
高温領域とその外側の
低温領域の境界で発生
する爆発的な磁気エネ
ルギー解放による噴出
流の形成

ブラックホール近傍での磁気エネルギー解放と明るいハードステート円盤の形成

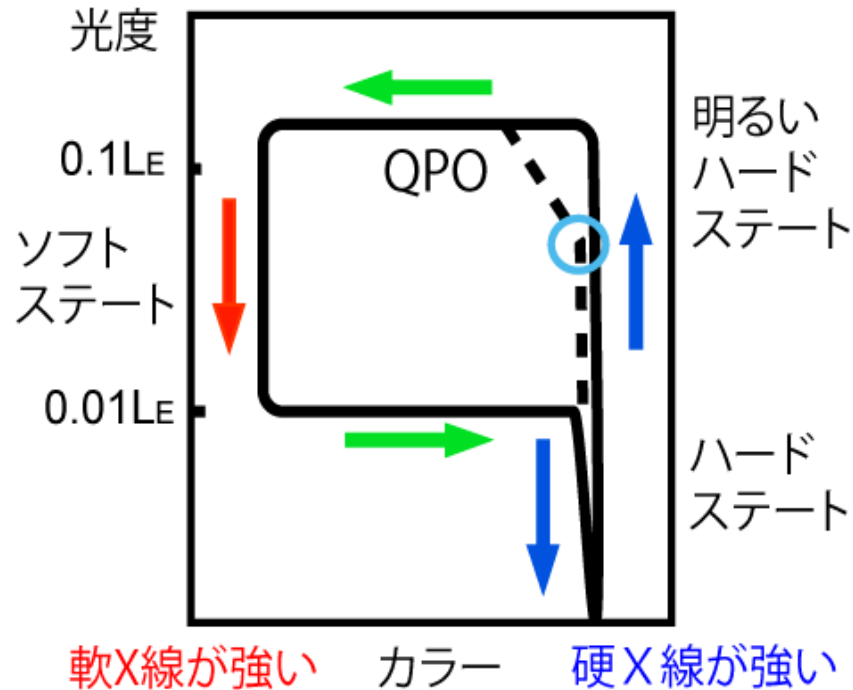


ブラックホール近傍の高温円盤(RIAF)で発生する円盤ダイナモの磁場とその外側の低温円盤を支える方位角磁場がリコネクトする

降着率増大に伴う降着円盤の進化



ジェット
噴出
←

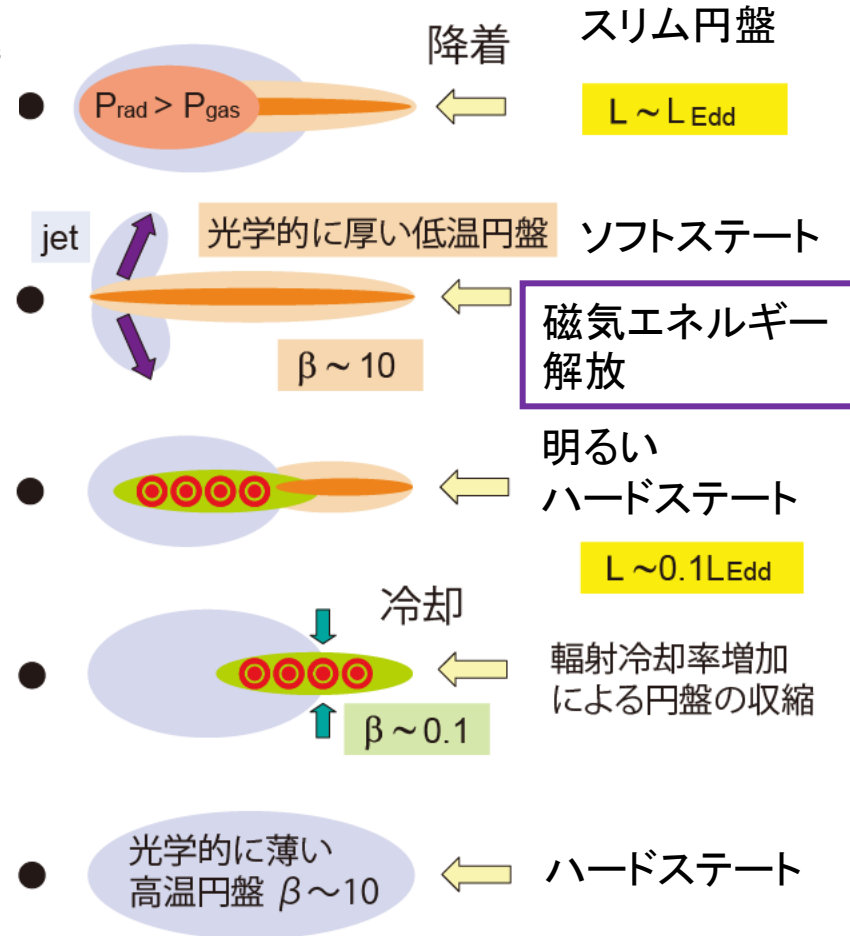


降着率

光度



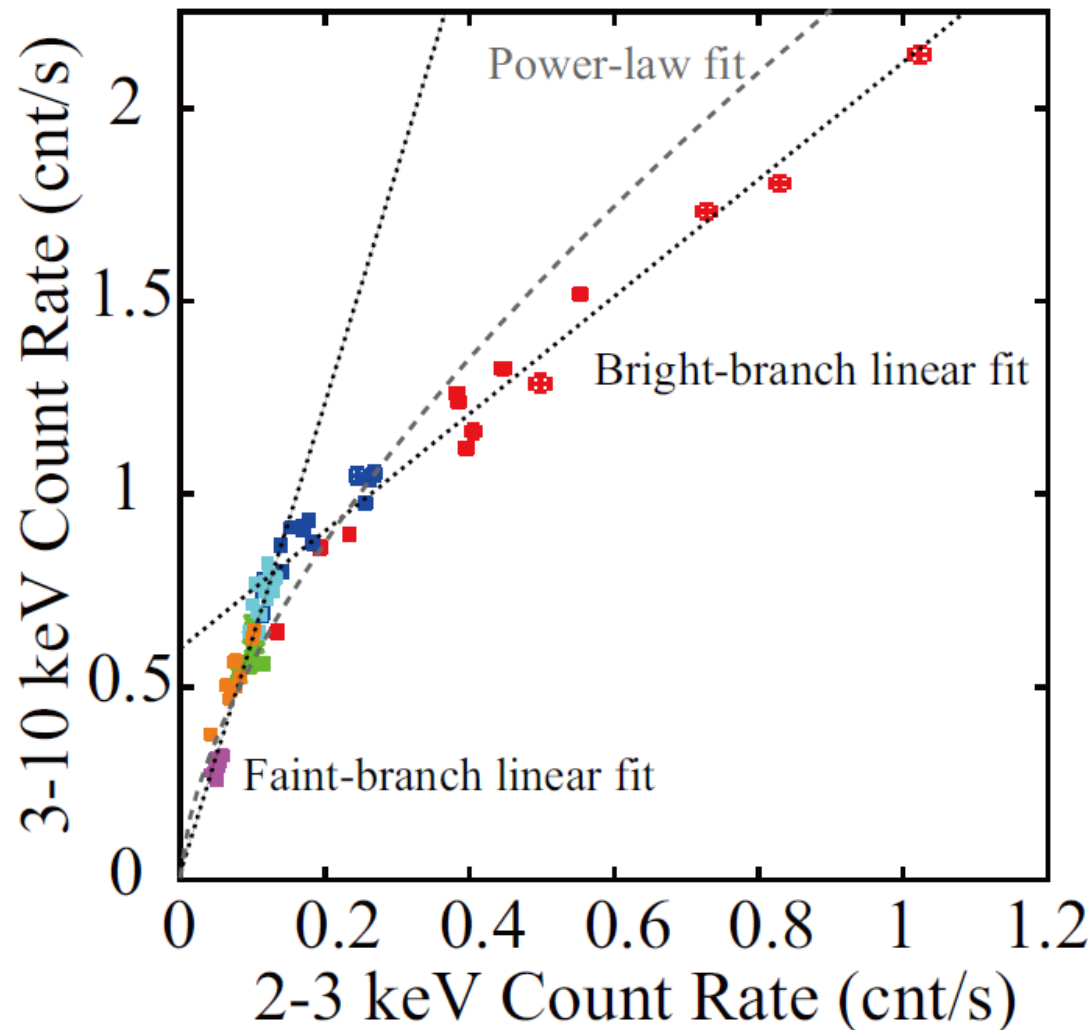
小



銀河系内ブラックホール候補天体の進化経路。破線と上図はMAXIによる XTE J1752-223の観測結果

エディントン光度 (L_{Edd}): 球対称降着の場合に 輻射圧=重力 となる光度

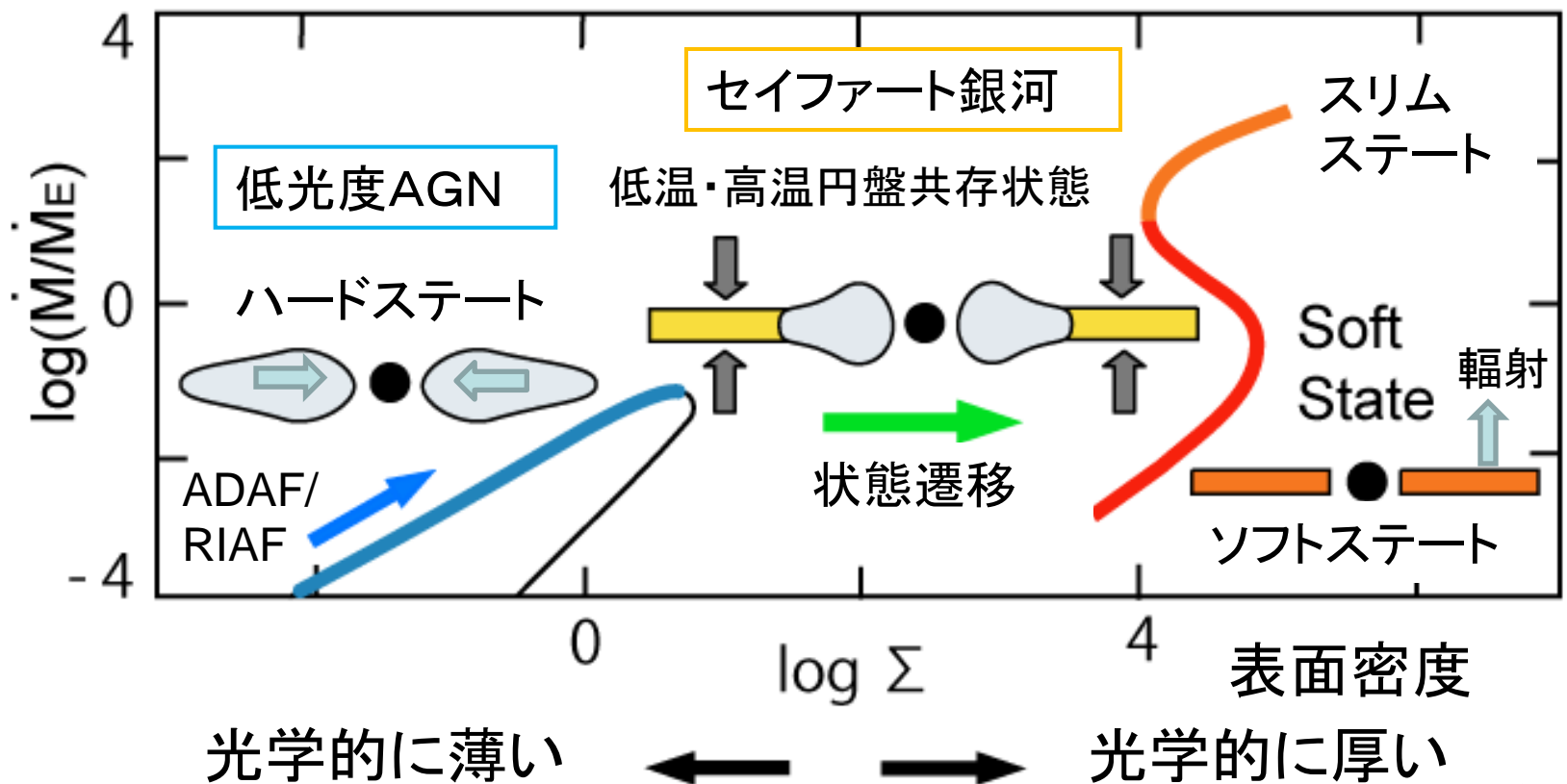
X線ハードネスの変化：状態遷移



Noda et al. 2014,
ApJ 794, article id. 2

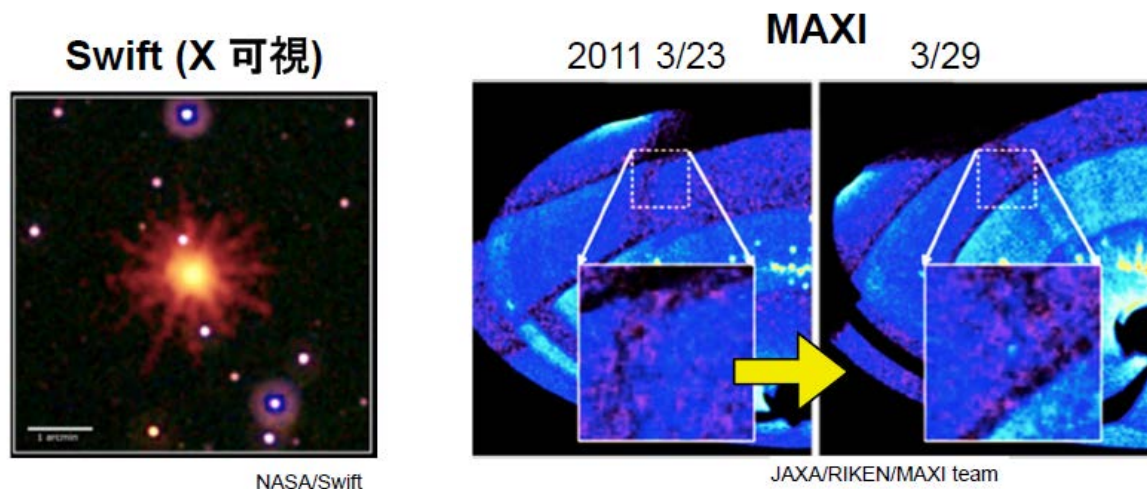
活動銀河中心核の状態遷移モデル

降着率

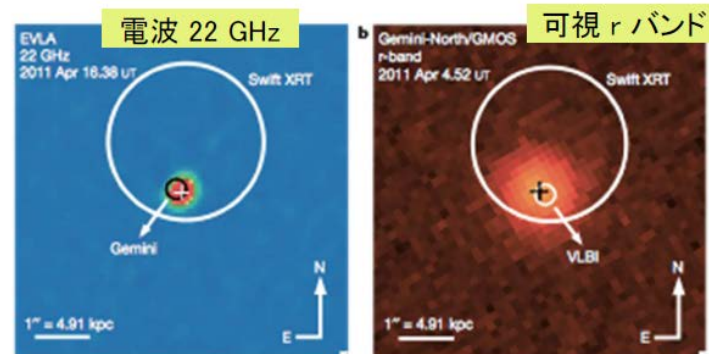


潮汐破壊事象Swift J1644+57

- 2011年3月28日 Swift衛星が発見
- MAXIもほぼ同時に検出



- $z=0.3534$ の系外銀河の
中心 に対応する電波源を発見
 L_{bulge} と M_{BH} の関係性 $\rightarrow < 2 \times 10^7 M_{\odot}$
 $L_X \sim 10^{48} \text{ erg/s} \gg L_{\text{Edd}} \sim 10^{44} M_6 \text{ erg/s}$



ブラックホールによる潮汐破壊

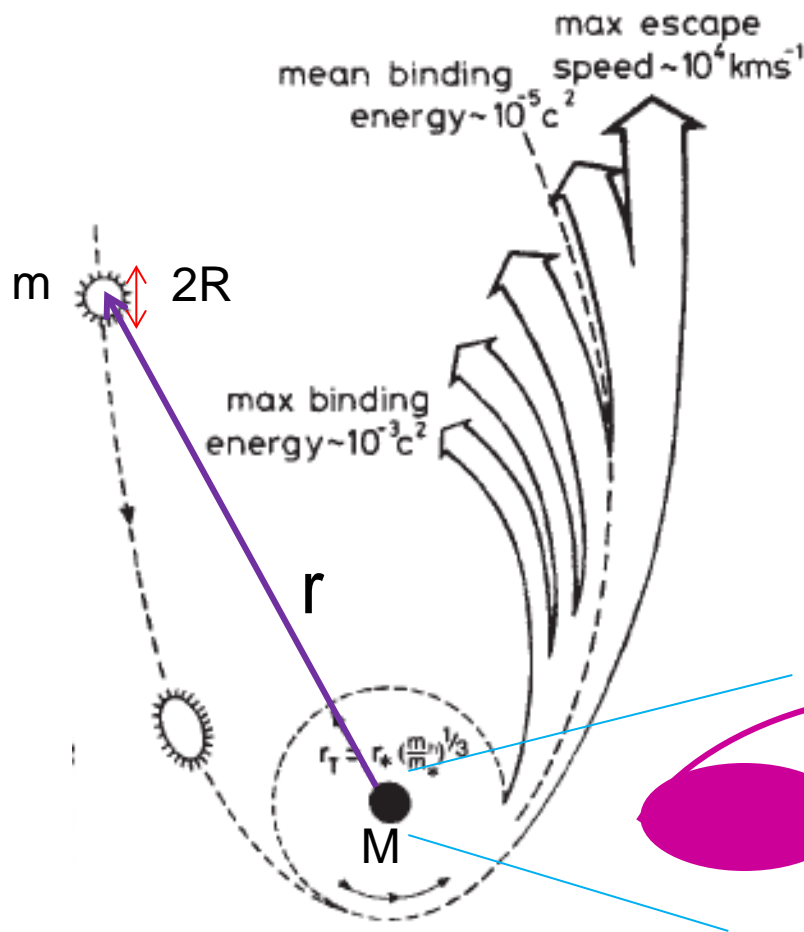
潮汐力 : GMR/r^3

自己重力: Gm/R^2

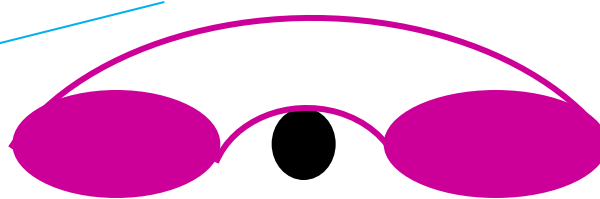
潮汐破壊される条件
 $GMR/r^3 > Gm/R^2$

$$r/R < (M/m)^{1/3}$$

$M=10^6 M_{\text{sun}}$
 $m=M_{\text{sun}}$
 $R=10^{11} \text{cm}$ なら
 $r < 100 R_s$

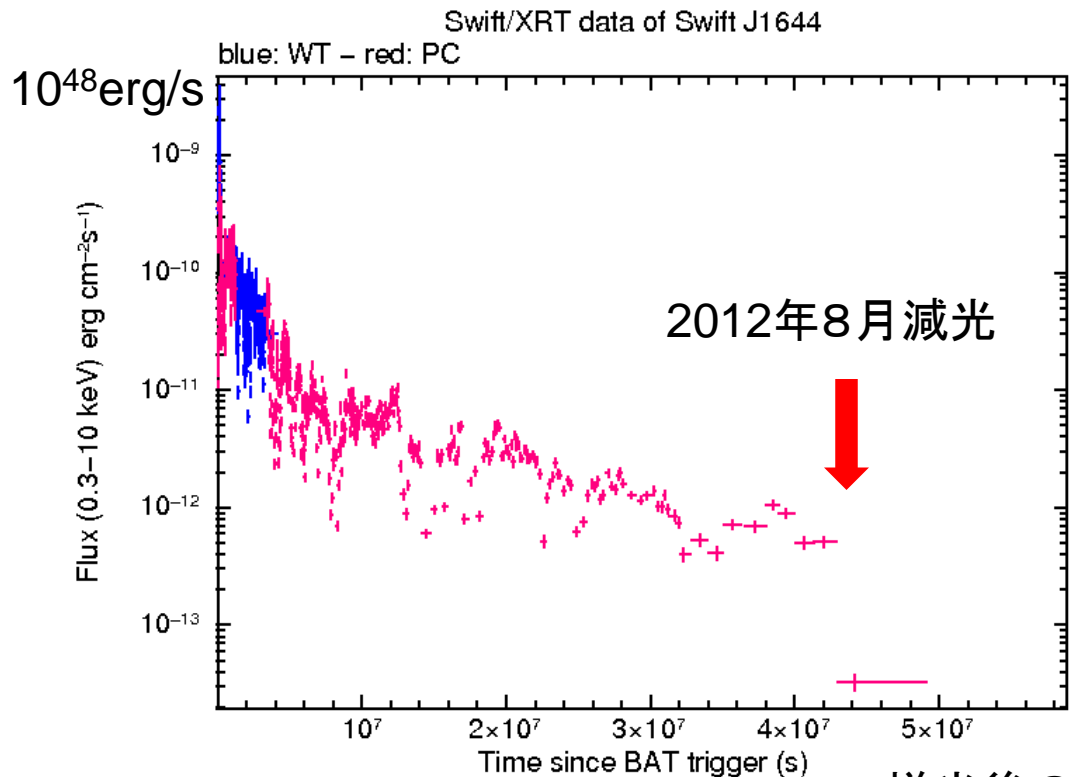


Rees (1988)



$$\dot{M} \sim \frac{1}{3} \frac{M_*}{t_{\text{fallback}}} \left(\frac{t}{t_{\text{fallback}}} \right)^{-5/3}$$

Swift J1644+57のX線減光

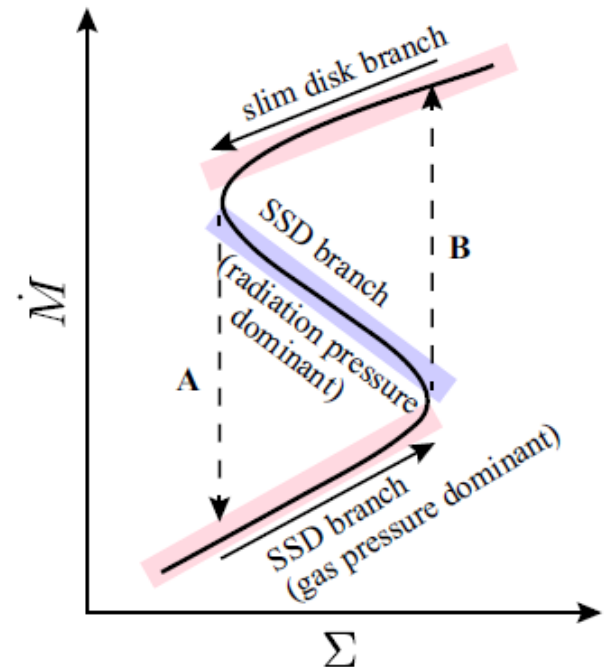


2011年3月

増光後の
時間

Swift J1644+57のFlux Light Curve

http://www.swift.ac.uk/xrt_curves/00450158/

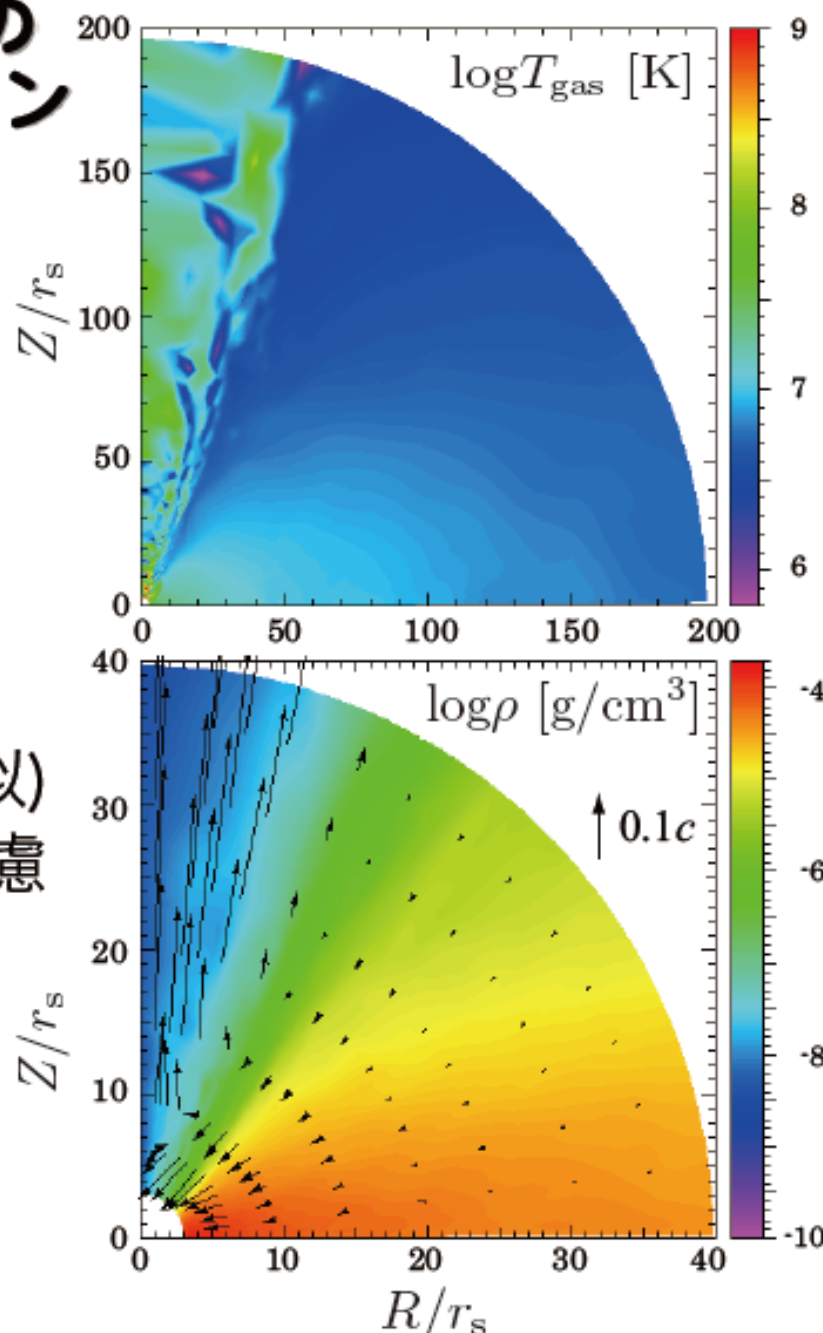


減光がスリム円盤から標準円盤への遷移なら、直前の光度 ($L = 1.4 \times 10^{44} \text{ erg/s}$) がエディントン光度の1~2倍
 $\Rightarrow M = 10^6$ 太陽質量

ブラックホール超臨界降着流の 2次元輻射流体シミュレーション

Kawashima et al. 2009

- 球座標 $(r, \theta) = (96, 192)$
- α 粘性 ($\alpha = 0.1$)
$$T_{r\phi} = \alpha(p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}})$$
- 輻射輸送
 - ✧ 流速制限拡散近似 (FLD近似)
 - ✧ コンプトン冷却/加熱を考慮



- 光度 > エディントン光度
- 準定常状態
- 超臨界降着流 + アウトフロー

基礎方程式

• 連続の式: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$

• 運動方程式: $\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\vec{\nabla} p - \rho \vec{\nabla} \psi + \rho \vec{N} + \frac{\kappa + \sigma}{c} \vec{F}_0$

BH A粘性 重力

• ガスエネルギー式:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e \vec{v}) = -p \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \Phi_{vis} - 4\pi \kappa B + c \kappa E_0 - 4\sigma_T n_e c \frac{k_B (T_{gas} - T_{rad})}{m_e c^2} E_0$$

粘性加熱 コンプトン散乱

• 輻射エネルギー式:

$$\frac{\partial E_0}{\partial t} + \nabla \cdot (E_0 \vec{v}) = -\vec{\nabla} \cdot \vec{F}_0 - \vec{\nabla} v : \vec{P}_0 + 4\pi \kappa B - c \kappa E_0 + 4\sigma_T n_e c \frac{k_B (T_{gas} - T_{rad})}{m_e c^2} E_0$$

• 輻射フラックス:

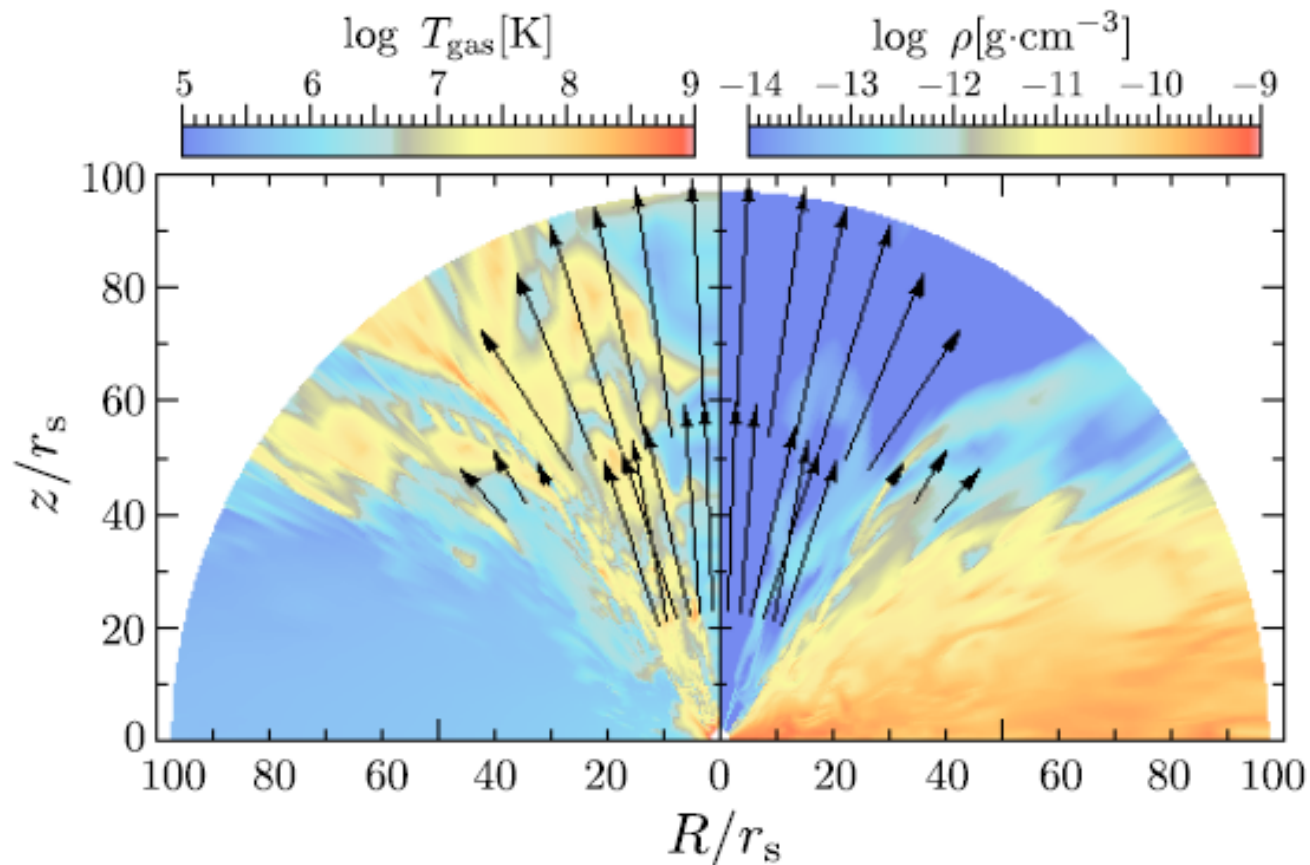
$$\vec{F}_0 = -\frac{c \lambda}{\kappa + \sigma} \vec{\nabla} E_0 \quad \leftarrow \text{FLD Approximation}$$

• クロージャ関係:

$$\vec{P}_0 = \vec{f} E_0$$

スリム円盤とジェット形成

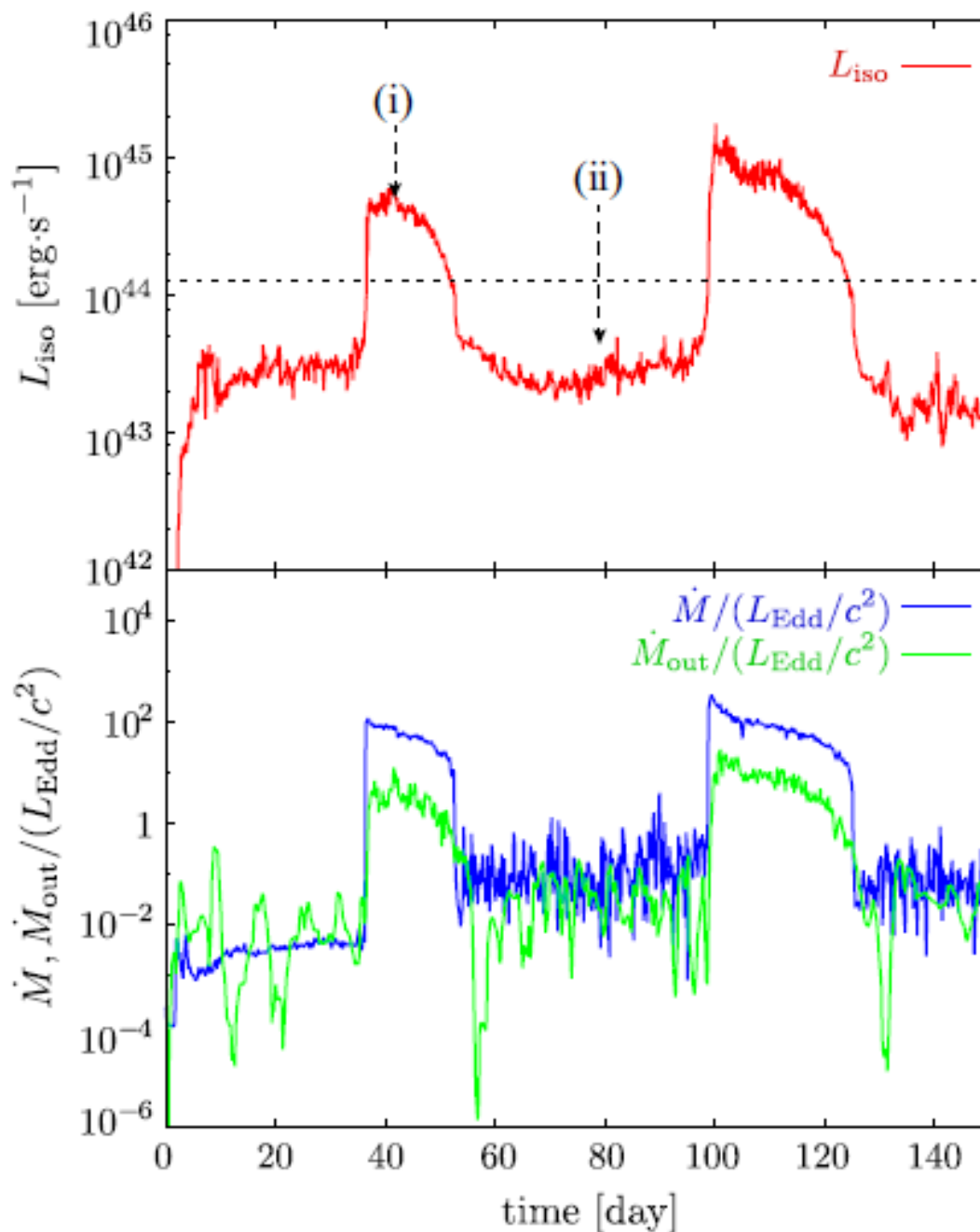
(i) Super-Eddington Phase (time = 41.67 [day])



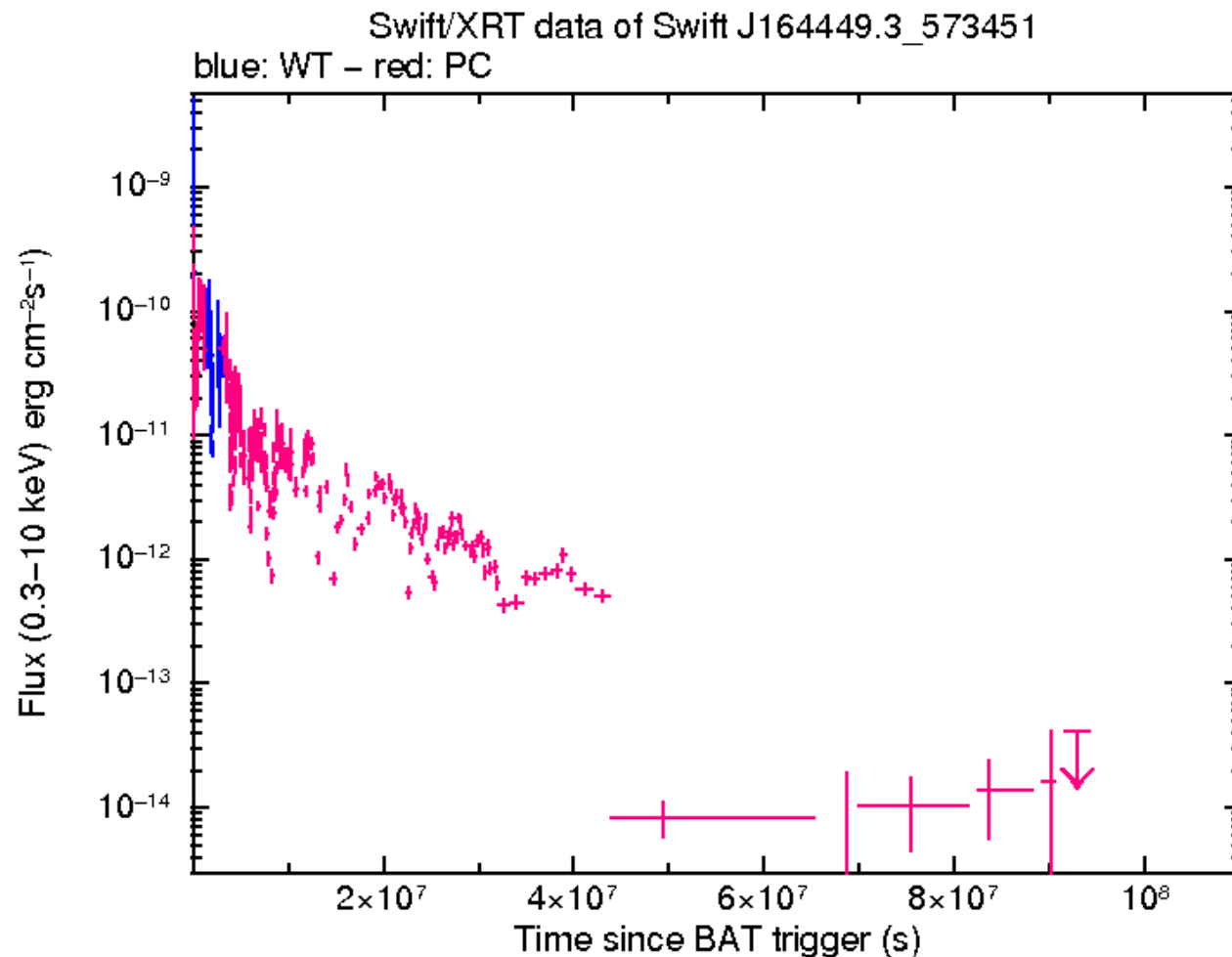
光度变化

降着率变化

Kawashima et al. 2013
PASJ Letter

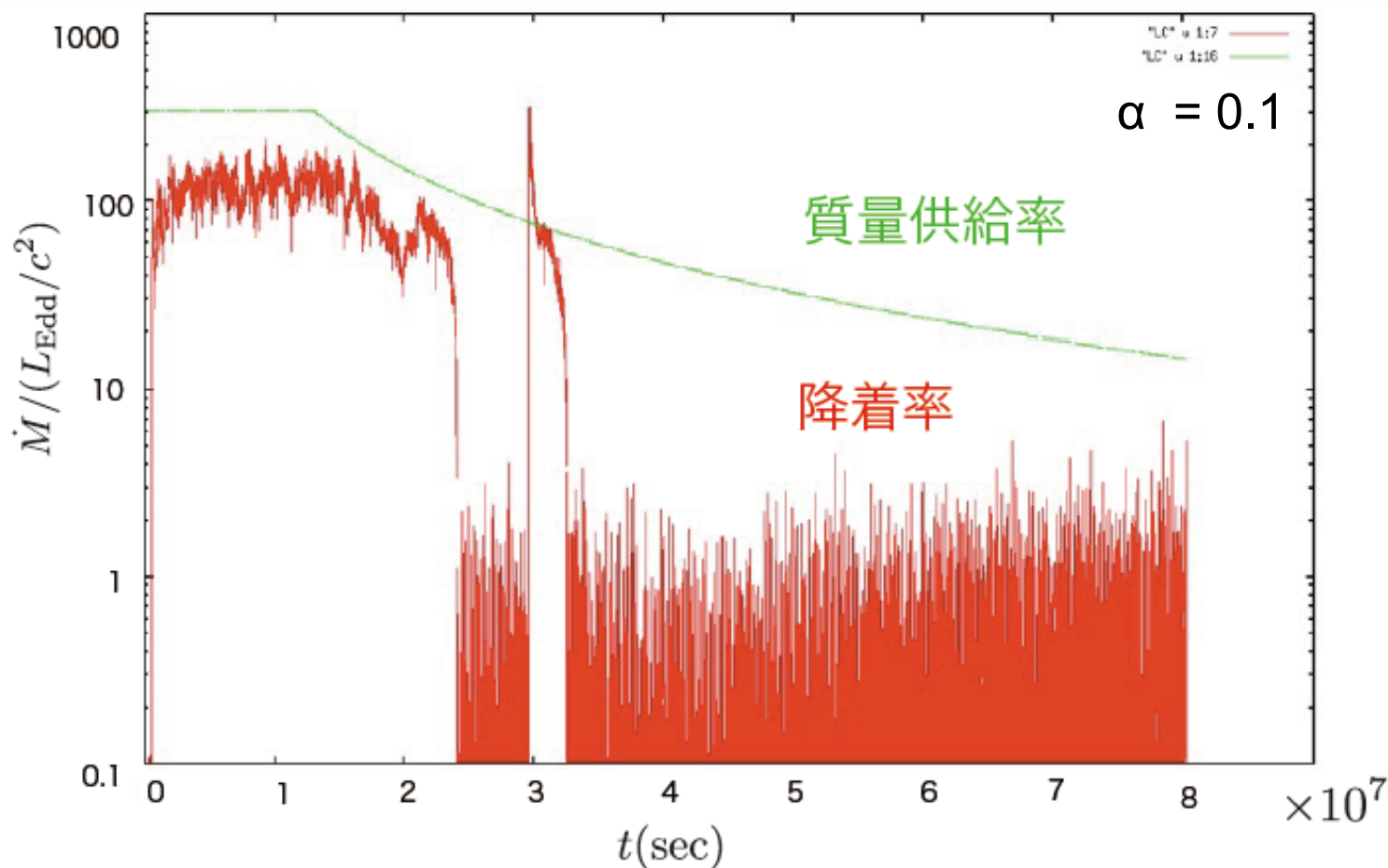


増光の兆候はあるか？



質量供給率を変化させたシミュレーション

(1) 潮汐破壊半径約60rs, circular半径約30rs



標準円盤に戻ったあと、バーストは1回だけ。

まとめと議論

- 「すざく」衛星によるセイファート銀河のX線観測の結果、低光度の場合はRIAF領域から放射されると考えられる硬X線が観測されるのに対し、光度がエディントン光度の0.1%を超えると軟X線成分があらわれる
- 輻射冷却を考慮した3次元磁気流体計算の結果この軟X線は冷却不安定性によって形成される低温高密度領域とRIAF領域の境界付近から放射されている可能性が示唆された
- 今後、熱伝導とコンプトン散乱を考慮したシミュレーション結果から輻射スペクトルを求め、Astro-Hによる観測と比較したい、

END