

# ブラックホール磁気流体円盤コロナ からのX線放射とX線連星への応用

東大RESCEU → KEK (2008/10~)

川中 宣太

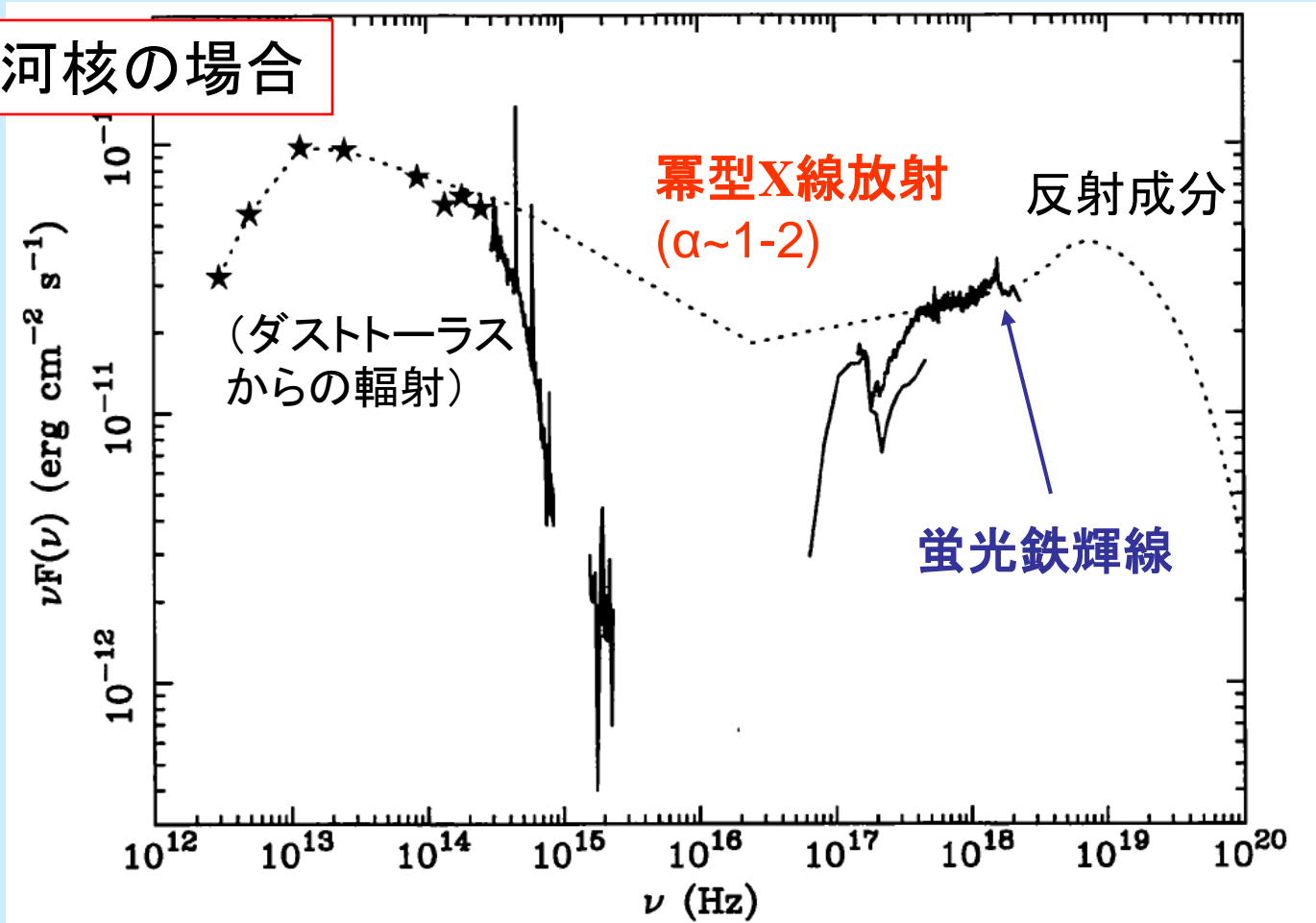
共同研究者: 加藤成晃(宇宙研)、嶺重慎(京都大)

RESCEU夏の学校2008@青森・浅虫温泉 2008/8/30

# ブラックホール候補天体のスペクトル

降着円盤からの熱輻射 + 幂型X線放射 + 蛍光鉄輝線  
(6-7 keV) + 反射成分

活動銀河核の場合

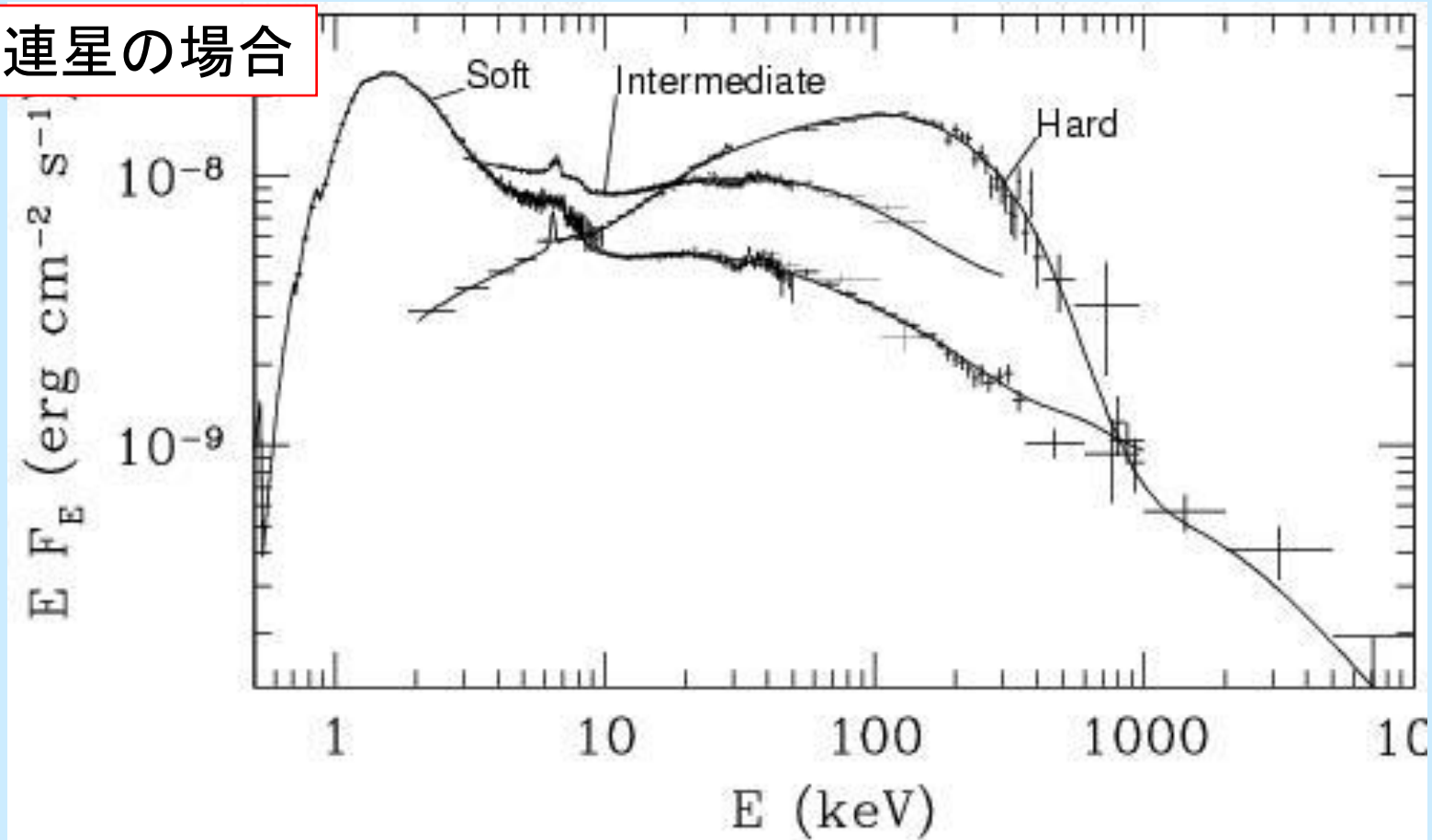


Seyfert銀河MCG-6-30-15のスペクトル (Reynolds et al. 1997)

# ブラックホール候補天体のスペクトル

降着円盤からの熱輻射 + 冪型X線放射 + 蛍光鉄輝線  
(6-7 keV) + 反射成分

X線連星の場合



ブラックホール連星Cyg X-1のスペクトル (Makishima et al. 2008)

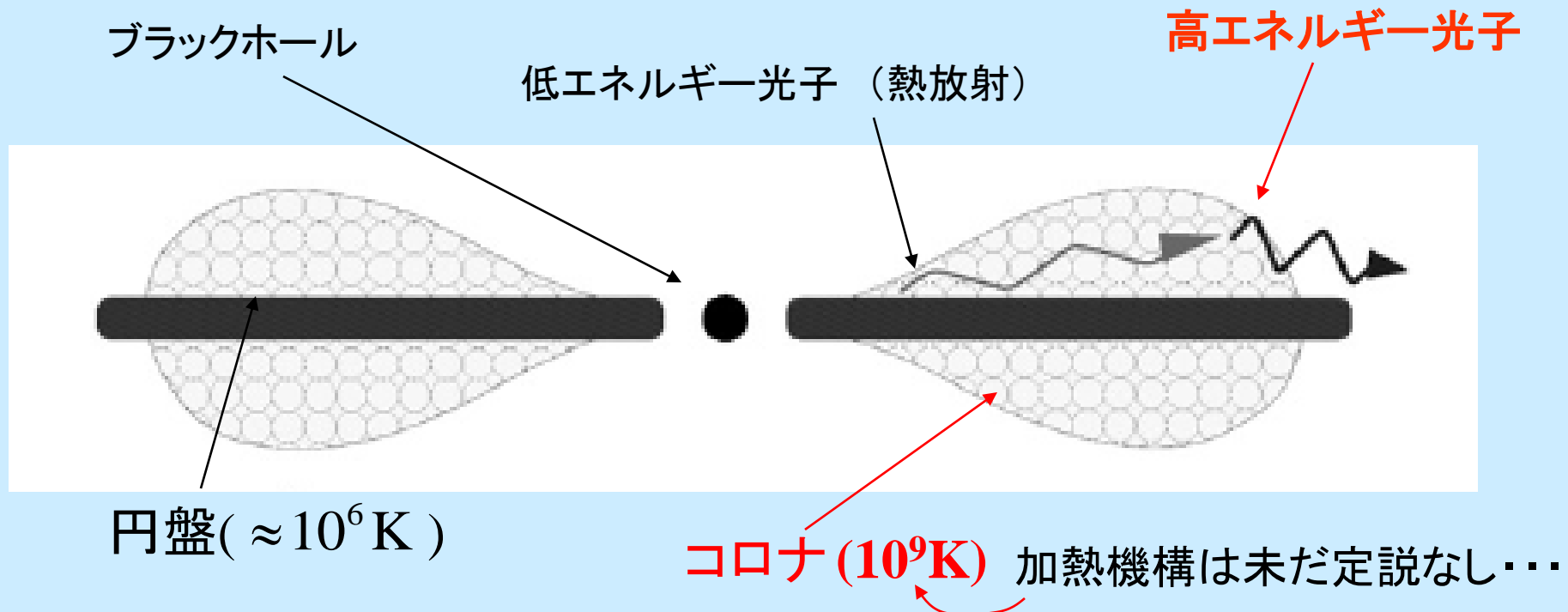
# ブラックホールからのX線放射モデル

Haardt & Maraschi 1991, 1993

AGNやX線連星における熱的成分、冪型X線, 蛍光鉄輝線の観測

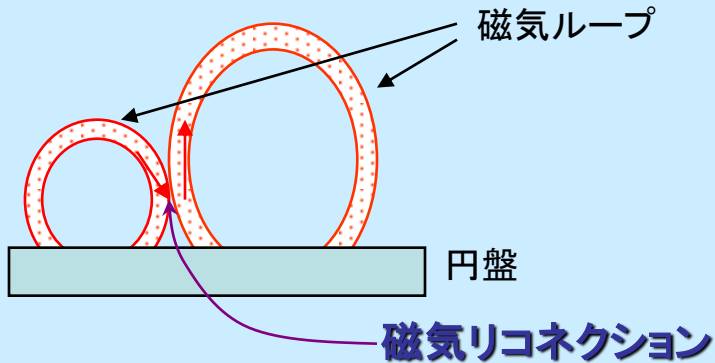
...高温ガス ( $\sim 10^9$  K)が低温ガス ( $\sim 10^6$  K)とともに存在することを示唆

円盤を取り囲む高温ガス (=コロナ) において、円盤からの低エネルギー光子が逆コンプトン散乱され、高エネルギー光子となる



# コロナモデルの一例

磁気リコネクション加熱コロナモデル  
(Liu et al 2002, 2003)



円盤内でのガスエネルギーと  
磁気エネルギーの等分配

+

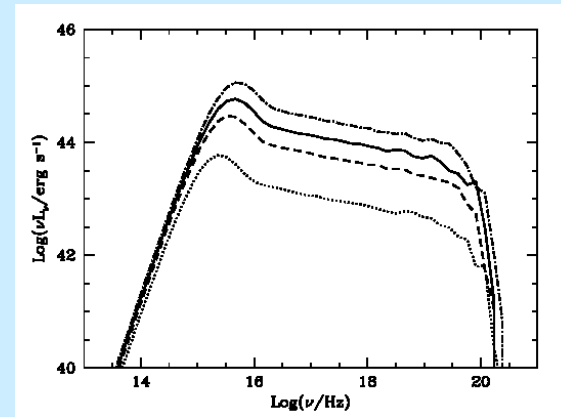
リコネクション加熱とコンプトン  
散乱冷却の平衡

+

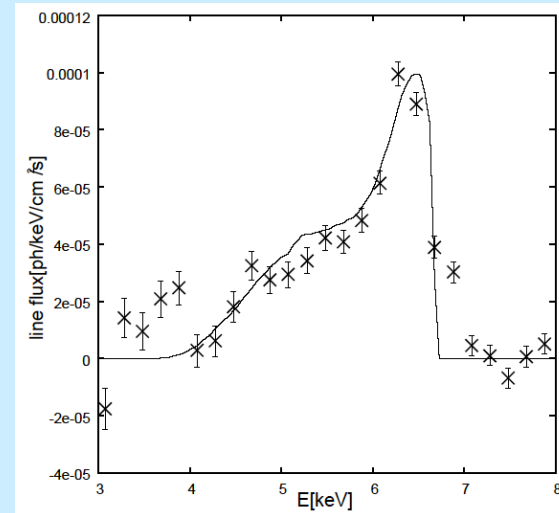
ループ根元での熱伝導加熱と彩層  
蒸発による冷却の平衡

➡ コロナの  $\rho(r)$ ,  $T(r)$  を導出

連続線スペクトル (Liu et al. 2003)



相対論的に広がった鉄輝線 (NK et al.  
2005)



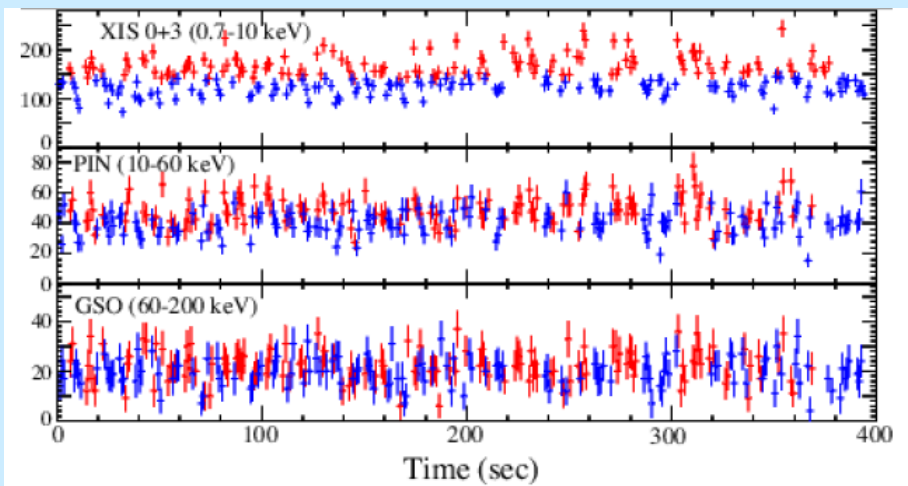
時間平均スペクトルにおいては  
観測をよく説明できている

# X線放射の時間変動について

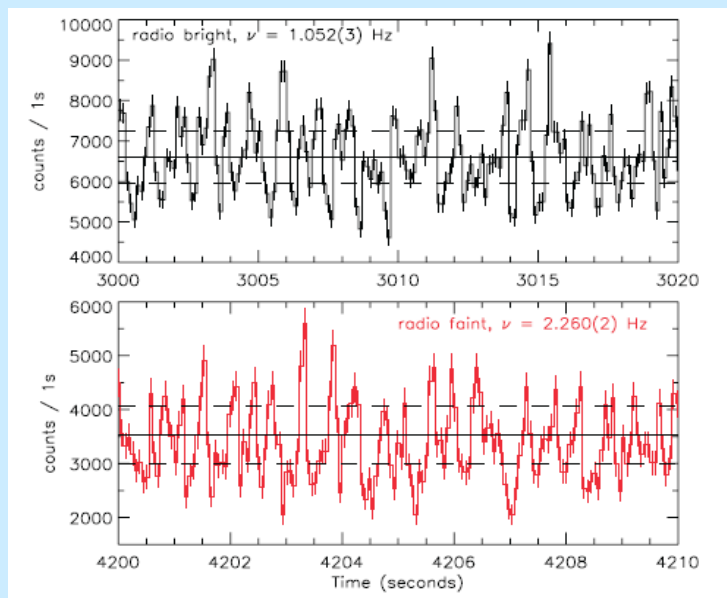
実際は、ブラックホール候補天体の光度は激しく時間変動している

→スペクトルだけでなく、時間変動まで説明できる理論モデルが求められる

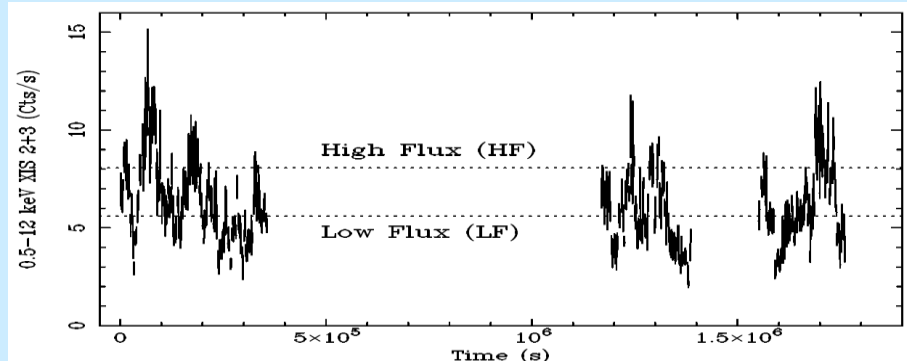
→シミュレーション結果の活用！



Cyg X-1のX線light curve (Makishima et al. 2008)



GRS 1915+105のlight curve (2-60keV) (Miller & Homan 2005)

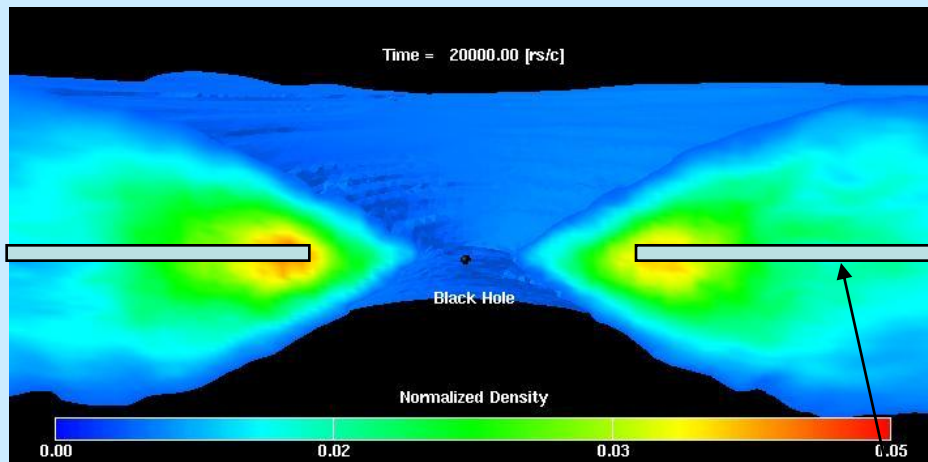


MCG-6-30-15のlight curve(0.5-12keV) (Miniutti et al. 2007)

# 計算に用いるモデル

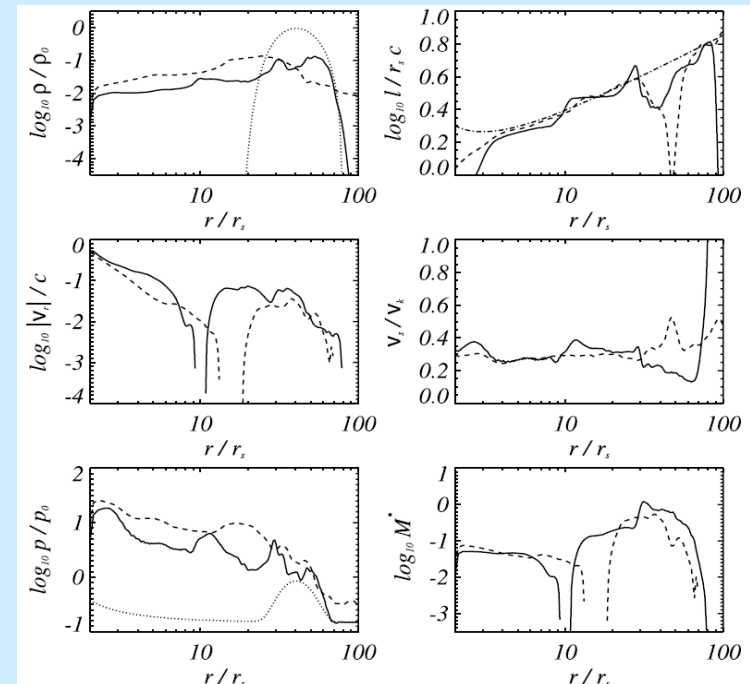
NK, Kato & Mineshige 2008

- 用いるデータ...Kato, Mineshige & Shibata(2004)による3次元resistive MHD降着流シミュレーション
- 降着流は準定常状態、ジェットの出なし (Kato 2004)
- データはコロナとして取り扱う。赤道面に仮想的に置いた幾何学的に薄い標準円盤からの熱的輻射がその中で逆コンプトン散乱されることによって生成される放射スペクトルを計算



<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/people/ykato/index.html>

円盤 ( $\sim 10^6$  K)




Kato et al. 2004

# 電子温度の決定

今回使うデータの元になったシミュレーションでは放射冷却が含まれておらず、電子はイオンと同じ温度 ( $\sim 10^{10-13}\text{K}$ )として計算されている。

しかし、実際には逆コンプトン散乱によって電子は冷却されている

 エネルギーバランスが成り立つように電子温度を決める

Coulomb collisions with ions

Compton cooling

$$\int_{-Z}^Z \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} \lambda_{ie} 2\pi r dr dz = \int L_C(\nu; r_{\text{in}} \leq r \leq r_{\text{out}}) d\nu.$$

where

$$\frac{dE_e}{dt} = - \frac{3m_e}{2m_p} N_e N_p \sigma_T c \times \frac{(kT_e - kT_p)}{K_2(1/\theta_e)K_2(1/\theta_p)} \ln \Lambda$$
$$\times \left[ \frac{2(\theta_e + \theta_p)^2 + 1}{\theta_e + \theta_p} K_1\left(\frac{\theta_e + \theta_p}{\theta_e \theta_p}\right) + 2 K_0\left(\frac{\theta_e + \theta_p}{\theta_e \theta_p}\right) \right]$$



$$T_e \sim 1-4 \times 10^9 \text{K}$$

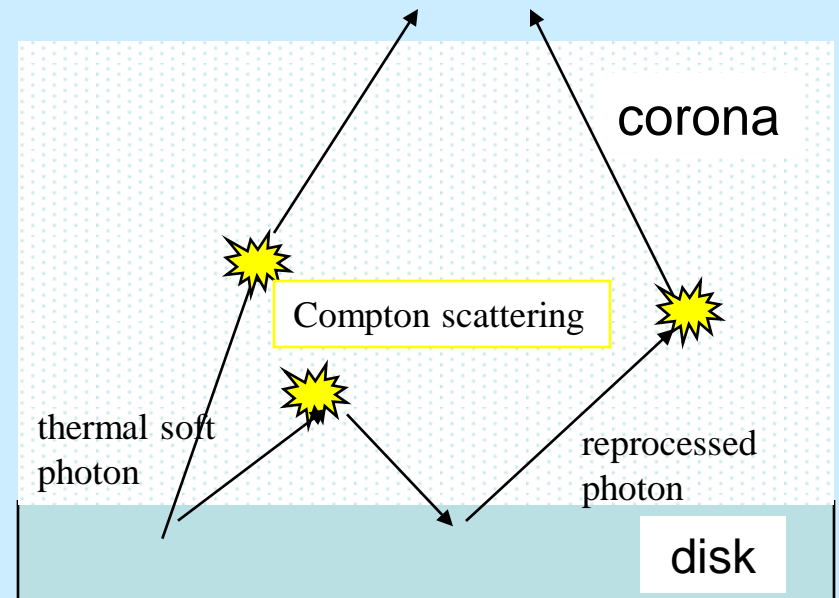
(観測の要請に合う)

$L_C(\nu)$  : luminosity of Comptonized photon

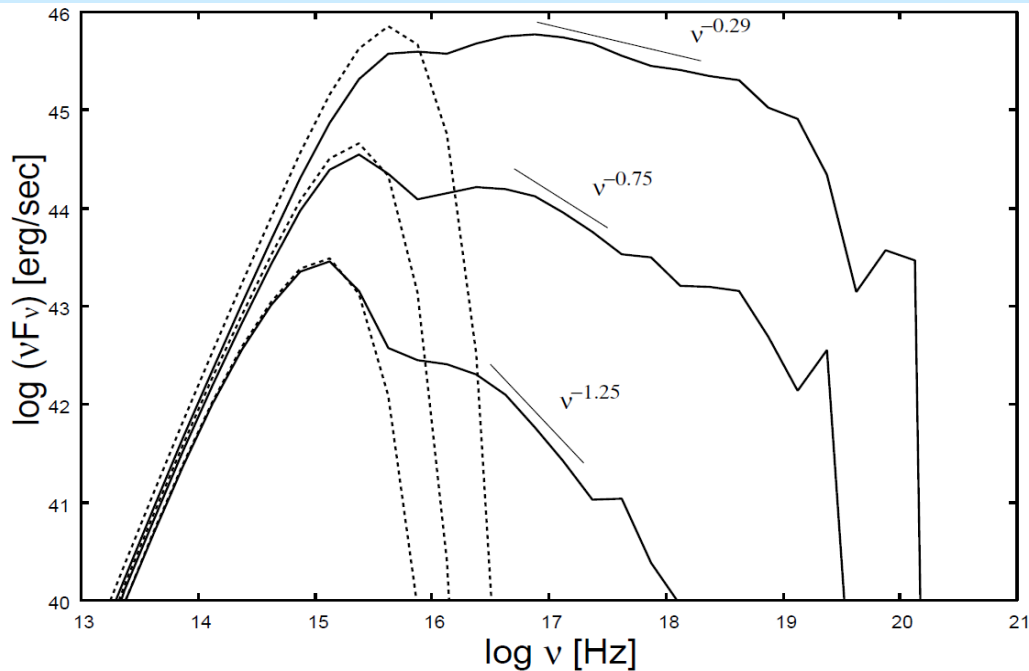


# モデルの詳細設定

- 円盤モデル ... 標準降着円盤 (Shakura & Sunyaev, 1973)  
解放される重力エネルギーのほとんどはコロナの加熱に使われる (Haardt & Maraschi 1991)
- 長さスケール, 密度 : 無次元量  
... 密度 :  $\rho_0 = 5.1 \times 10^{-14}, 1.7 \times 10^{-14}, 5.1 \times 10^{-15} \text{ g/cm}^3$   
...  $M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\text{sun}}$  (AGNs)
- コロナ中における輻射輸送計算:  
**3D Monte Carlo simulation**  
円盤からの熱輻射のインプット  
コロナ中の高温電子による散乱  
円盤への吸収・再放射  
を考慮
- コロナの蒸発/凝縮、  
熱伝導 : 今回は無視



# 結果: 円盤+MHDコロナ流からの輻射スペクトル



コロナの密度パラメーター:

上から

$$\left\{ \begin{array}{l} 5.1 \times 10^{-14} \text{ g cm}^{-3} \\ 1.6 \times 10^{-14} \text{ g cm}^{-3} \\ 5.1 \times 10^{-15} \text{ g cm}^{-3} \end{array} \right.$$

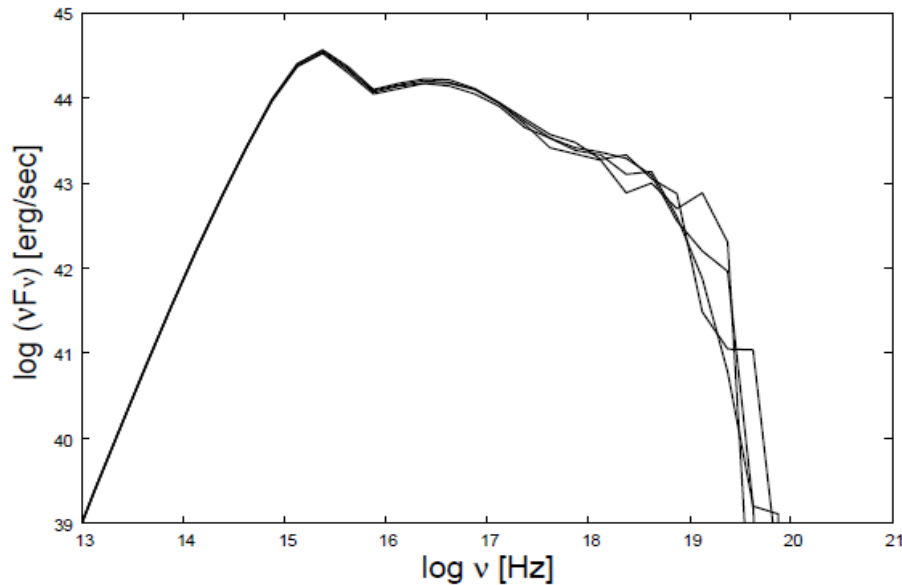
Power-law components ( $\alpha \sim 1-2$ ) are reproduced from our corona.

Table 1. Coronal properties

$\rho_0$ (g cm $^{-3}$ )	region	$T_{\text{cor}}$ [K]	$\tau$	$y$	$\alpha$
$5.1 \times 10^{-14}$	$0 < r < 10r_s$	$\sim 4.8 \times 10^9$	$\sim 0.2$	$\sim 1$	$\sim 1.29$
	$10r_s < r < r_s$	$\sim 3.9 \times 10^9$	$\sim 0.9$	$\sim 4$	
	$30r_s < r$	$\sim 2.9 \times 10^9$	$\sim 0.7$	$\sim 2$	
$1.6 \times 10^{-14}$	$0 < r < 10r_s$	$\sim 4.5 \times 10^9$	$\sim 0.5$	$\sim 0.2$	$\sim 1.75$
	$10r_s < r < r_s$	$\sim 3.7 \times 10^9$	$\sim 0.25$	$\sim 0.7$	
	$30r_s < r$	$\sim 2.7 \times 10^9$	$\sim 0.2$	$\sim 0.4$	
$5.1 \times 10^{-15}$	$0 < r < 10r_s$	$\sim 2.8 \times 10^9$	$\sim 0.02$	$\sim 0.03$	$\sim 2.25$
	$10r_s < r < 30r_s$	$\sim 2.8 \times 10^9$	$\sim 0.09$	$\sim 0.17$	
	$30r_s < r$	$\sim 1.9 \times 10^9$	$\sim 0.07$	$\sim 0.08$	

Coronal temperature in each case is regulated to  $\sim 10^9$  K.

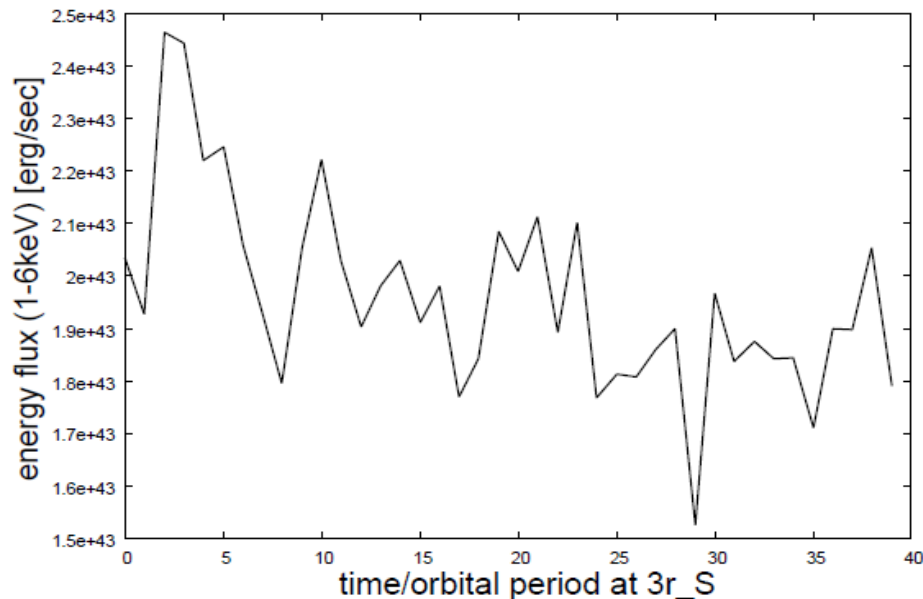
# 結果: 時間変動の様子



## Spectral variation of the Comptonized emission

MHDコロナ流は磁気回転不安定性(MRI)起源の乱流によって各点でfluctuate

→ スペクトルの形, 硬X線のフラックスも変化



## シミュレーションから得られたX線ライトカーブ

X線光度は $10^3$  ( $M/10^8 M_{\text{sun}}$ ) 秒のタイムスケールで~a few  $\times 10\%$ 変動

# X線連星系のLow/Hard stateへの応用

## 移流優勢円盤 (Advection Dominated Accretion Flow; ADAF)

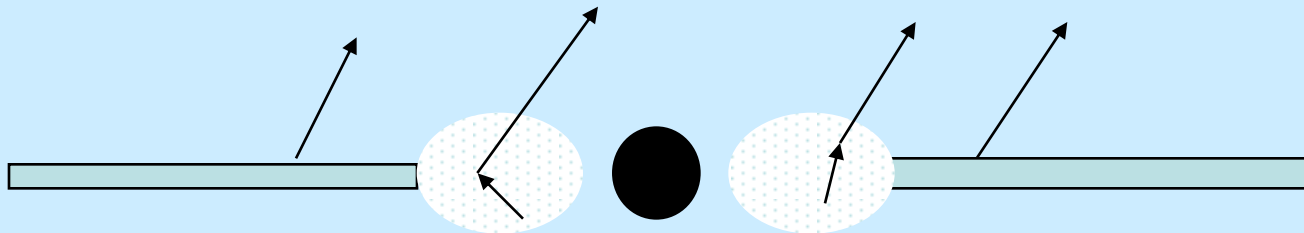
理論モデル...Ichimaru 1977; Narayan & Yi 1995

降着流の内縁部において、放射冷却のタイムスケール > 質量降着のタイムスケールとなったとき、ガスは高温・高圧のままブラックホールに落ち込む

### X線連星のLow/Hard stateへの適用

Power-law成分は内縁部の高温プラズマ中におけるunsaturated Compton scatteringで作られる

逆コンプトン散乱のseed photonはADAF内でのsynchrotron放射

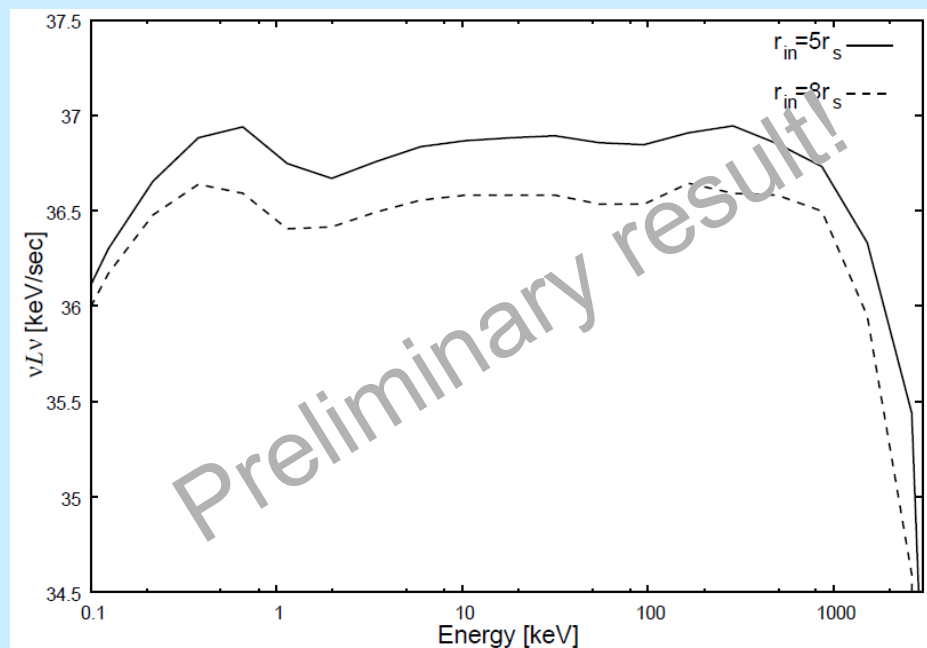
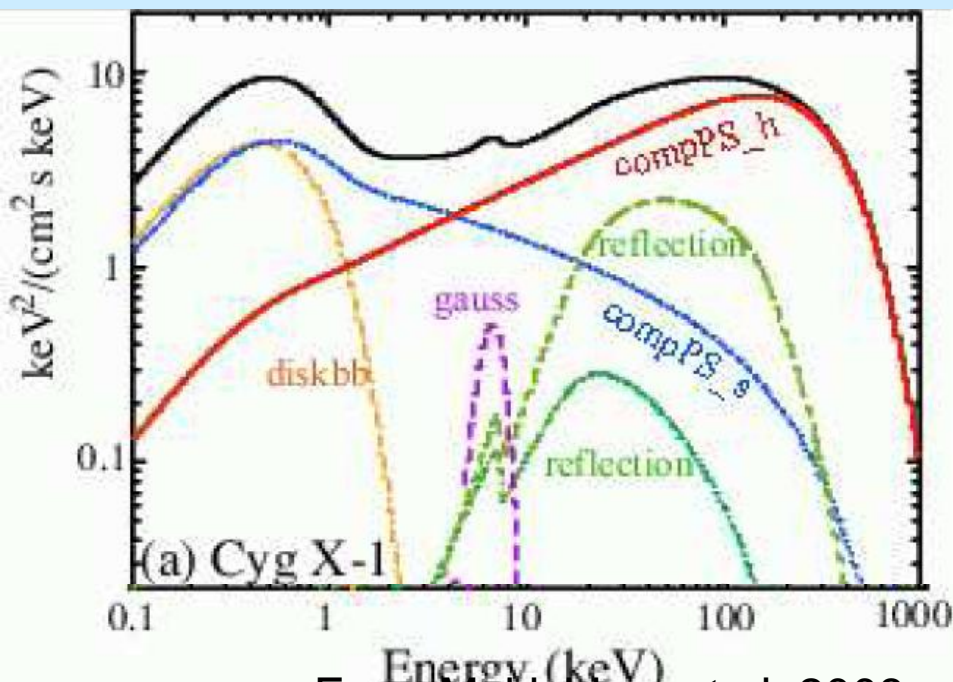


Suzakuにより、X線連星の広帯域スペクトルとその時間変動を詳しく解析 (Takahashi et al. 2008; Makishima et al. 2008)

スペクトル: **2成分**のコロナによる逆コンプトン散乱で説明可能 → コロナが空間分布を持つことを示唆 (cf. 明日の牧島先生のトーク)

時間変動: 種光子の供給源は振動しない**円盤**、コンプトン成分のみが振動。

→ オリジナルのADAFではなく、我々のモデルこそ適用可能! ?



NK, Kato & Mineshige in prep.

# まとめ・議論

- X線放射を生み出す円盤コロナとして光学的に薄い降着流の3次元MHDシミュレーションの結果を用い、赤道面上に仮想的に置いた光学的に厚い円盤からの熱的光子がコロナ中の電子によって逆コンプトン散乱される様子をモンテカルロシミュレーションで追うことによって、観測されるX線スペクトルとその時間変動を計算した。
- 得られたX線スペクトルは  $\alpha \sim 1-2$  のpower-lawを示し、密度パラメータを調節することによって観測されているSeyfert銀河のスペクトルを再現することができる。
- この系からの輻射のpower-law成分はコロナ流の変動とともにX線光度も変動する。X線光度は  $\Delta t \sim r_g/c$  程度のタイムスケールでは  $\sim$  a few 10% 程度の変動を示す。
- 今回の計算はX線連星のLow/Hard stateのスペクトルとその時間変動を説明できる可能性がある(現在進行中)