

MAXIによるCygnus X-1の長期変動解析と 2流降着モデル

杉本樹梨 (理化学研究所/立教大学)

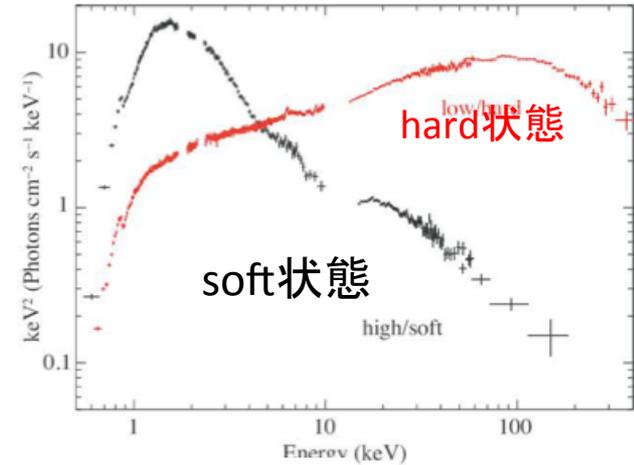
三原建弘(理研), 北本俊二(立教大), 松岡勝, 杉崎睦(理研),

根來均(日大), 中平聡志(JAXA), 他MAXIチーム

2015.6.21降着円盤大研究会2015@京都大学

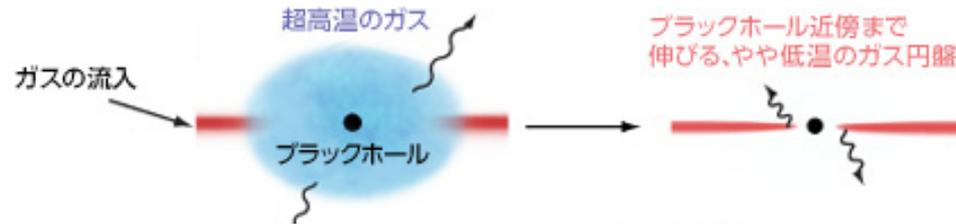
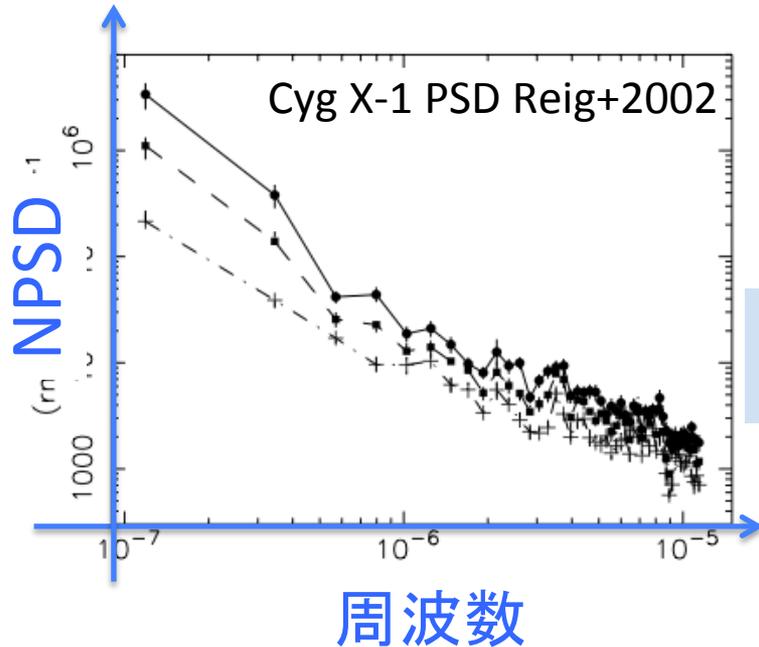
ブラックホール連星Cygnus X-1 (白鳥座X-1)

Cyg X-1の典型的なエネルギースペクトル (ref.Yamada+2013)



- BH質量 $14.8 \pm 1.0 \text{ Mo}$ (Orosz+2011)
- 伴星: 青色超巨星 HDE 226868 ($\sim 30 \text{ Mo}$) HMXB
- 公転軌道周期 5.6 日 (Kitamoto+1997.etc)
- エネルギースペクトルにおいて主に2つの状態をとる。
 - hard状態: コロナからのコンプトン放射が優勢
 - soft状態: 円盤からの熱的放射が優勢
- ~ 2011 年までは主にhard状態にあったが、

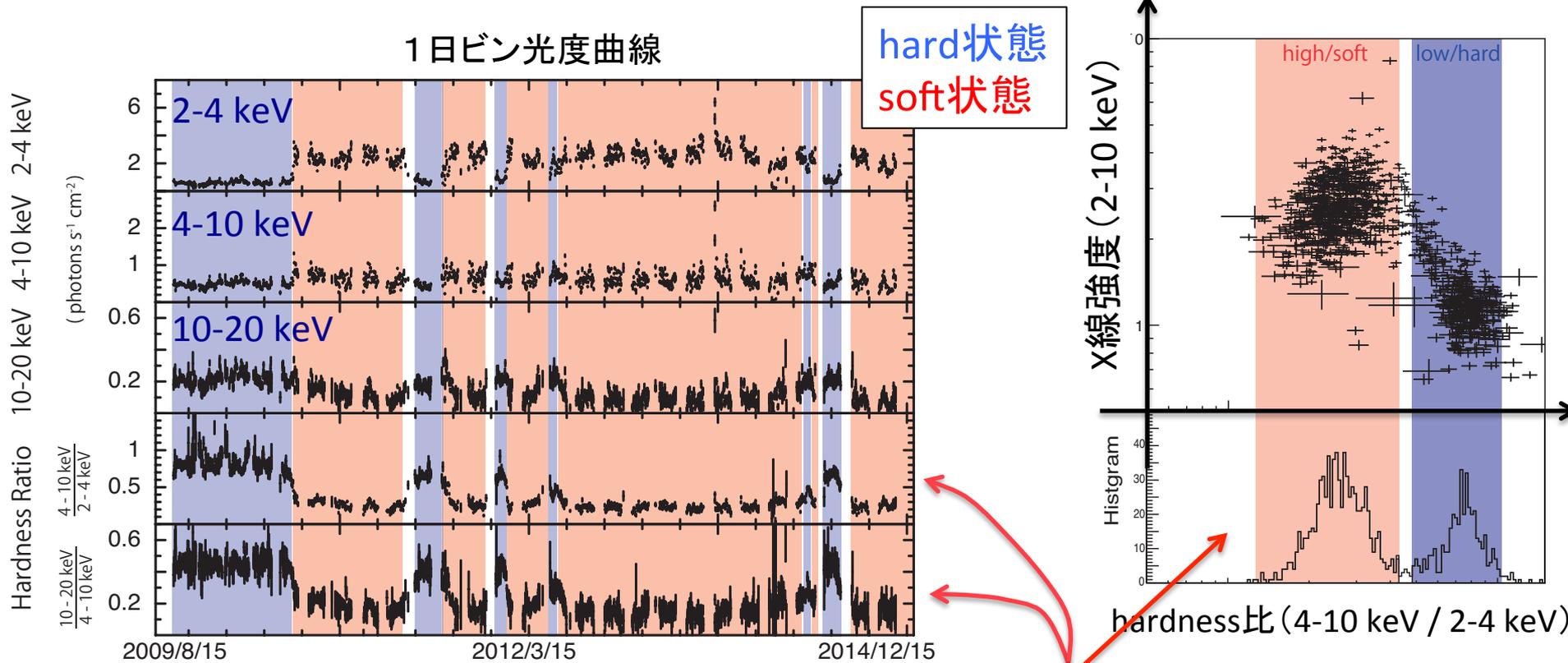
全天X線監視装置MAXI観測開始後(2009.8-)は主にsoft状態にある。



hard状態での長期変動解析: Reig et al. (2002)
 →エネルギー帯によってパワースペクトルが変化する。

- hard状態、soft状態の長期変動の違いは？
- パワースペクトルの変化が意味することは？
- 長期変動はどこからやってくるのか？

全天X線監視装置MAXIによる観測: 2009/8~2014/8



hardness比から、hard状態/soft状態に分けられる。

- 2009年8月-2014年12月で、11回の状態遷移を繰り返している。
- MAXIが観測している5年間のうち、3分の2はsoft状態にある。
- (~2011年以前は、主にhard状態にあった)
- soft状態の長期変動解析が、MAXIの長期観測によって可能となった。

Analysis 1: Power Spectrum Density

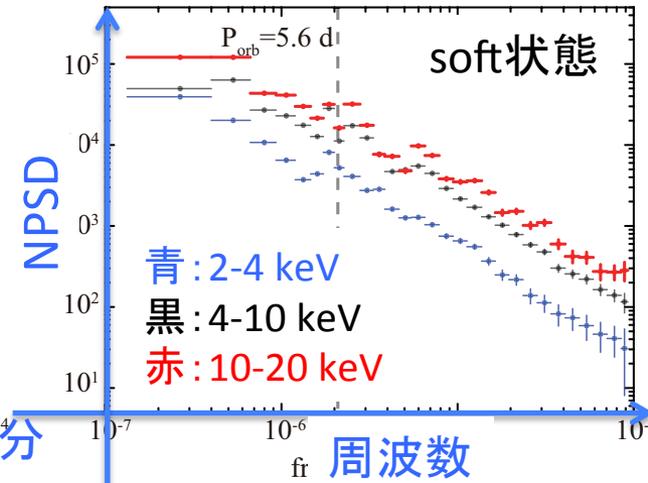
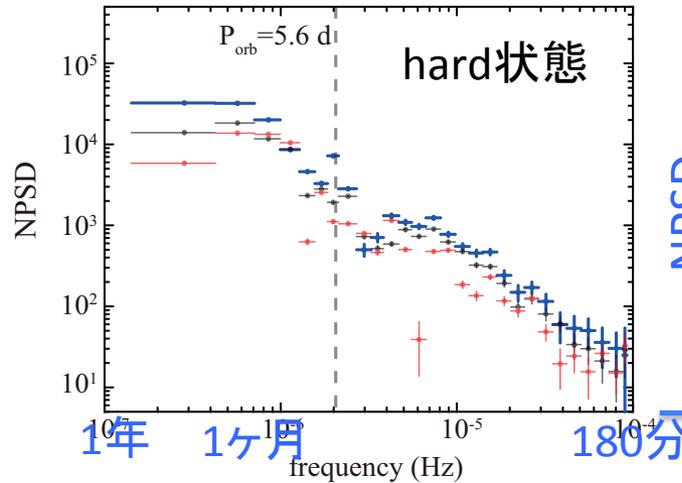
hard状態、soft状態の2-4 keV, 4-10 keV, 10-20 keV の規格化パワースペクトル(NPSD)を計算した。(NPSD=観測したX線強度の時系列データをフーリエ変換し、二乗したもの)

2009年8月-2014年12月から、

- hard状態 → 40日間×6セット
- soft状態 → 44日間×10セット

のデータを3つのエネルギー帯別(2-4 keV, 4-10 keV, 10-20 keV)に解析した。

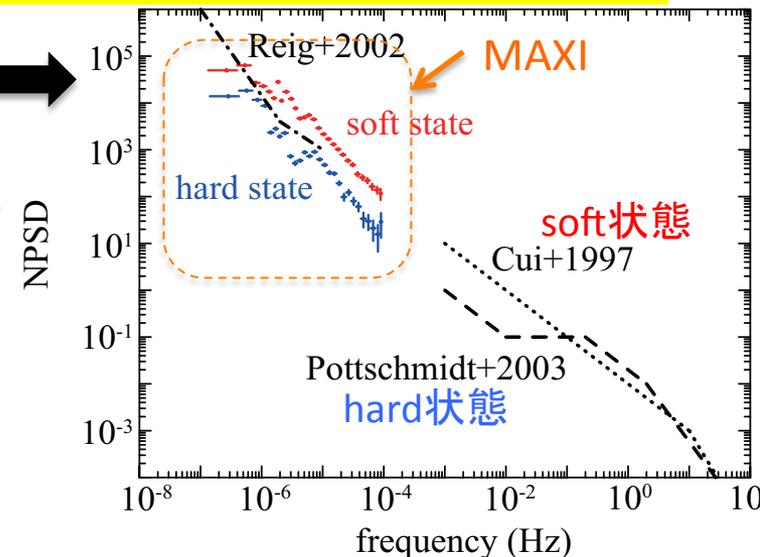
→ 周波数範囲: 10^{-4} Hz ~ 10^{-7} Hz



hard状態: 2-4 keV > 4-10 keV, 10-20 keV → 低エネルギー帯域で変動が大きい。
 soft状態: 10-20 keV > 4-10 keV > 2-4 keV → 高エネルギー帯域で変動が大きい。

MAXIによるNPSD (4-10 keV)と先行研究の比較

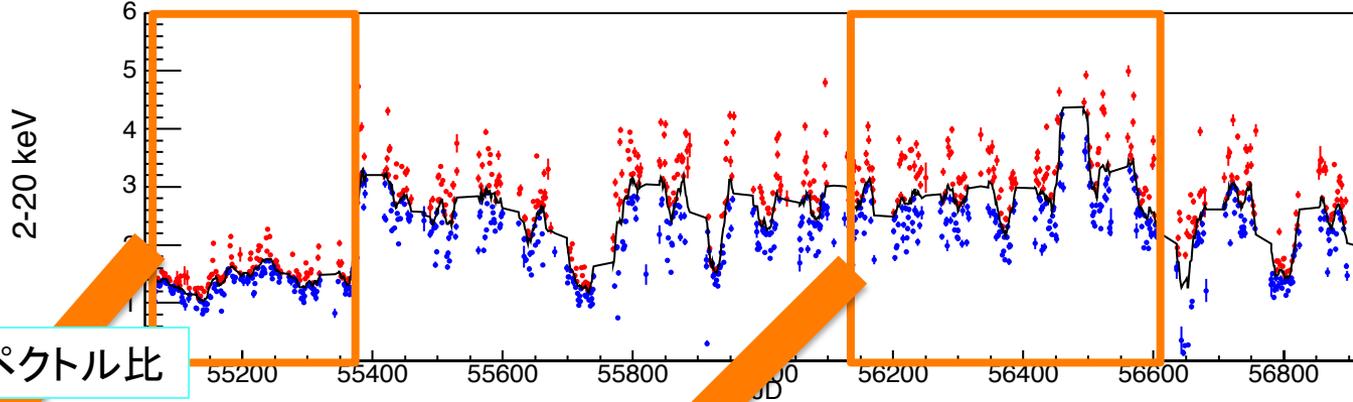
- 先行研究NPSD(10^{-3} Hz < f)のおよそ延長線上にのる。
- $\sim 10^{-7}$ Hzまで、ほぼ同じべきで伸びている。
- soft状態のNPSDは、hard状態よりも ~ 1 桁大きい。



Analysis2: Energy spectrum

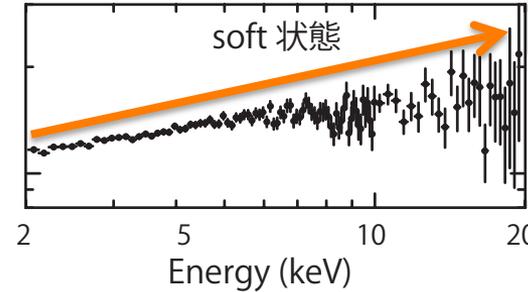
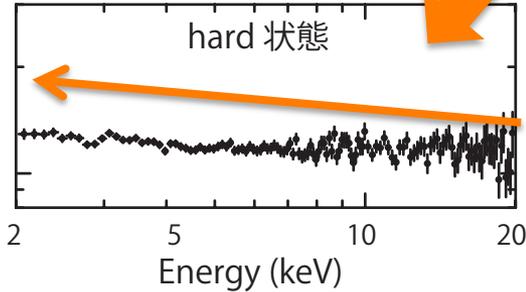
hard状態、soft状態で、それぞれ移動平均強度に対して明るい日と暗い日に分け、X線スペクトルを抽出した。

黒: 15日間ごとの移動平均強度
 赤: 移動平均より明るい日
 青: 移動平均より暗い日



明るい時期/暗い時期 X線スペクトル比

スペクトル比

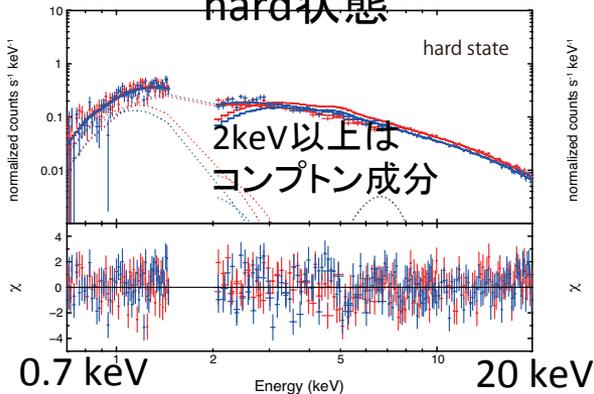


hard状態: 低エネルギー側で強度比大
 soft状態: 高エネルギー側で強度比大
 → NPSD解析結果と同じ傾向を示している。

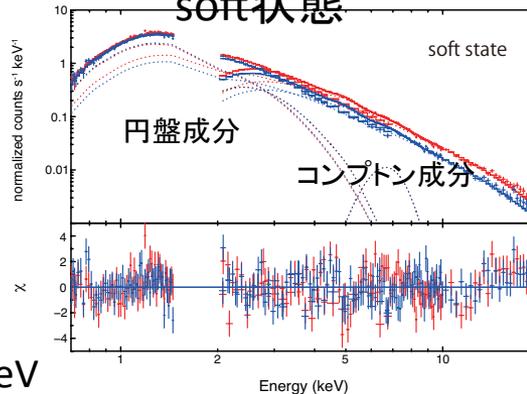
GSC+SSC エネルギースペクトル

降着円盤からの黒体放射成分+コロナからのコンプトン放射性分を考慮したモデルでフィッティング

hard状態



soft状態



soft 状態では、

- 円盤成分フラックスとコンプトン成分フラックスは同程度であった ($\sim 3 \times 10^{-8}$ erg/s/cm²)。
- 高エネルギーのpowerlaw成分が変動が大きく、低エネルギー側の円盤成分の変動は小さい。

Discussion : Cause of the Time Variation

10^{-7} Hz (数十日スケール) 以上のゆっくりとした変動は、BH近傍のX線放射領域では作ることができない。

→離れた半径で起こっている変動が中心まで伝搬されている。(Churazov+2001)

様々な変動時間スケール (ガスはケプラー回転していると仮定)

- 粘性時間スケール (accretion time scale) : $t_v = \left[\alpha \left(\frac{H}{R} \right)^2 \Omega_K \right]^{-1} = \frac{1}{\alpha \Omega_K} \left(\frac{H}{R} \right)^{-2}$
Lyubarskii +1997
 - 力学的時間スケール : $t_d \sim \frac{1}{\Omega_K}$
H : diskの半分の厚さ
R : disk半径
 - 熱的な時間スケール : $t_{th} \sim \frac{1}{\alpha \Omega_K}$
 α : 粘性パラメータ
 Ω_K : ケプラー回転角速度
- $$\Omega_K = \sqrt{\frac{GM_{BH}}{R^3}}$$

質量降着率の変動の伝搬:

- ・ **幾何学的に薄い円盤**: $H/R \sim 0.01, \alpha \sim 0.01 \rightarrow t_v > t_{th} > t_d$

実際の変動時間スケールが粘性時間スケールより短い ($t_{th}, t_d \ll t_v$) ので、BH近傍に伝搬するまでに変動はなまされてしまう。

- ・ **幾何学的に厚い円盤**: $H/R \sim 1, \alpha \sim 0.01 \rightarrow t_v \sim t_{th} > t_d$

実際の変動時間スケールが粘性時間スケールと同程度 ($t_v \sim t_{th}$) なので、BH近傍のX線放射領域まで変動を伝搬できる。

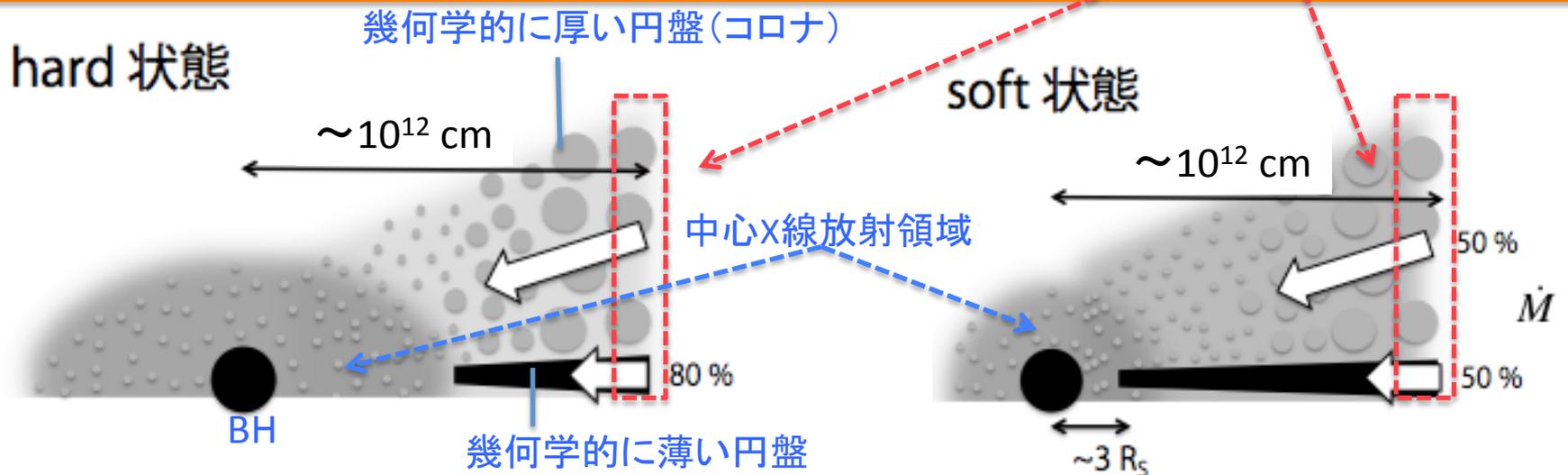
→ 一部は**幾何学的に厚い円盤 (光学的に薄いコロナ)** を通って降着すると考えられる。

Discussion : Cause of the Time Variation

幾何学的に厚い円盤(コロナ)が広がっている!

$$t_{th} \sim \frac{1}{\alpha \Omega_K}$$

ブラックホール質量 $15 M_{\odot}$ 、 $\alpha = 0.01$ と仮定し、
変動時間スケール $t_{th} = 10^7$ sec を作る半径は $R \sim 3 \times 10^{12}$ cm
→ Cyg X-1 連星系の大きさに匹敵する。



様々な半径での様々な時間スケールのコロナの(α の)変動が、BH近傍の質量降着率に影響を与え、hot electronをその時間スケールで変化させる。

「NPSDの形(べき)が同じ→同じ物理的メカニズムが強度変動に関係している」
幾何学的に厚い円盤(disk)と幾何学的に薄い円盤と厚い円盤(コロナ)を通る質量降着率の割合を推定する(Churazov+2001)。

Discussion : Cause of the Time Variation

NPSDのnormalizationは、disk, coronaを通る質量降着率の変動分の二乗和で表せる。

$$NPSD \propto \frac{(f_d \dot{M}_d)^2 + (f_c \dot{M}_c)^2}{\dot{M}_T^2} \longrightarrow NPSD \propto \frac{(f_c \dot{M}_c)^2}{\dot{M}_T^2}$$

$$\dot{M}_T = \dot{M}_d + \dot{M}_c$$

\dot{M}_d : diskを通る質量降着率

($|\dot{M}_d| \ll |\dot{M}_c|$)と仮定

\dot{M}_c : Coronaを通る質量降着率

hard状態において、

$f > 0.1$ Hzでは「質量降着量の $\sim 100\%$ がコロナを通して降着している(幾何学的に厚い円盤の内縁より内側)」と仮定する。

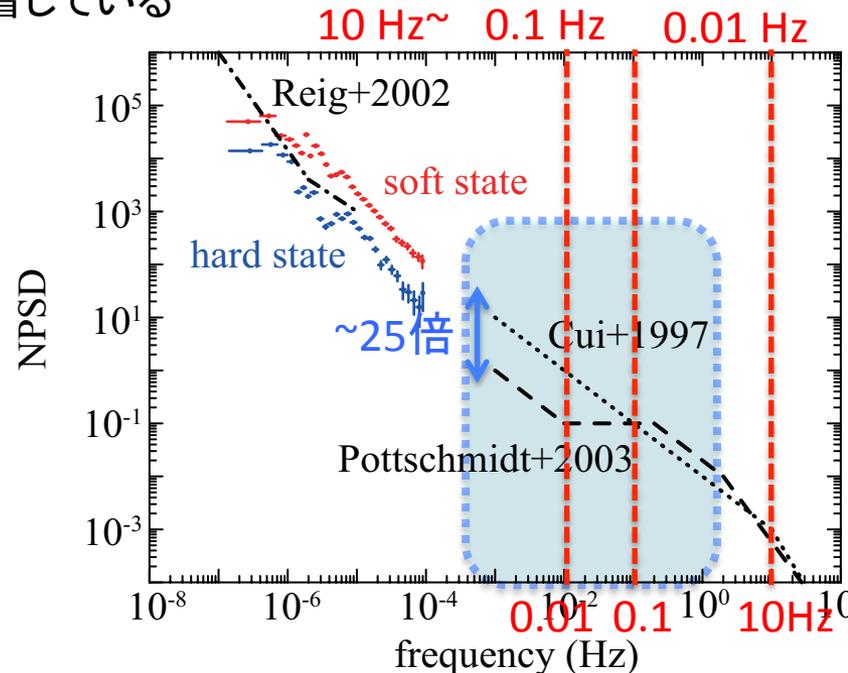
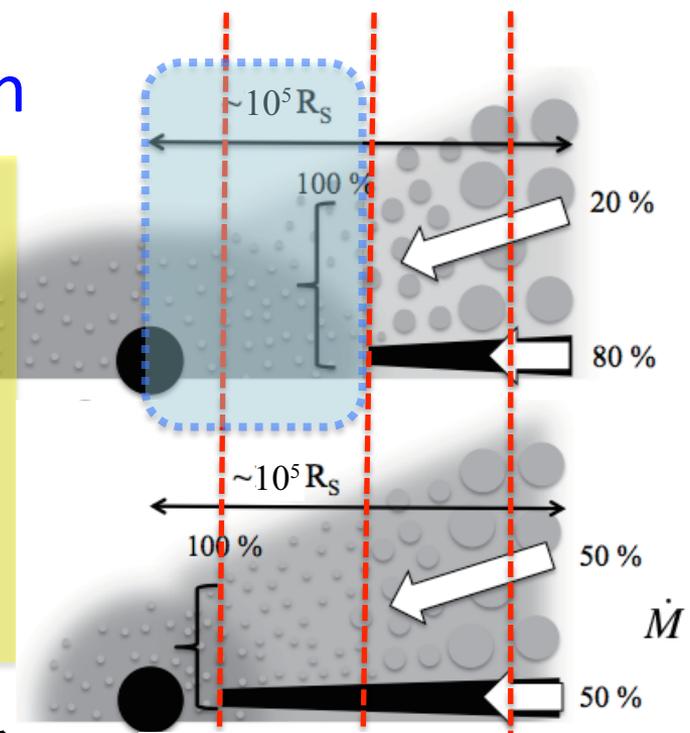
$f < 0.01$ HzのNPSDを延長すると、normalizationは25分の1になっているので

$$10 \text{ Hz} < \frac{(f_c \dot{M}_c)^2}{\dot{M}_T^2} = f_c^2 \quad (\dot{M}_T = \dot{M}_c)$$

$$0.01 \text{ Hz} > \frac{(f_c \dot{M}_c)^2}{\dot{M}_T^2} \quad (\dot{M}_T = \dot{M}_c + \dot{M}_d)$$

$$\frac{(f_c \dot{M}_c)^2}{\dot{M}_T^2} = \frac{1}{25} f_c^2 \rightarrow \dot{M}_c \sim \frac{1}{5} \dot{M}_T$$

→ 遅いtime scaleを作る領域 ($f < 0.01$ Hz) では、全体の降着量の 20% がcoronaを通過して降着する。(残り 80% はdiskを通過して、変動なし)



Discussion : Cause of the Time Variation

$$NPSD \propto \frac{(f_d \dot{M}_d)^2 + (f_c \dot{M}_c)^2}{\dot{M}_T^2} \longrightarrow NPSD \propto \frac{(f_c \dot{M}_c)^2}{\dot{M}_T^2}$$

$$\dot{M}_T = \dot{M}_d + \dot{M}_c$$

\dot{M}_d : diskを通る質量降着率

($|\dot{M}_d| \ll |\dot{M}_c|$)と仮定

\dot{M}_c : Coronaを通る質量降着率

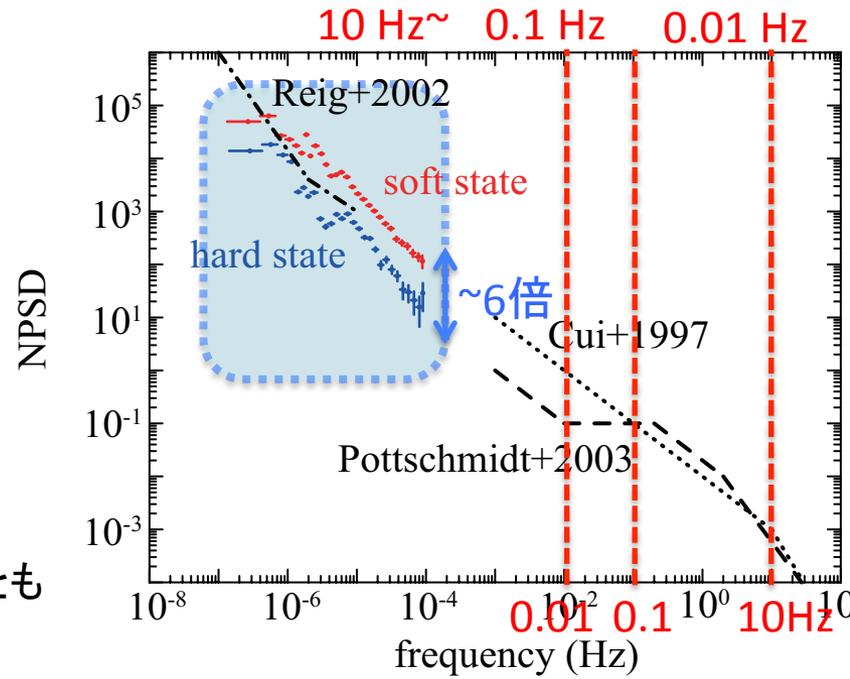
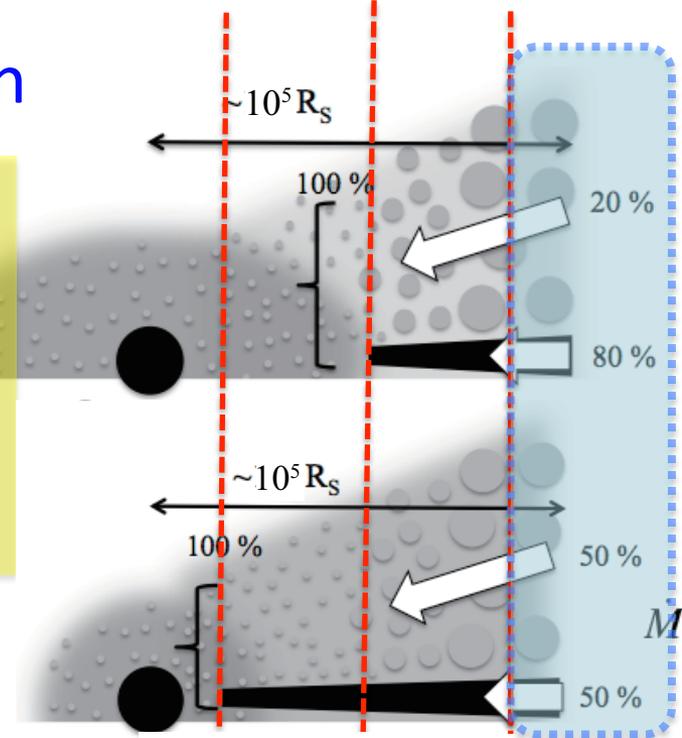
soft状態において、
 $f < 10^{-4}$ Hzでは、normalizationはhard状態より~6倍大きいので

$$\left. \frac{(f_c \dot{M}_c)^2}{\dot{M}_t^2} \right|_{soft} = 6 \left. \frac{(f_c \dot{M}_c)^2}{\dot{M}_t^2} \right|_{hard}$$

$$\Leftrightarrow \dot{M}_c \Big|_{soft} = \sqrt{6} \dot{M}_c \Big|_{hard}$$

$$= \frac{\sqrt{6}}{5} \dot{M}_t \sim \frac{1}{2} \dot{M}_t$$

→ soft状態では、全体の降着量の**50%**がcoronaを通ると推定できる。(残り**50%**はdiskを通過して、変動なし)
 スペクトルフィッティングの結果(disk成分フラックスとコンプトン成分フラックスは同程度: $\sim 3 \times 10^{-8}$ erg/s/cm²)ともコンシステントである。



まとめ

MAXIの長期観測データを用いて、Cyg X-1のhard状態、soft状態の長期変動解析を行った。

1. NPSD解析の結果、異なるスペクトル状態では、**変動のエネルギー依存性が異なる**ことがわかった。
 - ✓ hard 状態: 2-4 keV > 4-10 keV, 10-20 keV → 低エネルギー帯域で変動が大きい。
 - ✓ soft 状態: 10-20 keV > 4-10 keV > 2-4 keV → 高エネルギー帯域で変動が大きい。また、両状態ともに 10^{-3} Hz<のPSDの延長線に乗る。
2. 10^{-7} - 10^{-4} Hzにおいて、soft 状態のNPSDは、hard状態よりも約一桁大きい。
3. エネルギースペクトル解析からも、NPSD解析と同様の結果が得られた。
また、soft 状態では、高エネルギーのpowerlaw成分が変動が大きく、低エネルギー側の円盤成分の変動は小さいことがわかった。

以上の結果から、hard状態、soft状態ともに **幾何学的に厚い円盤(コロナ)が遠くの半径までのびており、幾何学的に薄い円盤とコロナを通して降着するモデル**が考えられる。幾何学的に薄い円盤は定常だが、厚い円盤(コロナ)は変動する。遠方で作られた変動が、幾何学的に厚い円盤(コロナ)を通して伝搬し、BH近傍で、変動する高エネルギー成分を作っているかもしれない。