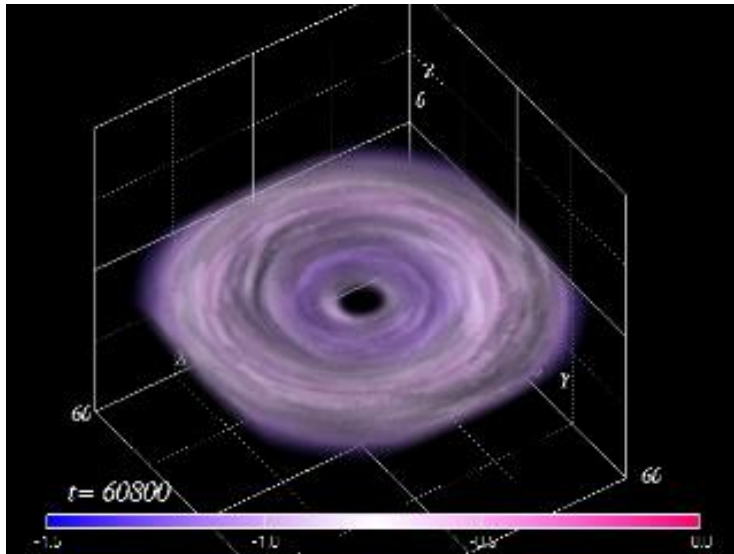
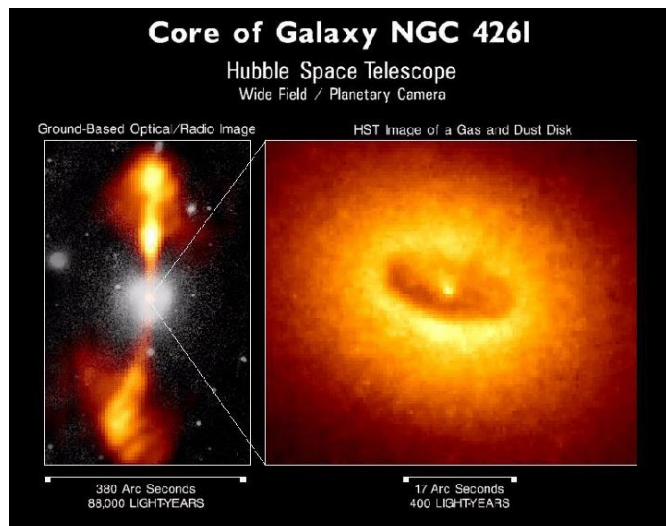


降着円盤とX線観測

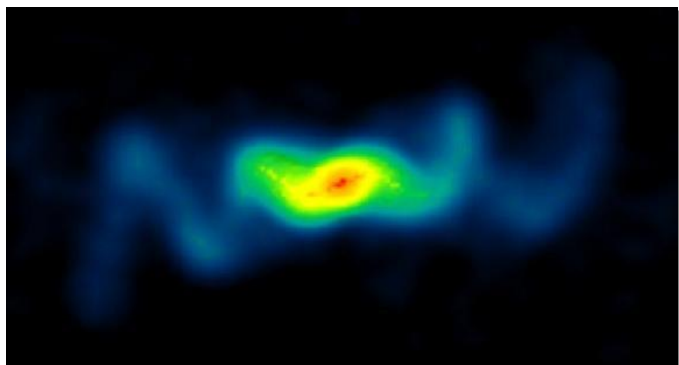


松元亮治(千葉大)

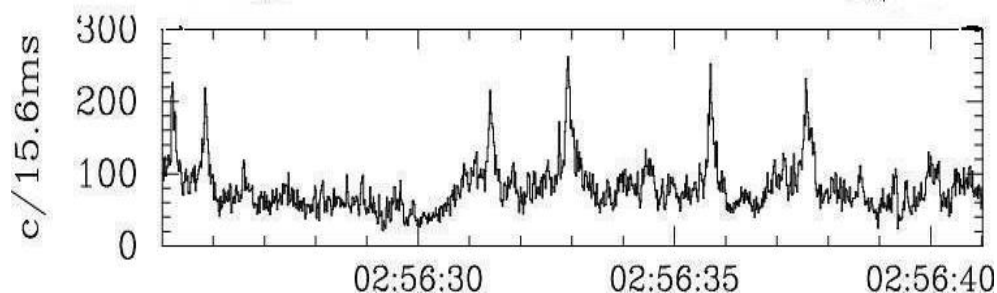
ブラックホール候補天体の活動性



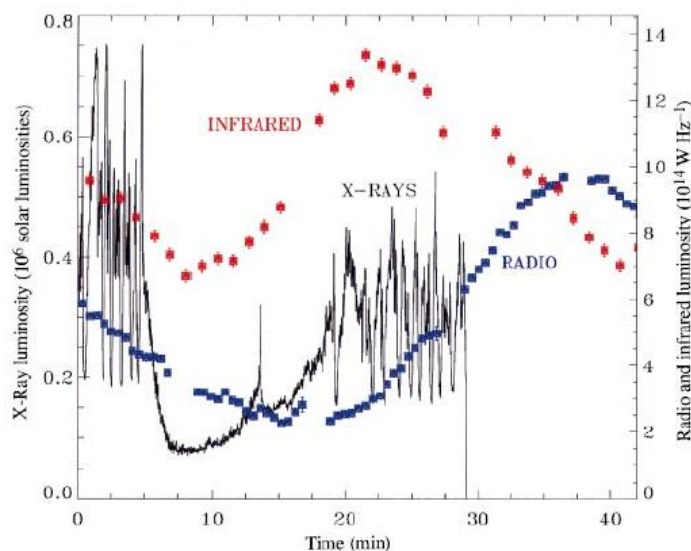
AGN Jets



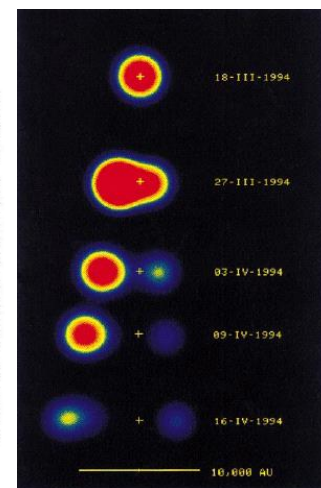
SS433 Jet



X-ray light curve of Cyg X-1 (Negoro 1995)

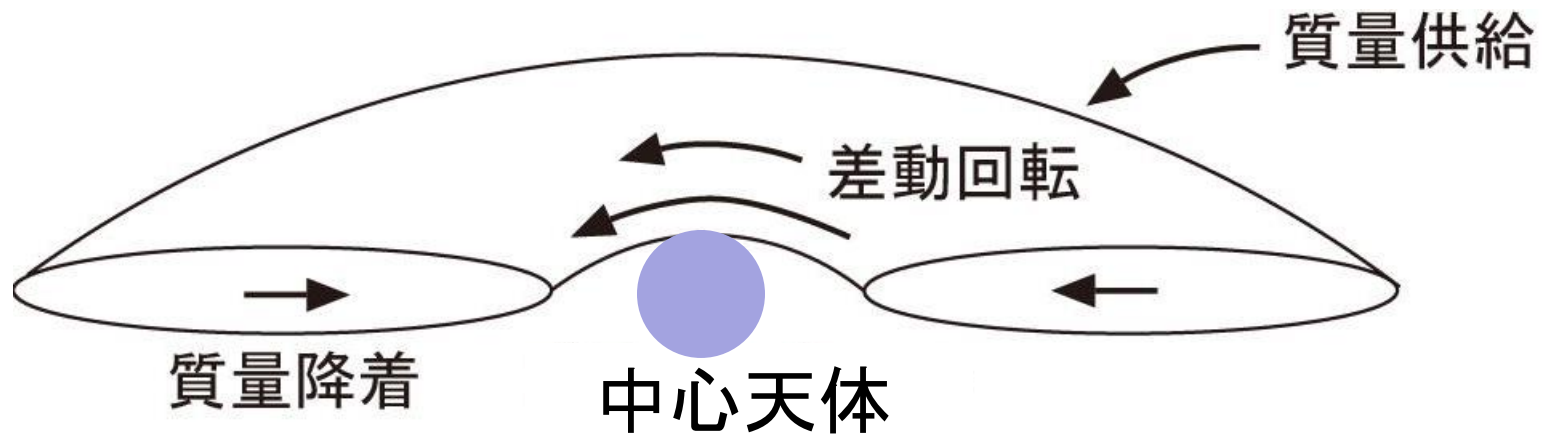


Microquasar GRS1915+105



Mirabel and Rodriguez 1998

降着円盤モデル



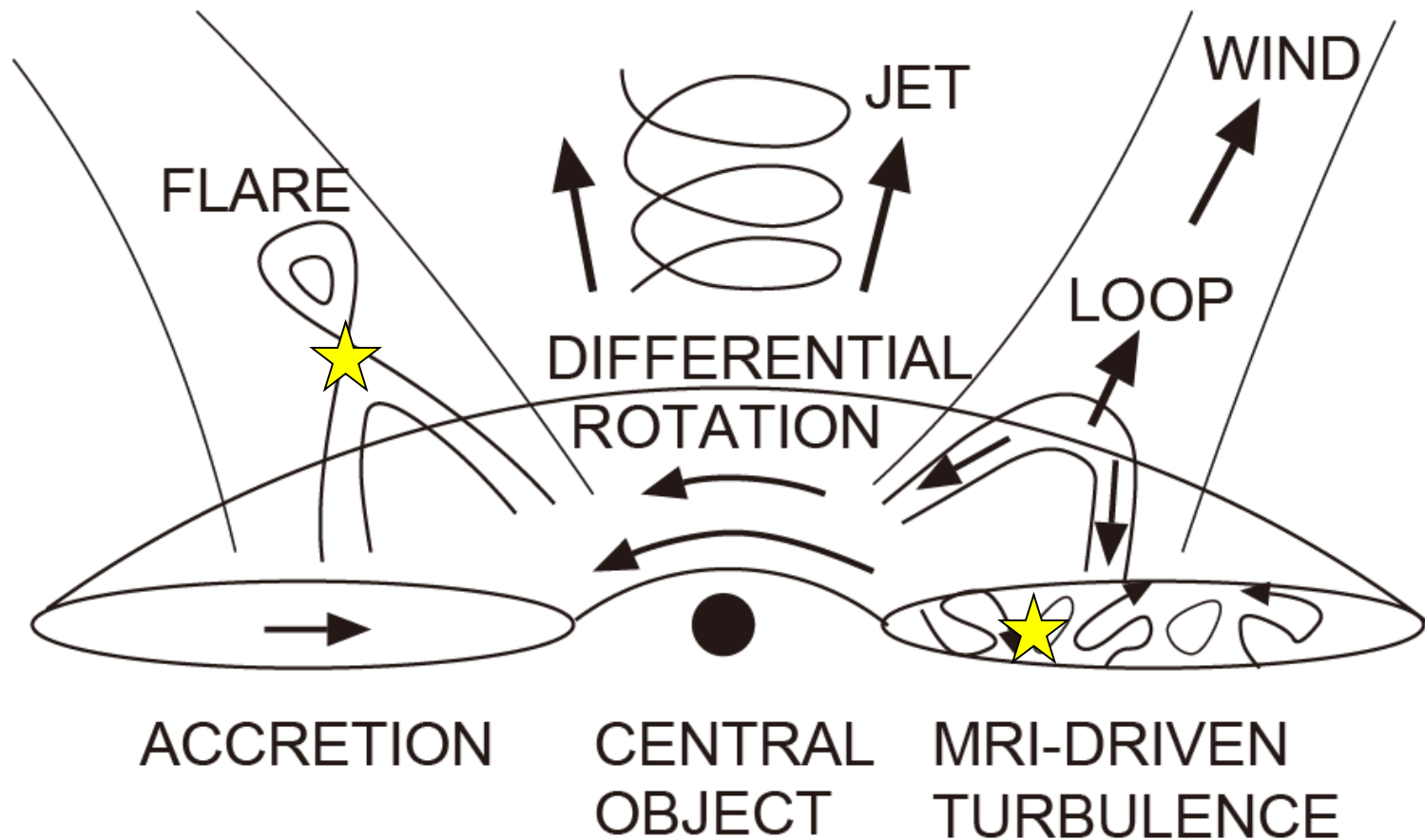
回転物質がゆっくりと落下することにより重力エネルギーを
輻射等のエネルギーに変換

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 $T_{r\phi} = -\alpha P$ と仮定

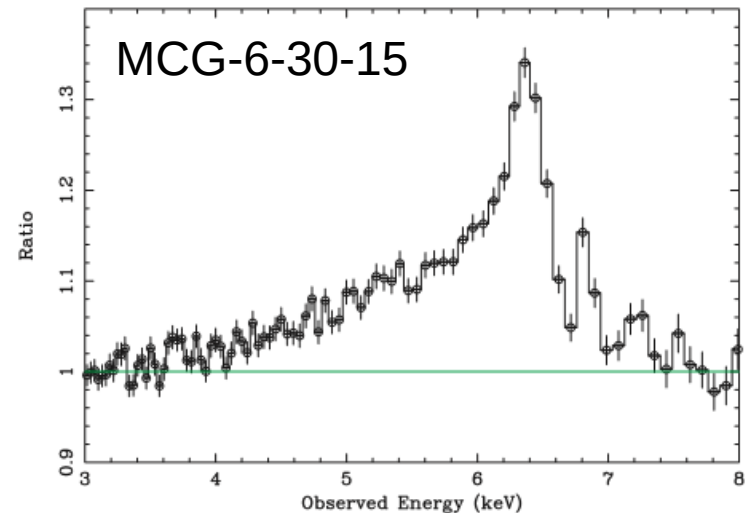
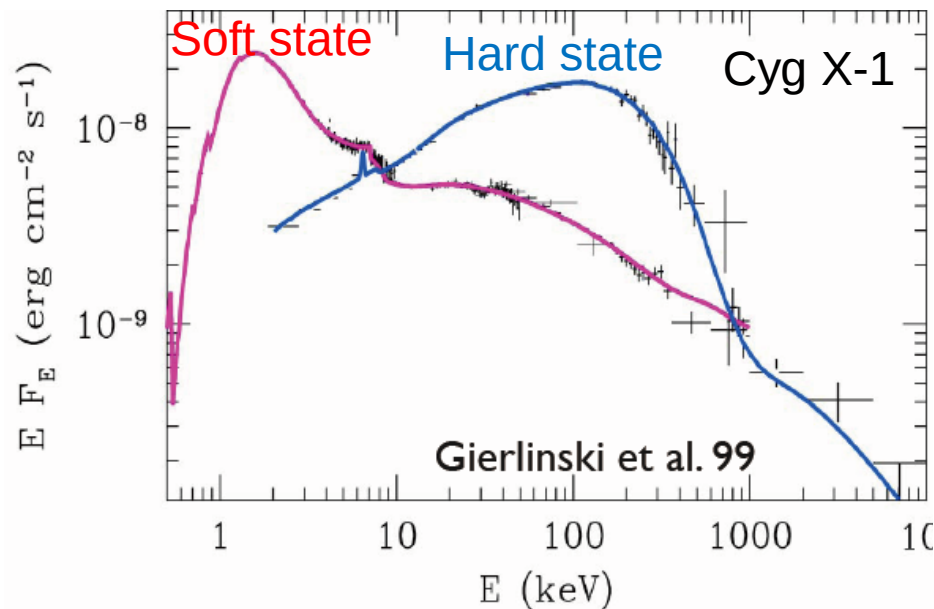
- ・観測とモデルの比較から $\alpha = 0.01 \sim 0.1$ 。磁気回転不安定性によって駆動される磁気乱流が起源と考えられている

降着円盤の磁氣的活動性



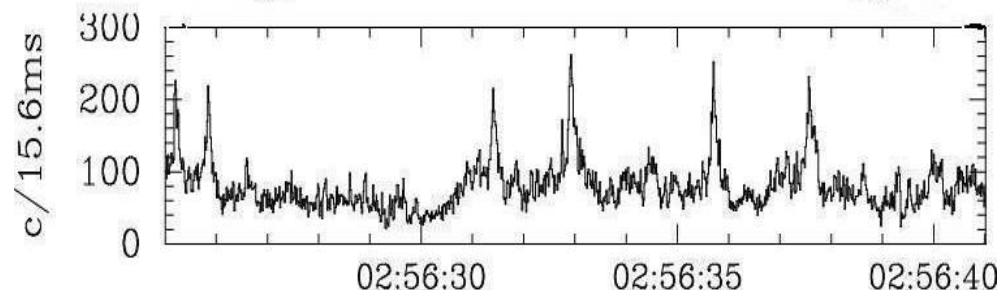
ブラックホール候補天体のX線観測

- X線スペクトル



Miniutti et al. 2007
Suzaku衛星によるスペクトル

- 時間変動



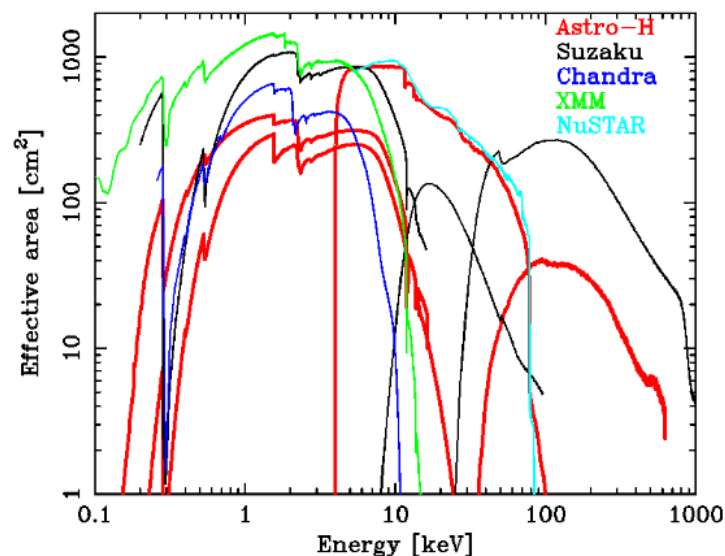
Cyg X-1
Negoro 1995

Astro-H (Hitomi) Satellite

- 2016年2月17日打上
- 軟X線イメージング
- 硬X線イメージング
- 広域X線スペクトル
0.3keV-600keV
- 高分解能X線分光観測
エネルギー分解能 5eV
- ラインX線放射物質の
速度計測に威力



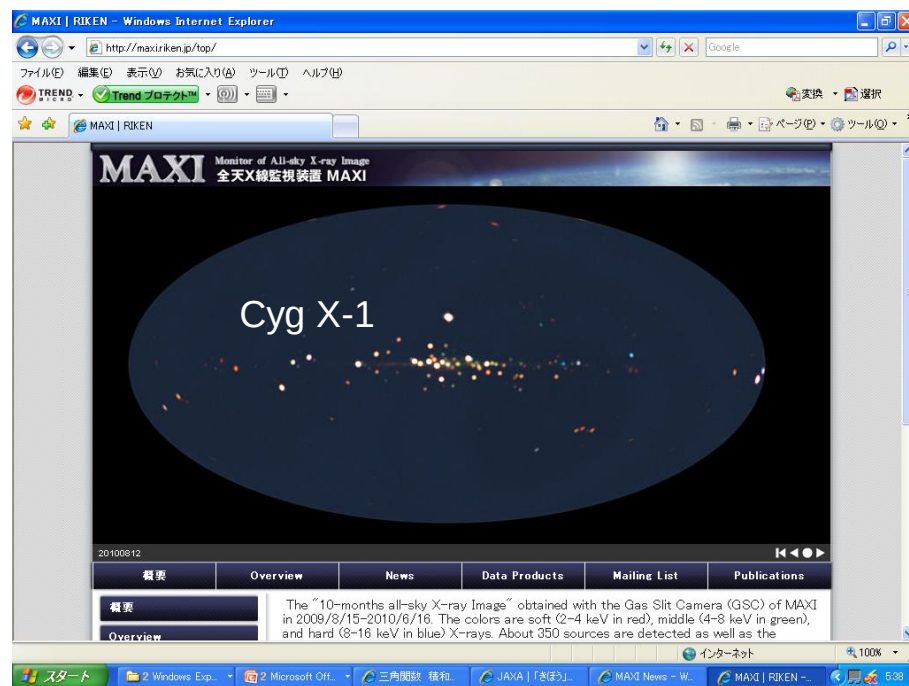
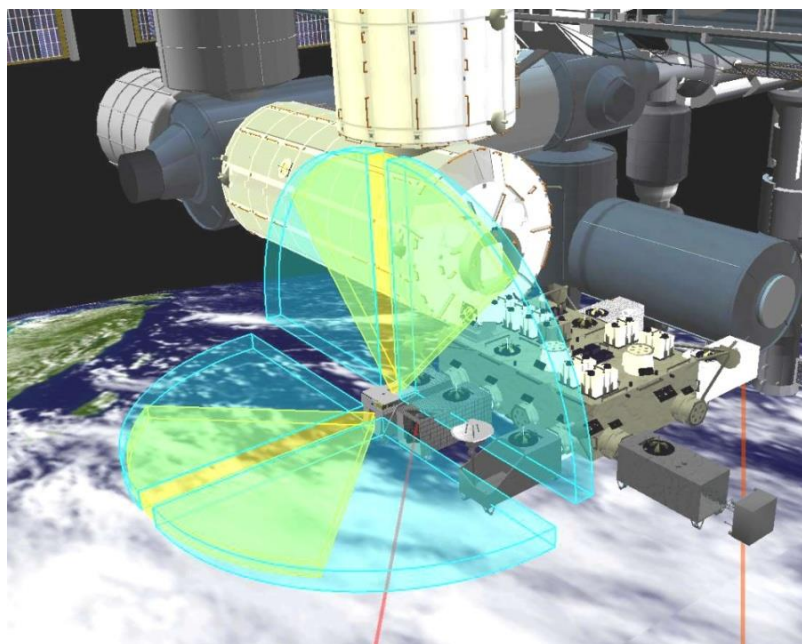
JAXA





ブラックホール降着円盤の 状態遷移

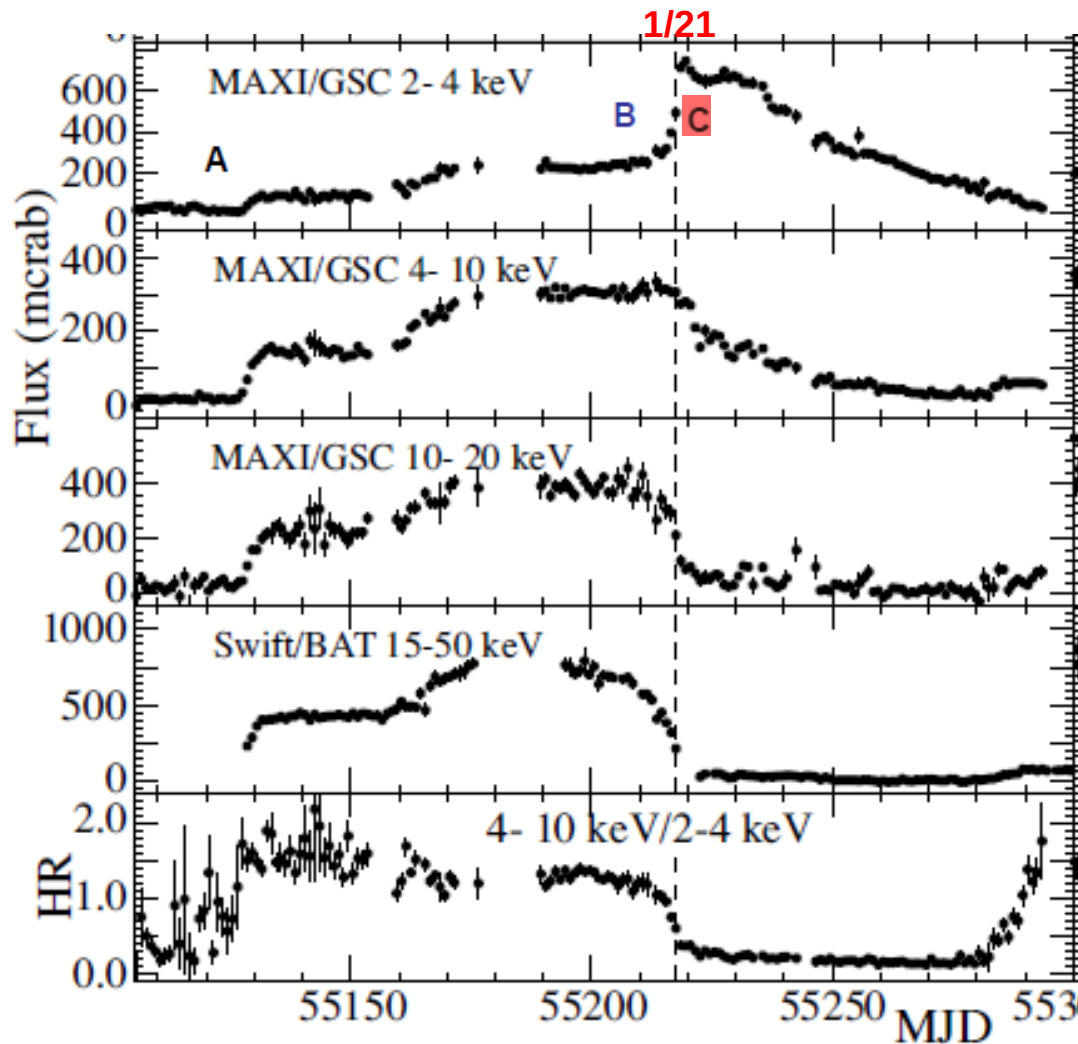
全天X線モニタMAXI (2009-)



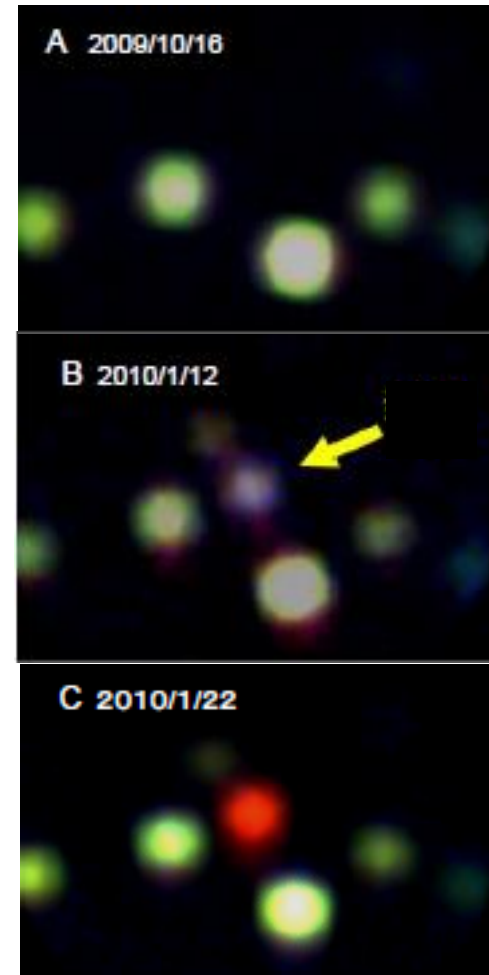
国際宇宙ステーションの日本の
実験モジュール「きぼう」に取付

<http://maxi.riken.jp/>

MAXIで観測したブラックホール新星 XTE J1752-223



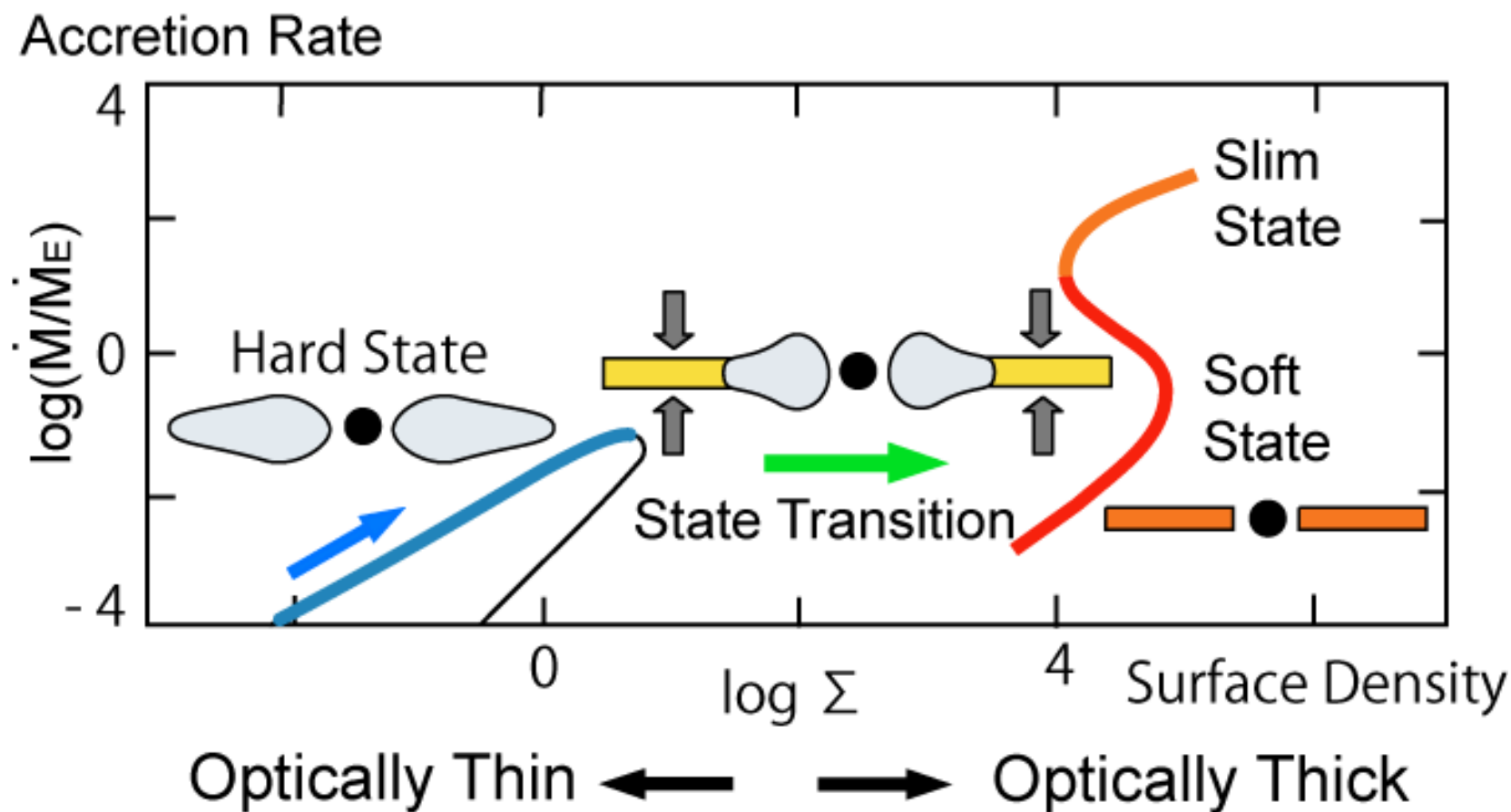
Nakahira et al. 2010



MAXI Science News #17

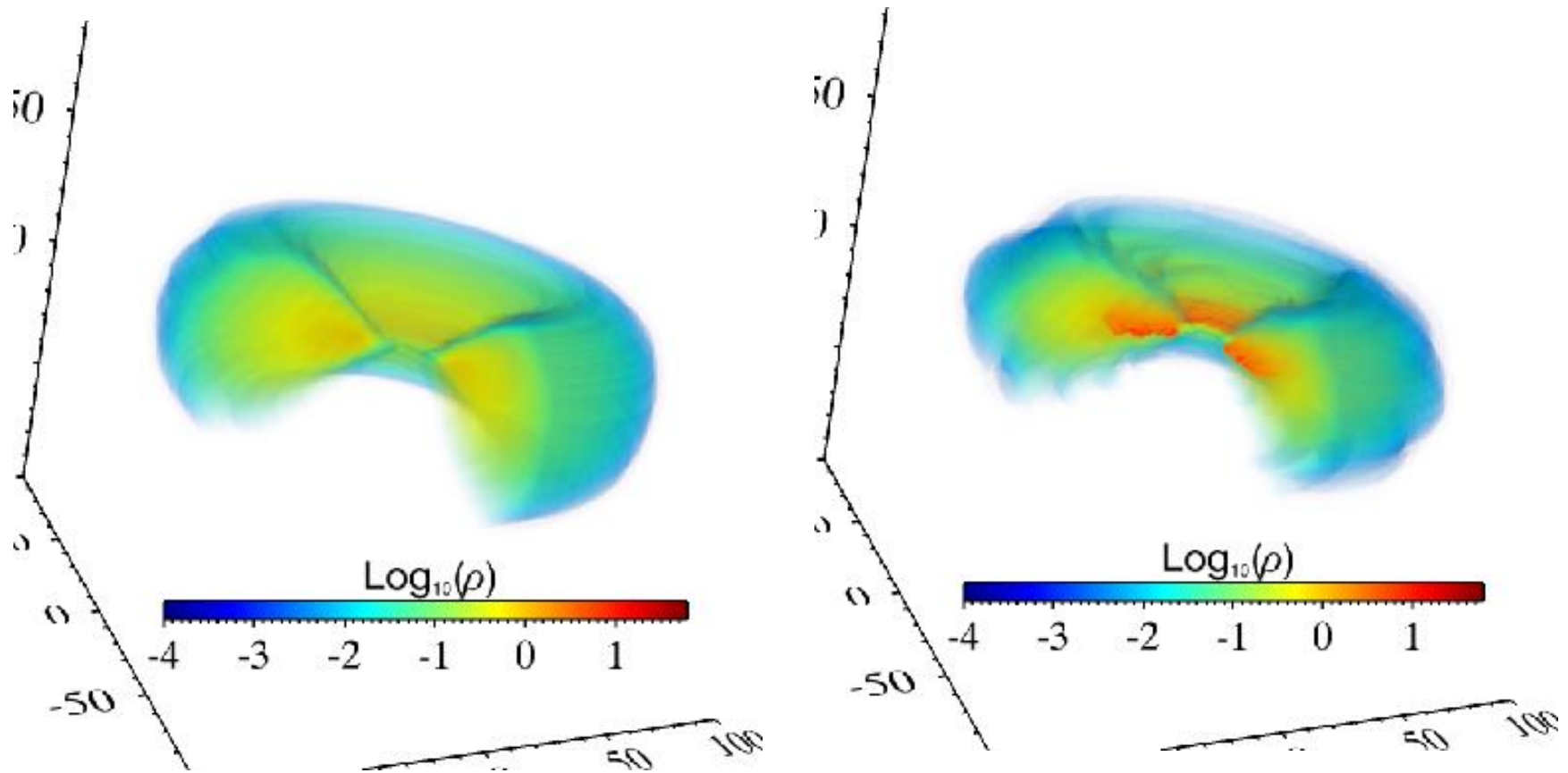
MAXIで観測されたブラックホール新星XTE J1752-223の進化

状態遷移の理論モデル

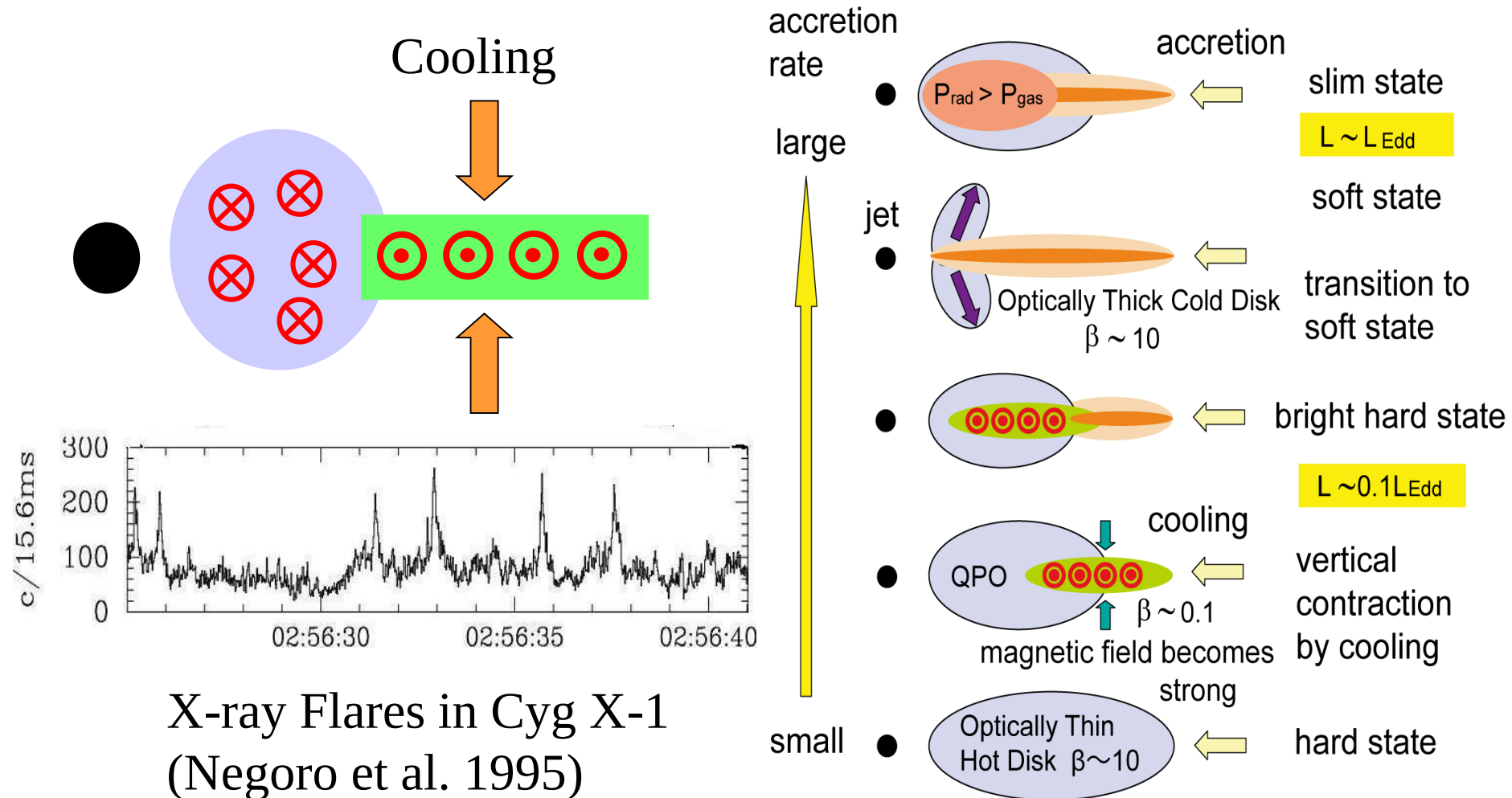


Abramowicz et al. 1995

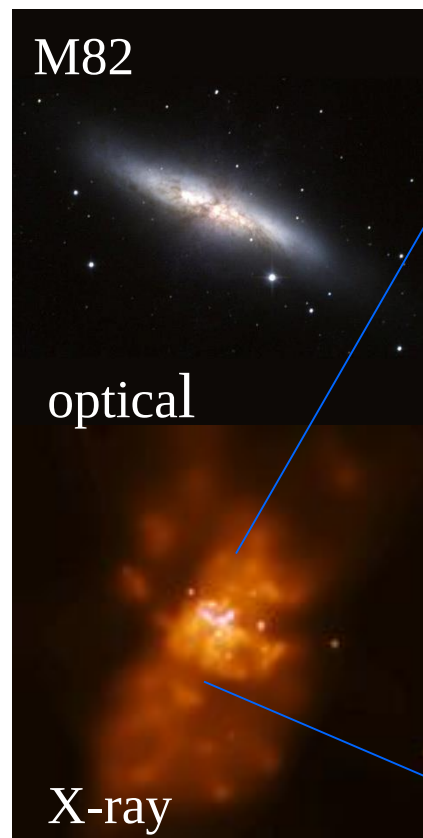
Global MHD Simulations of the Hard-to-Soft Transition



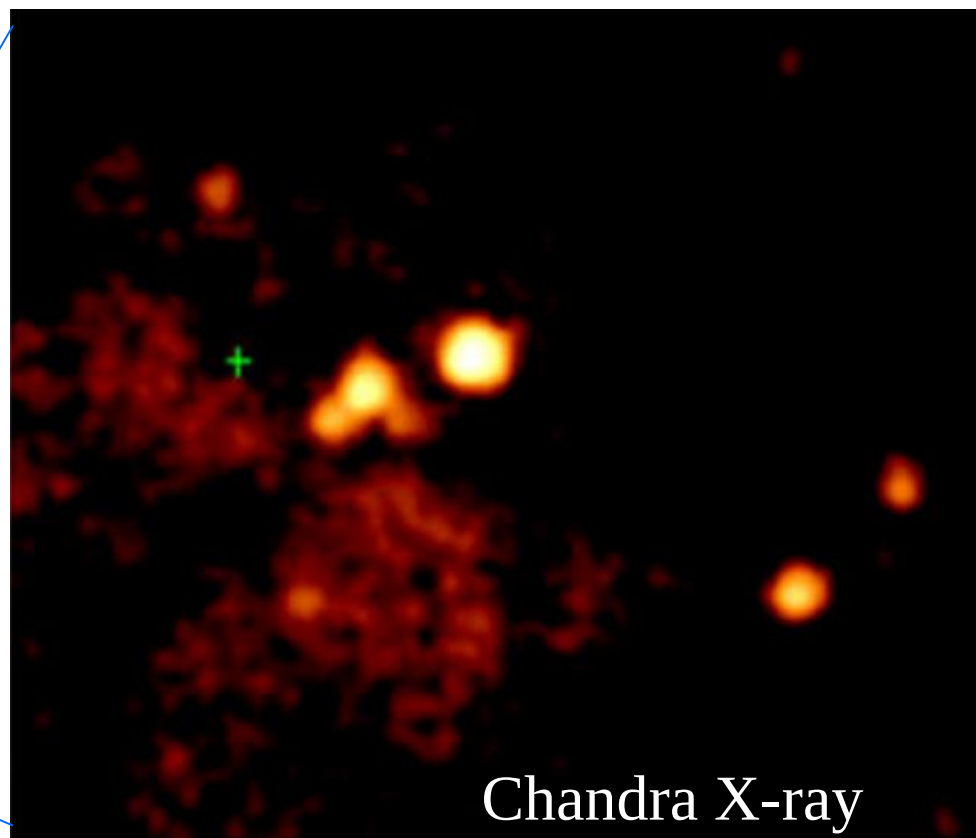
状態遷移過程における明るい ハードステート円盤の形成



近傍銀河中で発見された 超光度X線源 (ULX)



NASA/CXC/SAO/PSU/
CMU



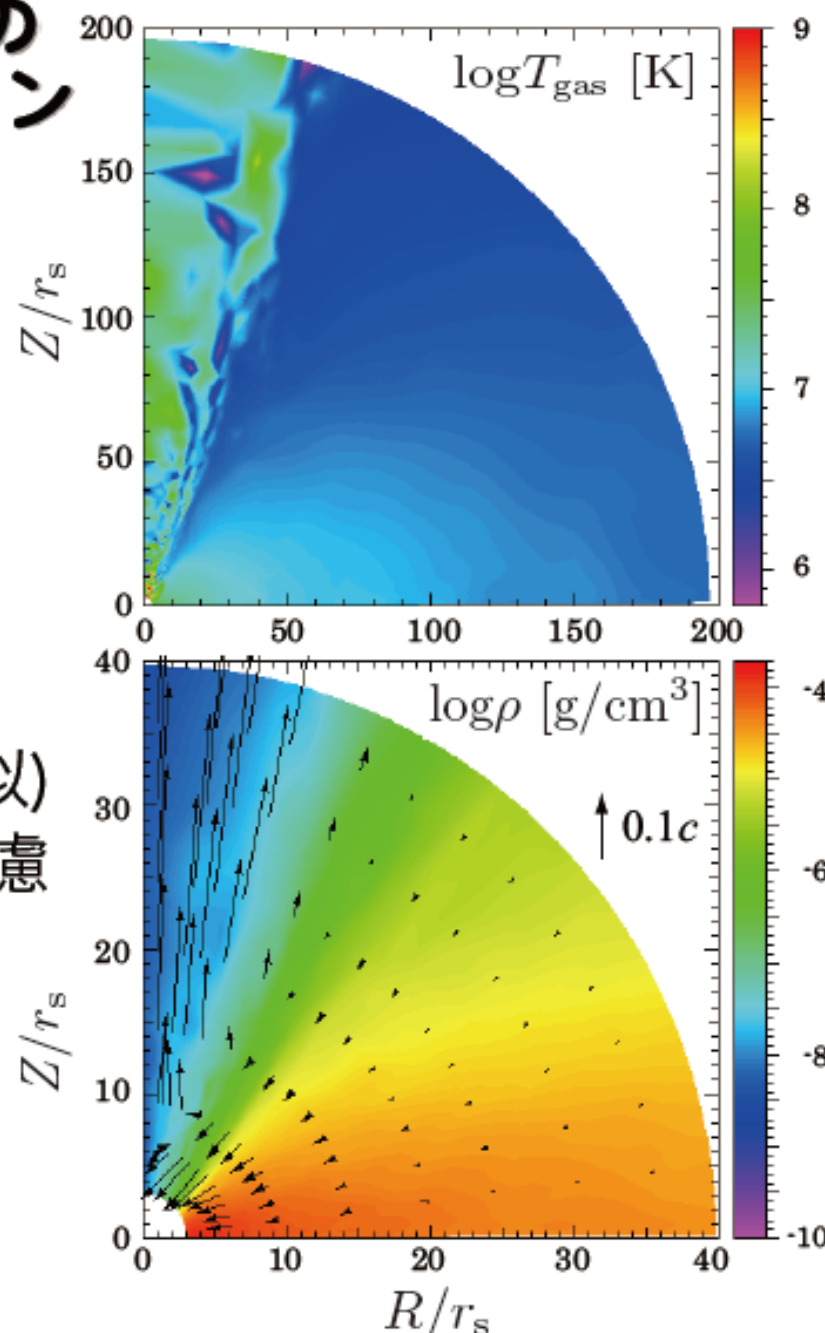
恒星質量ブラックホールのエディントン
光度を超えるX線源が存在

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, θ)
- 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:

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

粘性加熱 コンプトン散乱

• 輻射エネルギー式:

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

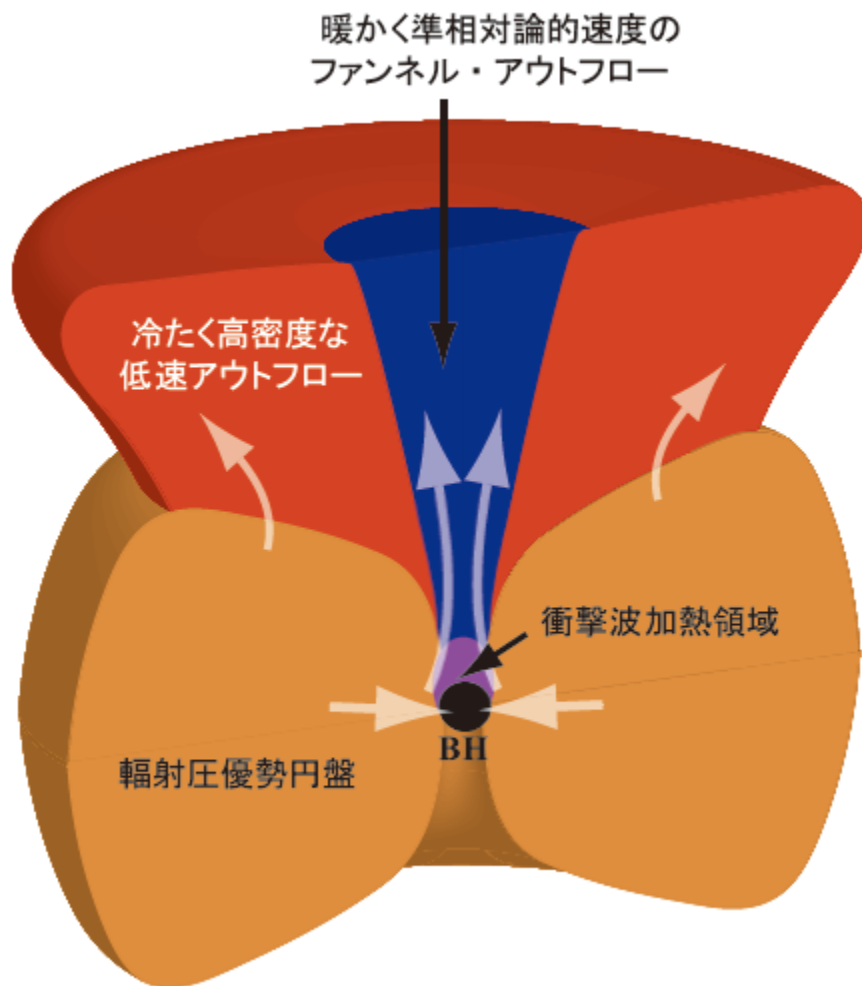
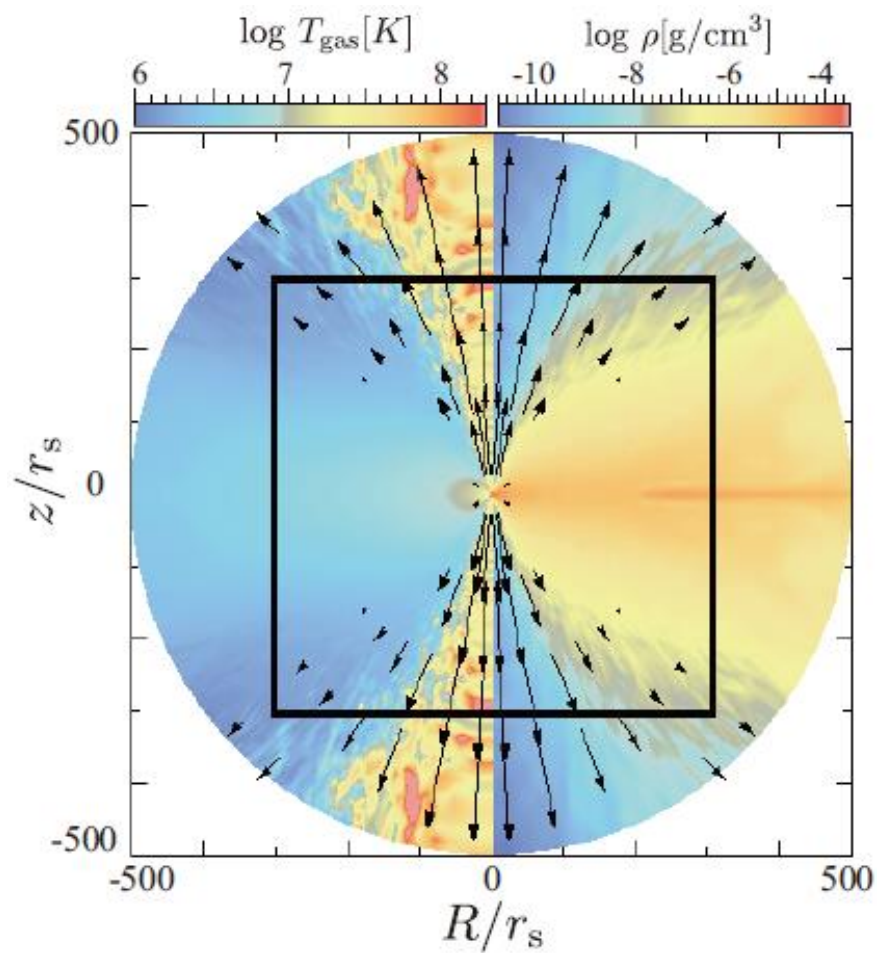
• 輻射フラックス:

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

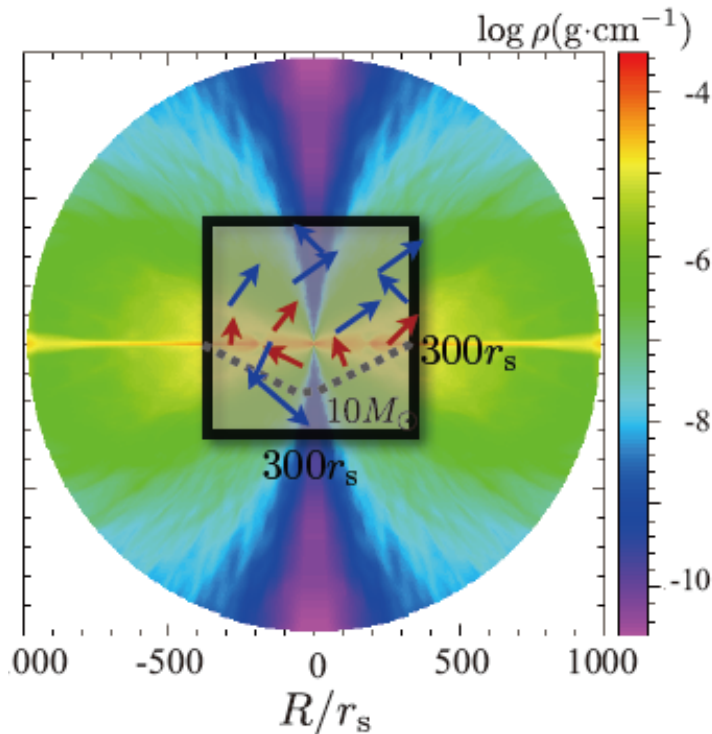
• クロージャ関係:

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

超臨界降着・噴出流の大局構造



輻射スペクトルのモンテカルロ計算



軸対称2次元輻射流体
シミュレーション

3D
map

ρ, T_{gas}, v

モンテカルロ法に基づく
3次元輻射輸送計算を実施

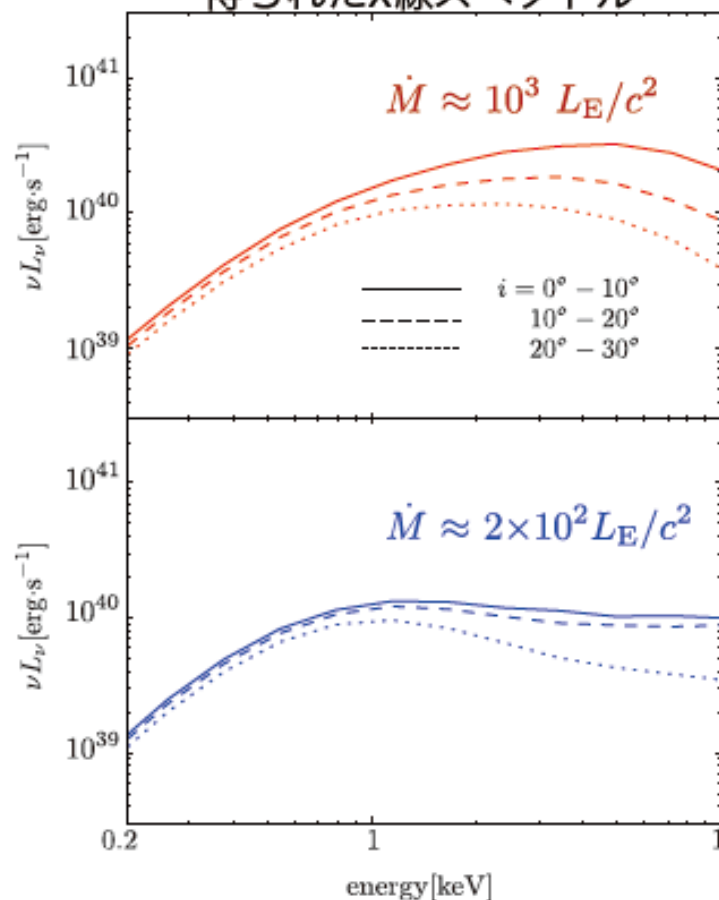
- メッシュ: $(N_x, N_y, N_z) = (160, 160, 160)$
- 計算領域: $-300r_s \leq x, y, z \leq 300r_s$
- 試行光子数: 2×10^5 (or 8×10^5) $\times 50$ 振動数bin
- アルゴリズム:

- (1) 有効光学的厚み $\tau_{\text{eff}} \equiv \sqrt{\tau_{\text{es}}(\tau_{\text{ab}} + \tau_{\text{es}})} = 10$ となる面を計算
- (2) ステップ(1)で求めた面およびその上空から種光子を放出
 - ❖ 熱的制動放射の放射率を計算
 - ❖ 特殊相対論的效果(流体運動によるドップラー効果および光行差)を考慮
- (3) 次の効果を考慮してモンテカルロ法に基づき光子を追跡
 - ❖ 自由-自由吸収
 - ❖ 光子捕捉効果
 - ❖ 熱的/バルク コンプトン効果

➡ 輻射スペクトルをアウトプット

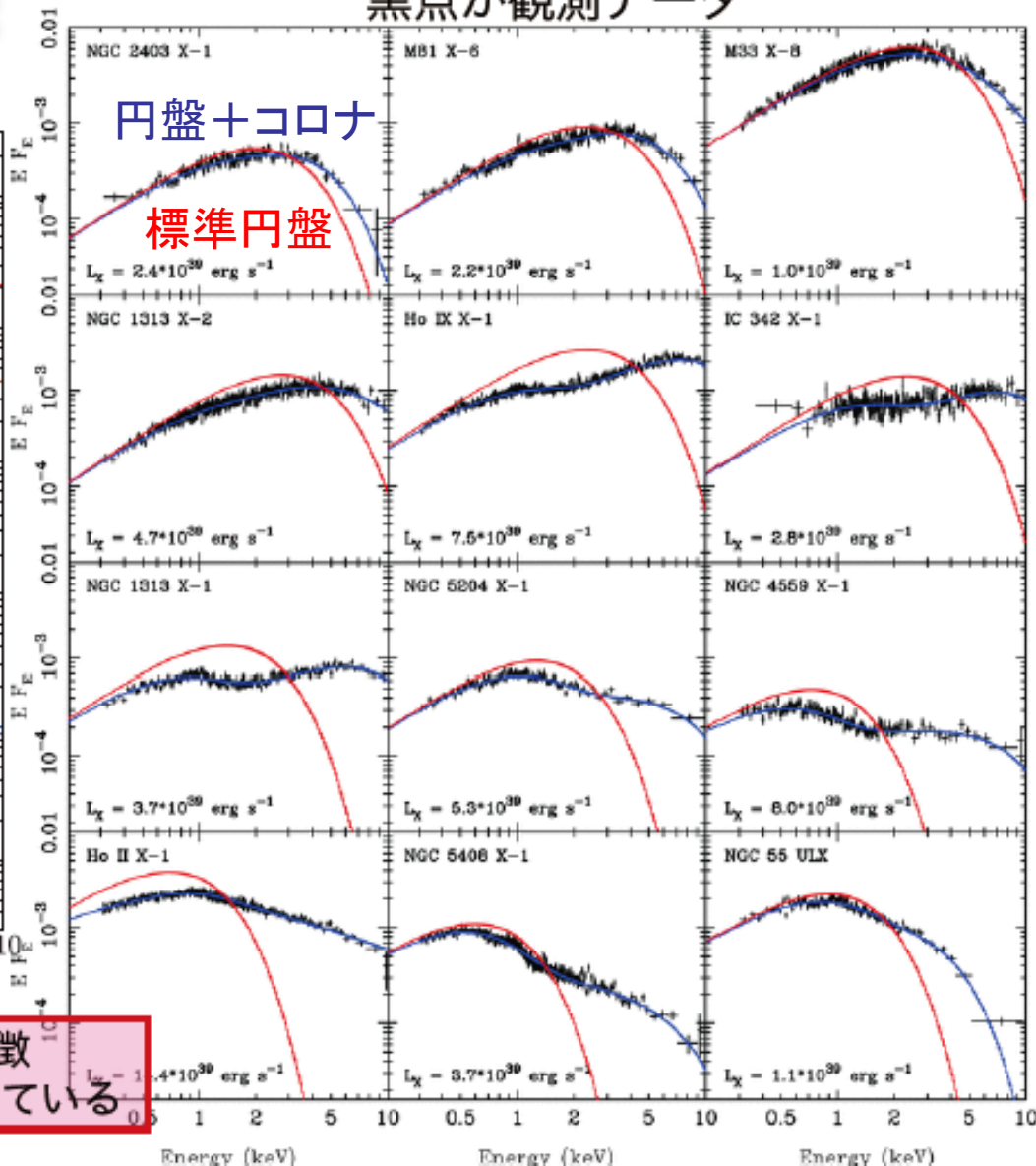
超大光度X線源の X線スペクトルとの比較

(a) 今回の計算の結果
得られたX線スペクトル

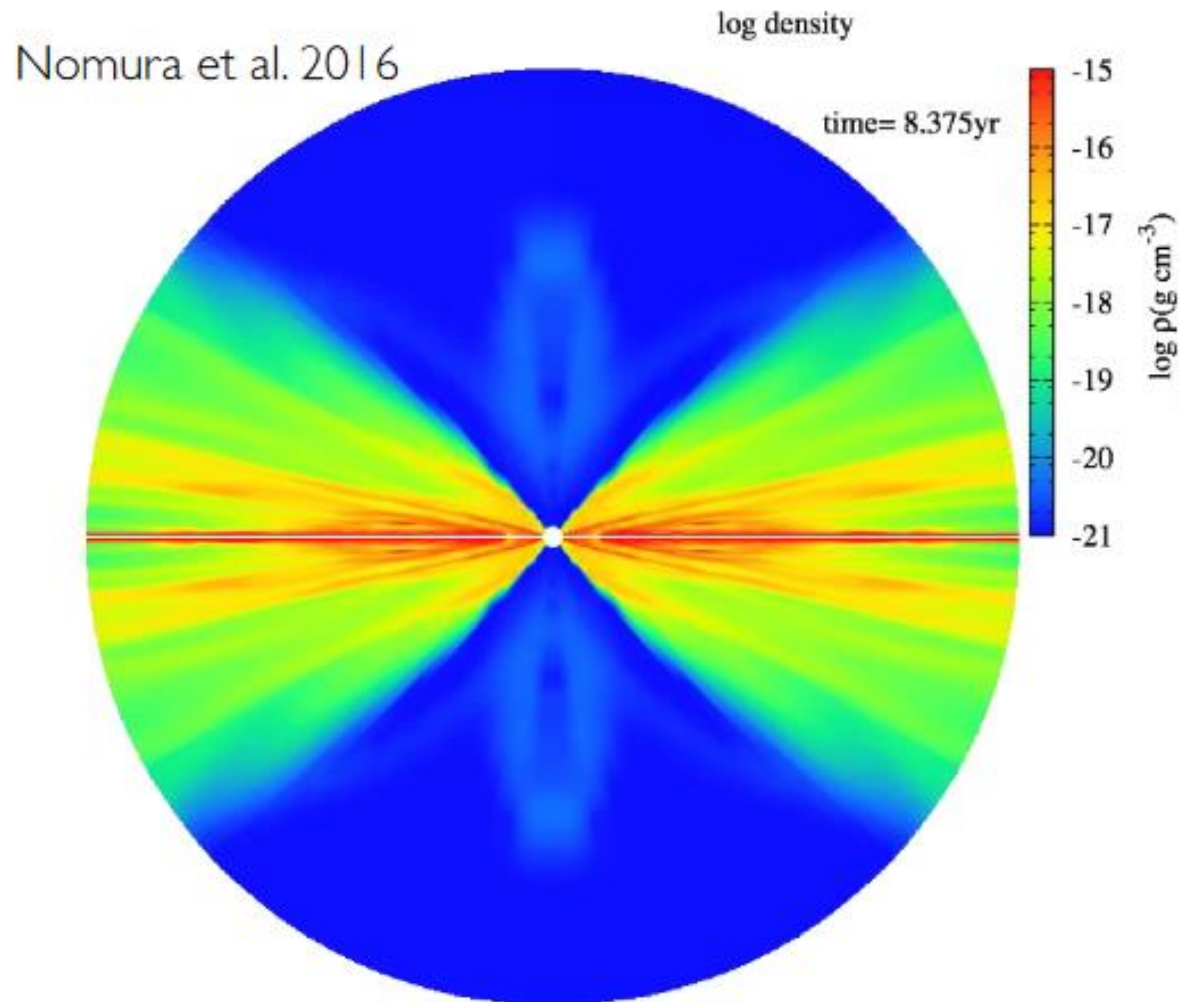


超大光度X線源の輻射スペクトルの特徴
(冪や5keV付近でのrollover)を再現している

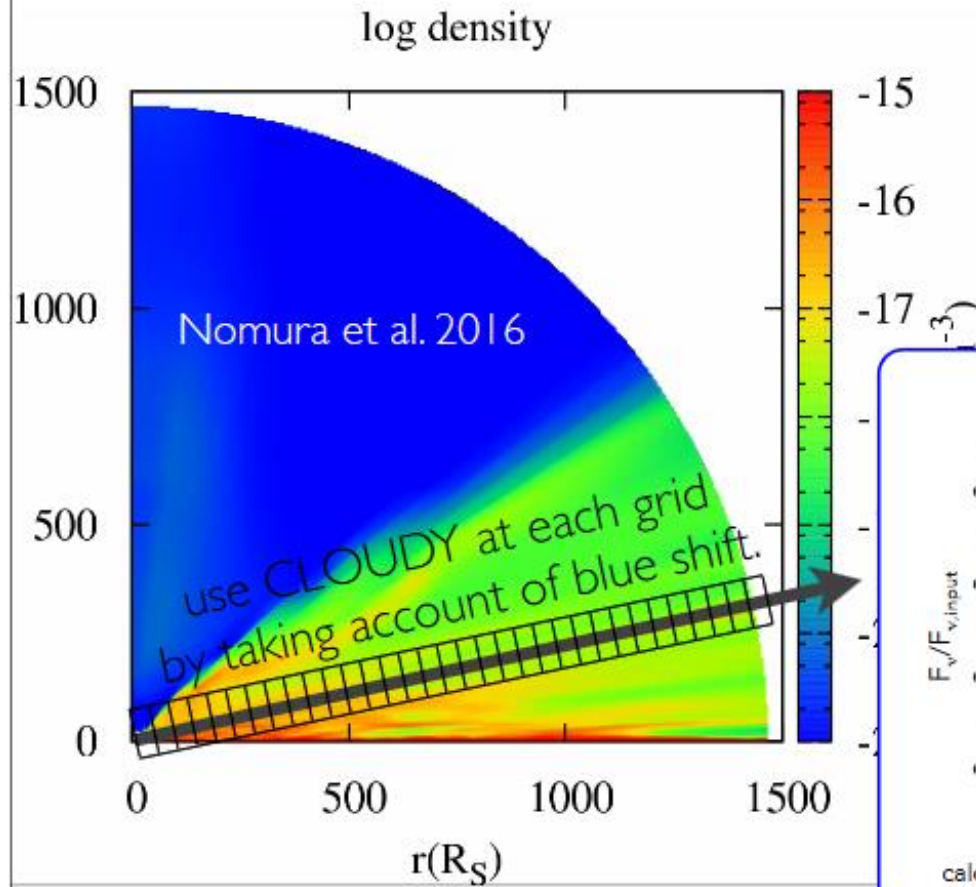
(b) 超大光度X線源の輻射スペクトル(Gladstone+ 2009)
黒点が観測データ



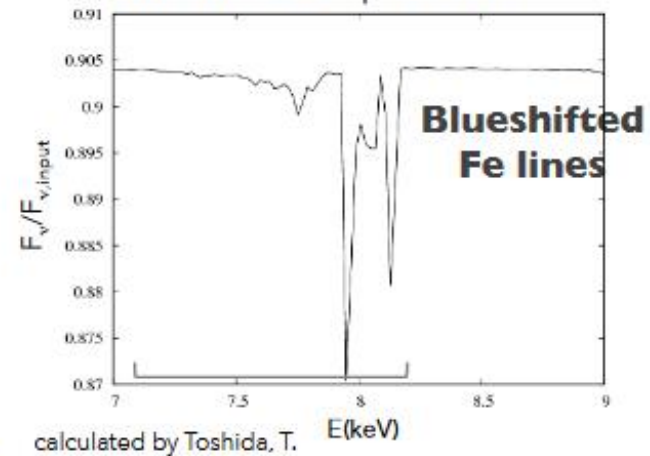
LINE DRIVEN WIND



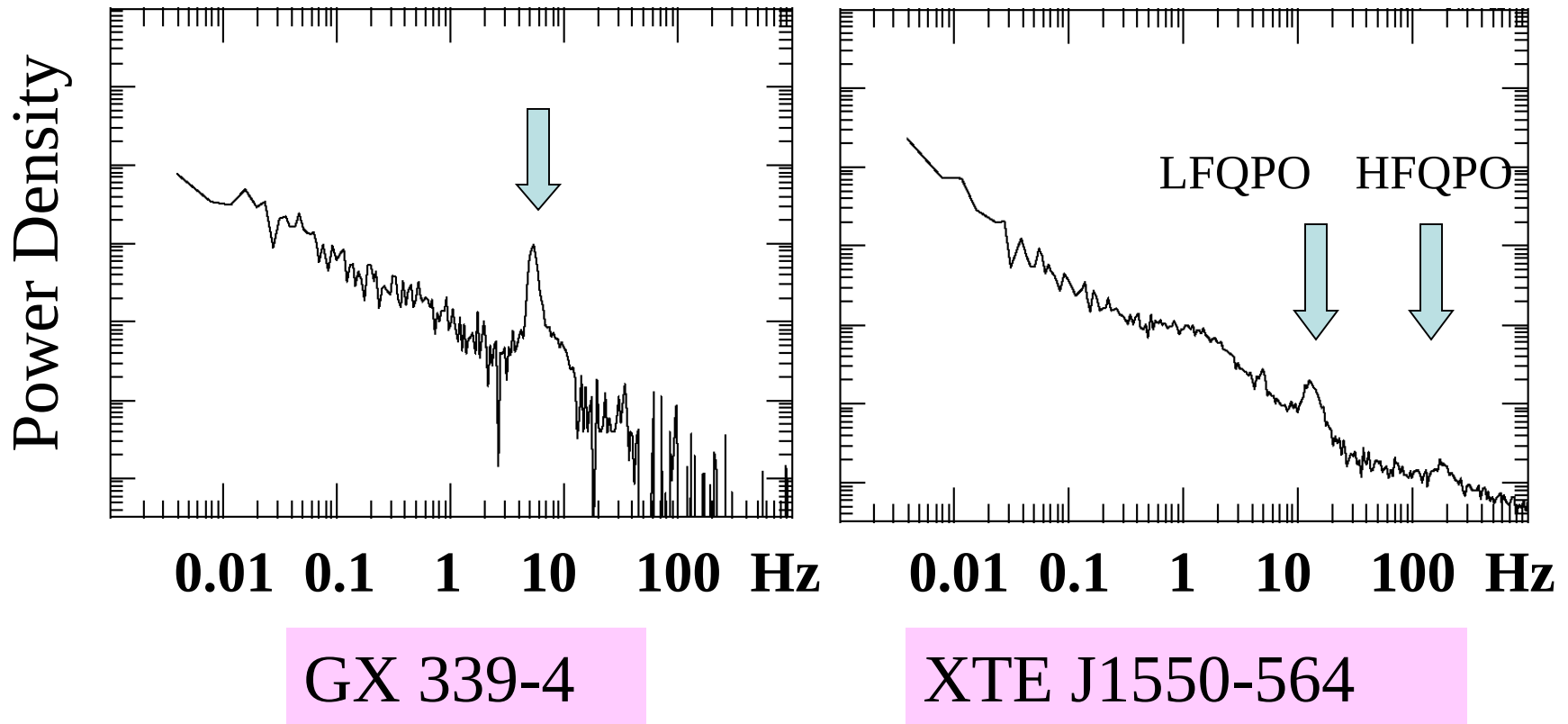
LINE DRIVEN WIND



simulated spectra

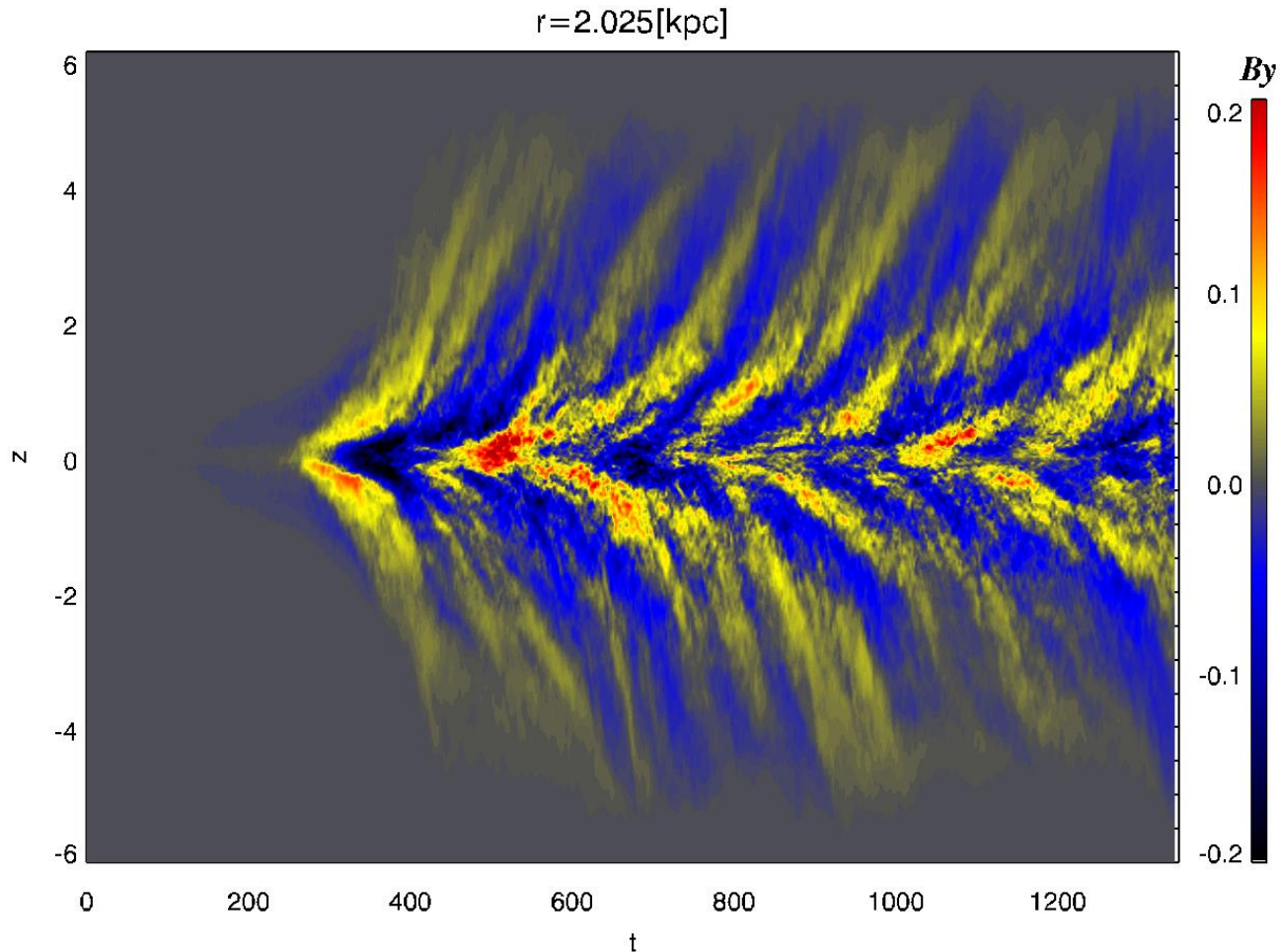


ブラックホール候補天体で観測される 準周期振動 (QPOs)

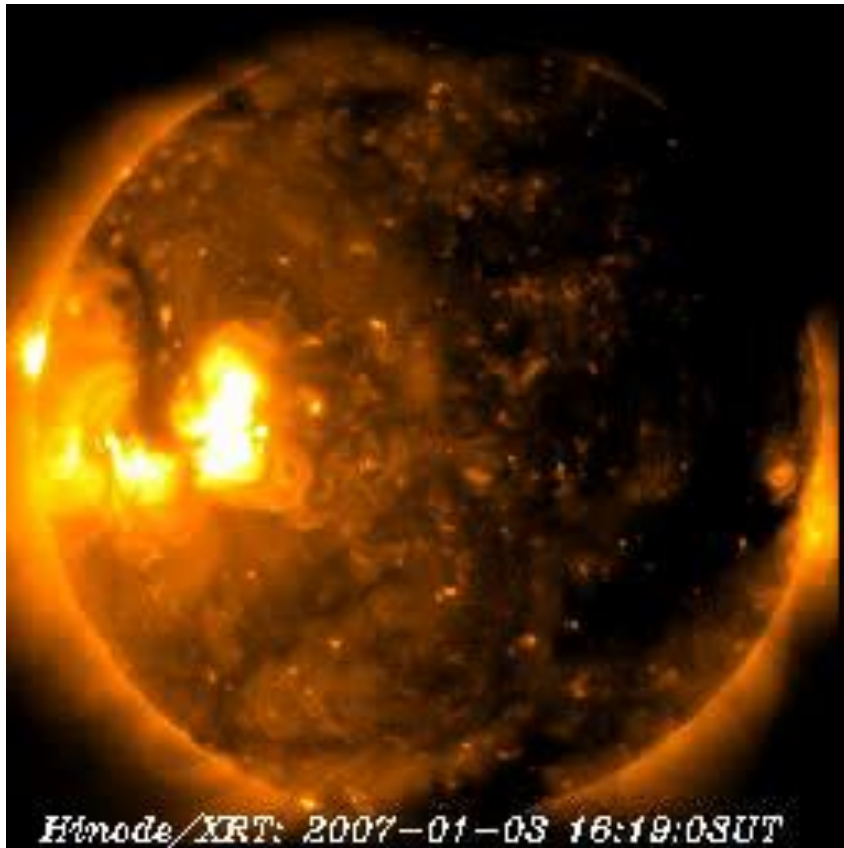


McClintock and Remillard 2004

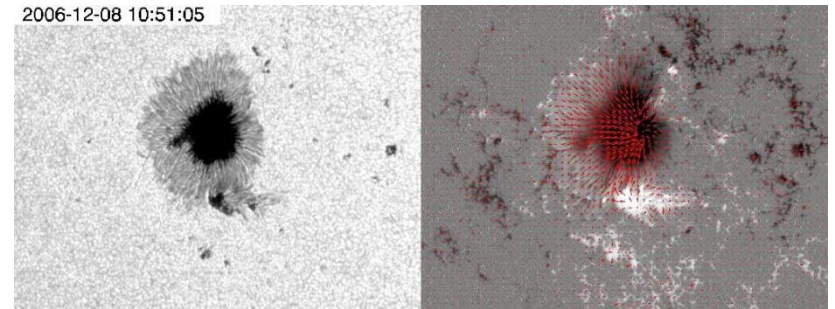
円盤ダイナモの3次元磁気流体 シミュレーション結果の例



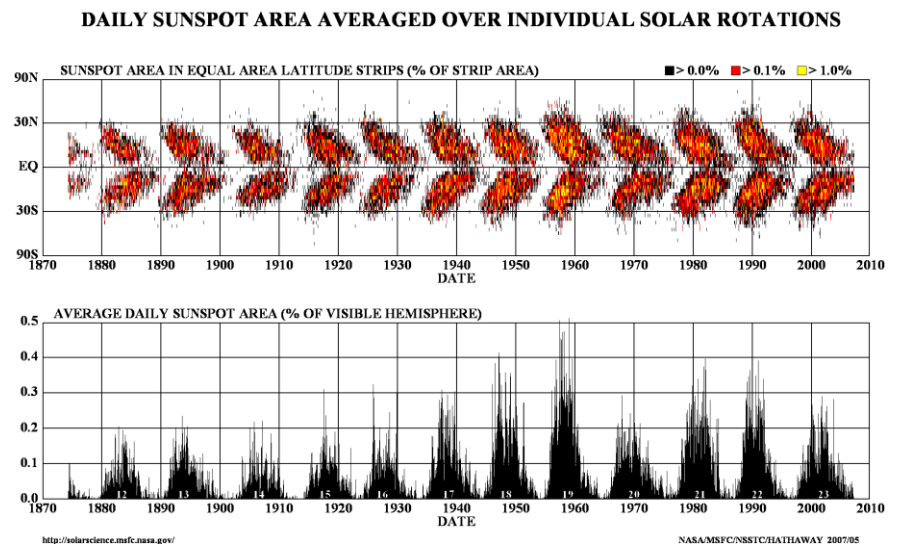
太陽活動のバタフライダイアグラム



X-ray Image by HINODE Satellite



Optical image of sunspots by HINODE



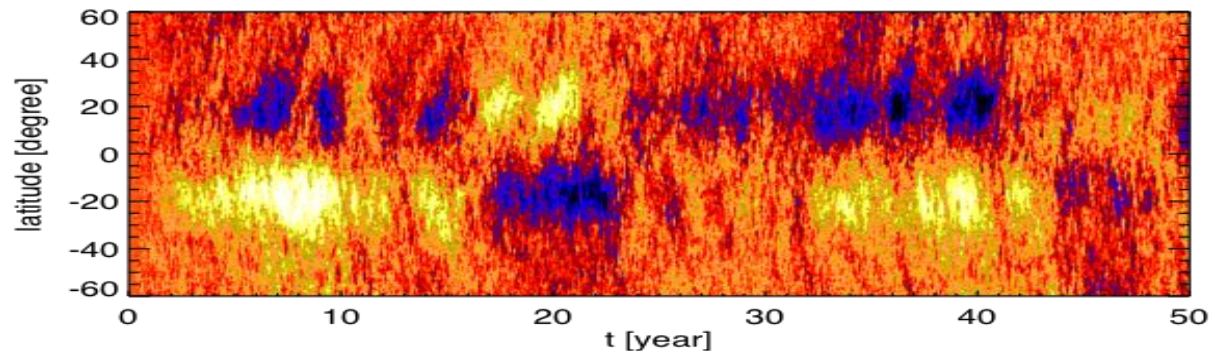
Butterfly Diagram of Sunspots
(NASA)

太陽ダイナモの高解像度 3次元磁気流体シミュレーション

Hotta et al.

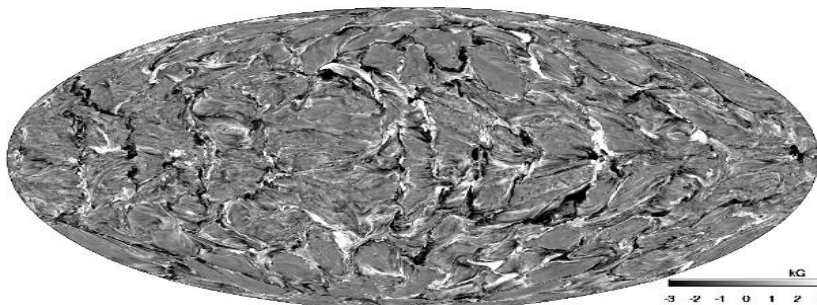
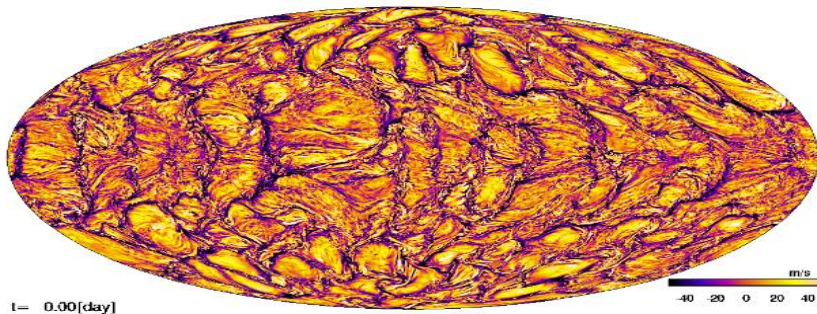
Science

Mar. 25, 2016



レイノルズ数が高いと強い磁場
が乱流を抑制して大スケール
磁場の形成を可能にする

計算によって得られた乱
流(上)と磁場(下)の様子。
非常に小さいスケールの
磁場が発達していること
がわかる。



まとめ

- X線観測が降着円盤理論の構築を促してきた。
- 磁気回転不安定性の再発見を契機として降着円盤の3次元磁気流体シミュレーションが多くของกลุ่มによって実施された。
- 輻射磁気流体計算、シミュレーション結果に基づく輻射スペクトル計算により、観測と密接に連携した研究が可能になりつつある。
- 太陽磁気乱流計算の成果を降着円盤シミュレーションにも取り入れていきたい。

END