

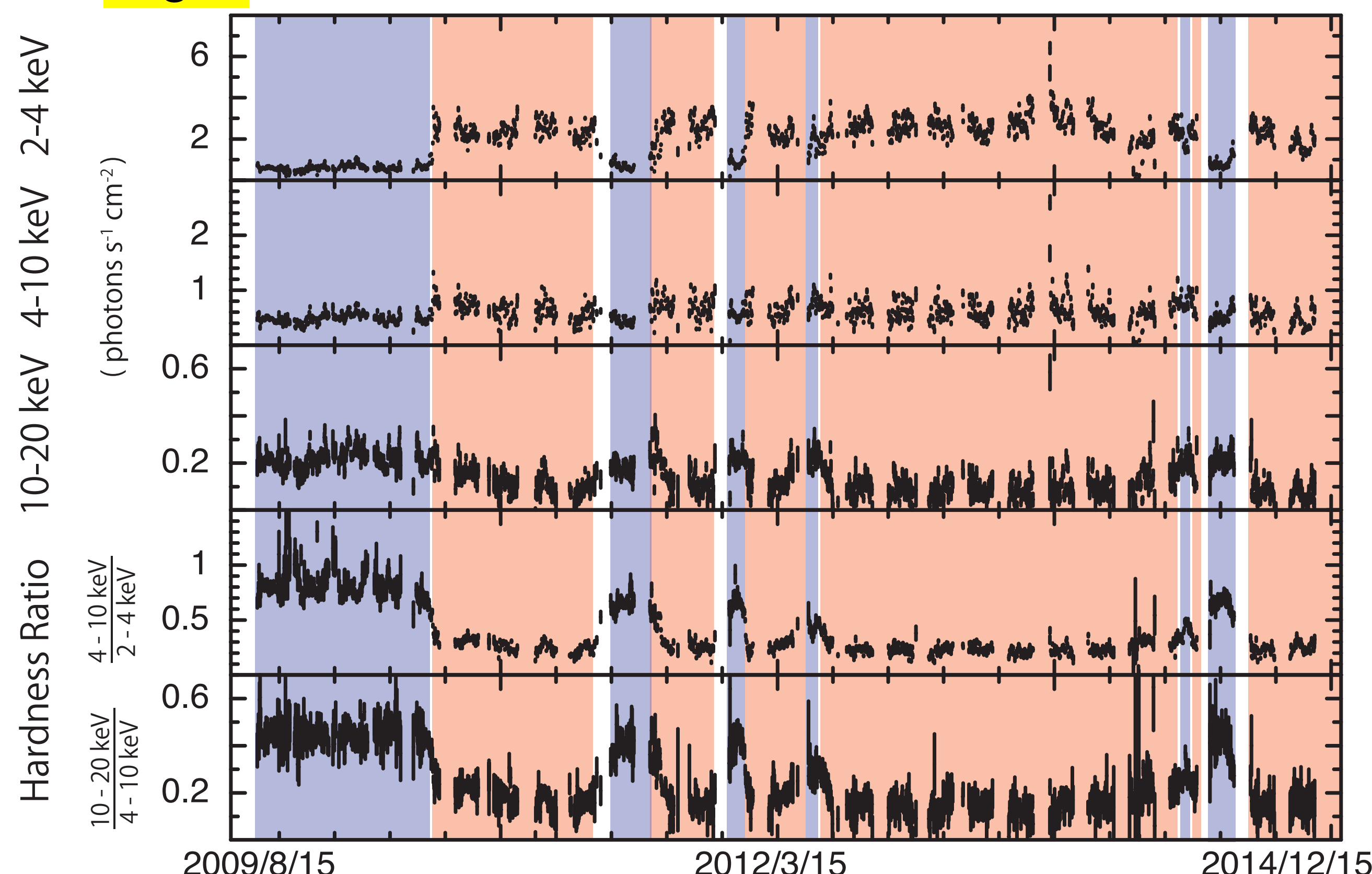
# MAXIによる白鳥座X-1の low/hard、high/soft状態の長期変動

杉本樹梨 (理研/立教), 三原建弘 (理研), 北本俊二 (立教), 松岡勝, 杉崎睦 (理研),  
根来均 (日大), 中平聡志 (JAXA), 他MAXIチーム  
sugimoto@crab.riken.jp



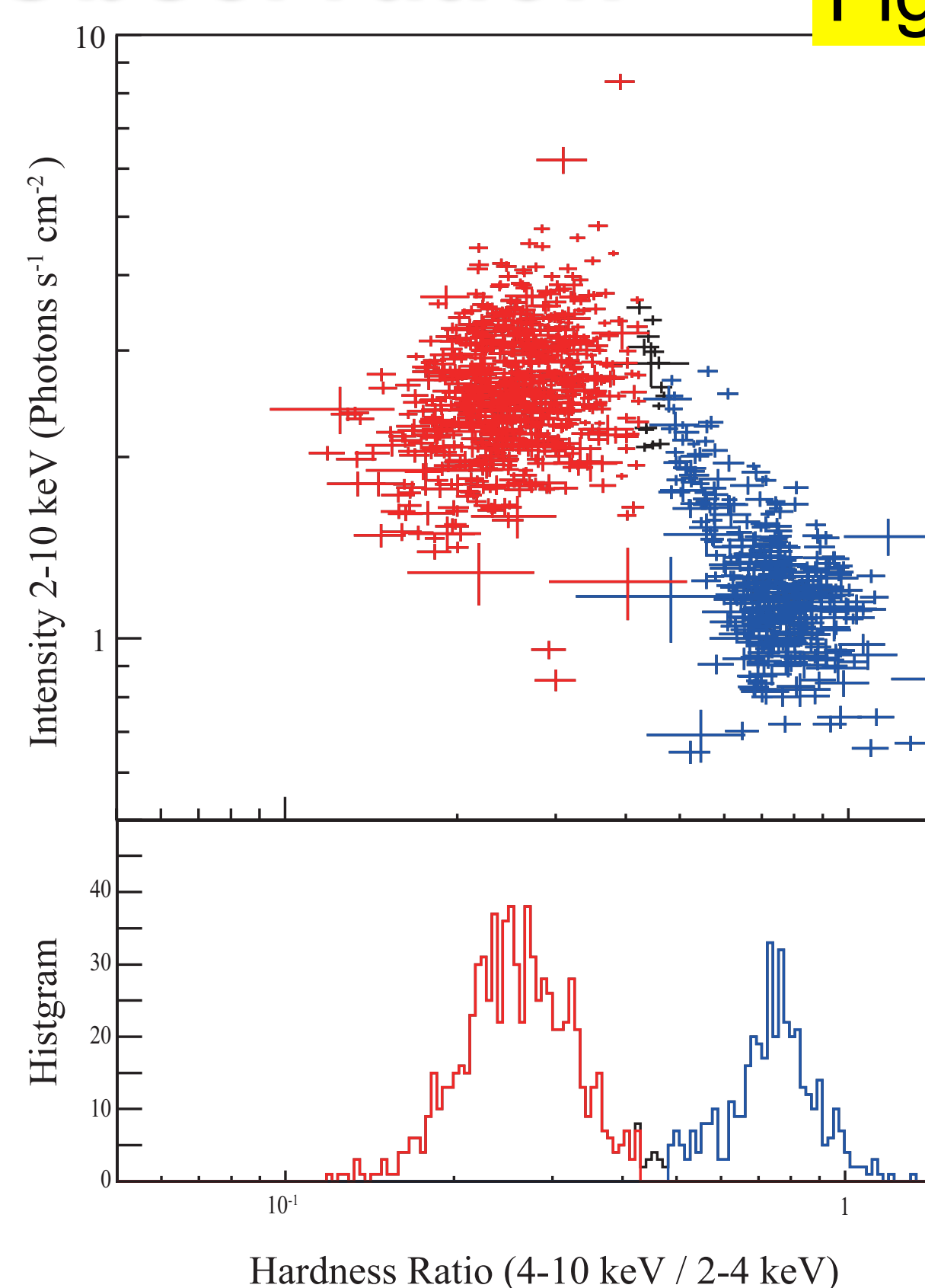
全天X線監視装置MAXIによる5年間(2009.8 - 2014.8)に及ぶ観測データを解析し、ブラックホール連星白鳥座 X-1 (Cyg X-1)の数日～数年の長期変動を調べた。Cyg X-1は2つのスペクトル状態、low/hard状態とhigh/soft状態をとる。low/hard状態、high/soft状態についてそれぞれ3つのエネルギー帯域(2-4 keV, 4-10 keV, 10-20 keV)別に、 $10^{-4}$  Hzから $3 \times 10^{-8}$  Hzの範囲の規格化パワースペクトル(NPSD)を得た。その結果、両状態ともに、**NPSDの形はほぼ  $f^{-1}$  に従い、**先行研究(Cui et al. 1997; Pottschmidt et al. 2003)の $10^{-4}$  Hz以上の周波数帯域における**NPSDの延長線上に乗ることが確認できた。**また、**high/soft状態のNPSDのパワーは、low/hard状態よりもおよそ一桁大きいという結果を得た。**変動のエネルギー依存性は、low/hard状態では有意に受かっていない。一方で、**high/soft状態では、高エネルギー帯域のNPSDのパワーは、低エネルギー帯域よりも大きいことがわかった。**さらに、物理的モデルを用いてエネルギースペクトルの解析を行った結果、顕著に変動しているpowerlaw成分があることがわかった。これらの結果は、hotコロナからのコンプトン放射によるべき型成分は、光学的に厚い降着円盤からの熱的放射による黒体放射成分よりも激しく変動するというを示唆する。

Fig 1 Blue = low/hard state, Red = high/soft state



## 1. Observation

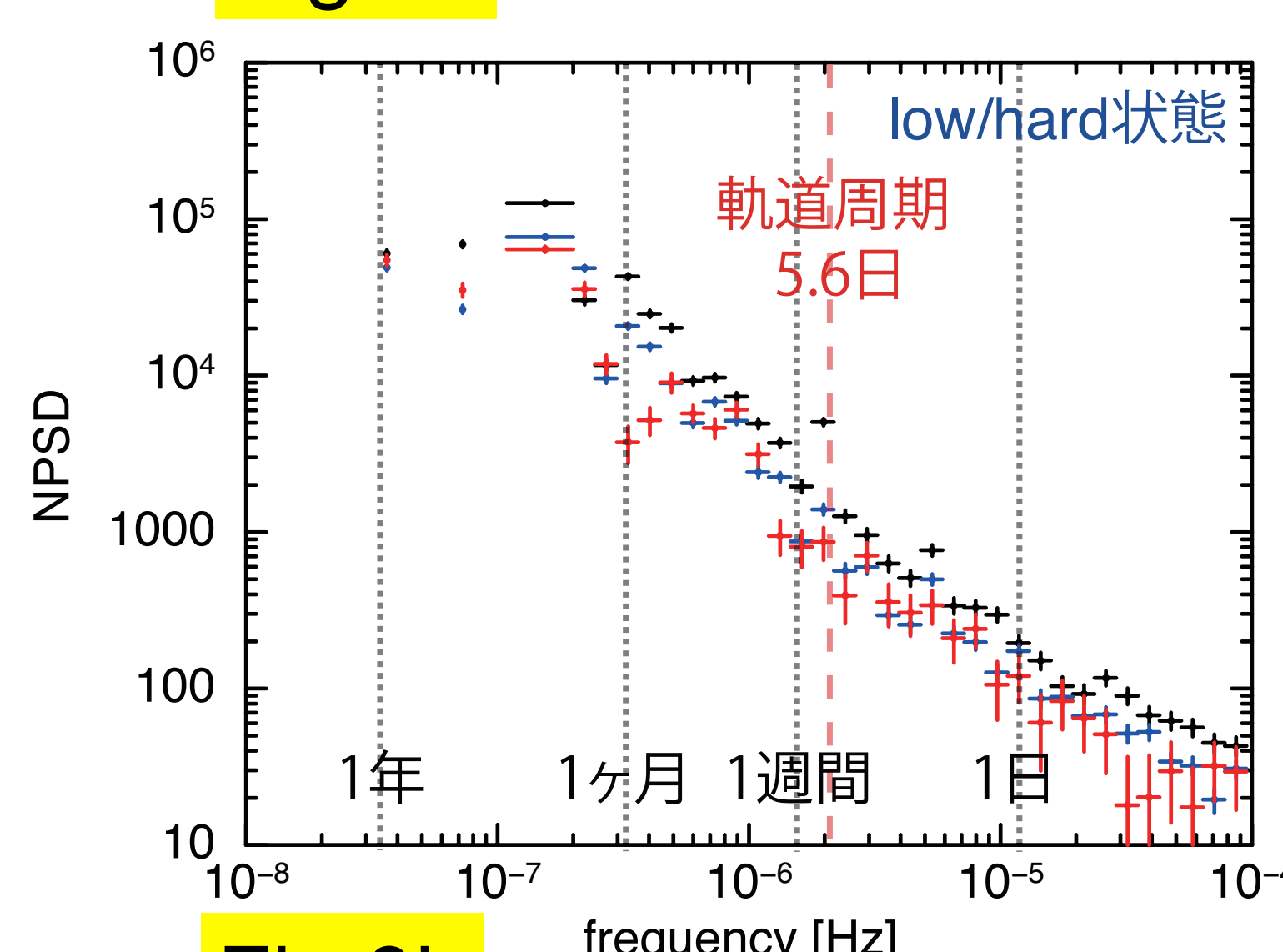
Fig 2



MAXI/GSCによる5年間(2009-2014)の光度曲線(Fig 1)。1点=1日積分データ  
low/hard状態、high/soft状態の継続期間は、Intensity-color図から決定した(Fig 2)。  
**赤**で示した期間は**high/soft状態**、**青**は**low/hard状態**にある。白は状態遷移中の期間である。  
MAXIの観測開始(2009.8)から約10ヶ月間low/hard状態が継続した後、2010/6/1にhigh/soft状態へ状態遷移し、約10ヶ月間継続した。このように長期にわたってhigh/soft状態が続いているのは、Cyg X-1が発見されて以来初めてである。

## 2. Power Spectrum Density (PSD) analysis

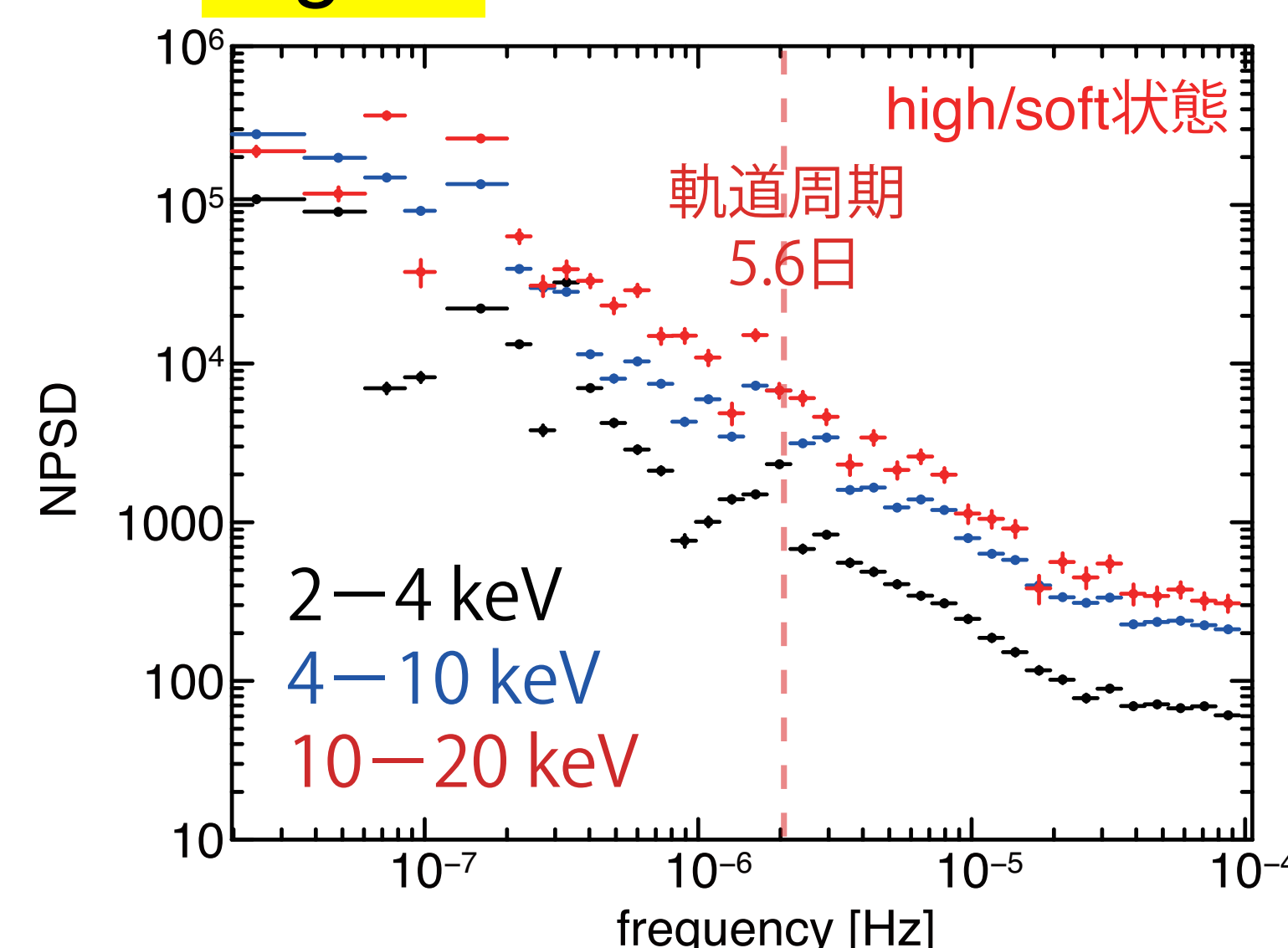
Fig 3a



2-4 keV, 4-10 keV, 10-20 keV 帯域の光度曲線(Fig 1)から、それぞれlow/hard状態(2009.8-2010.6)とhigh/soft状態(2012.7-2013.12)のNPSDを計算し、状態別に比較した[6]。

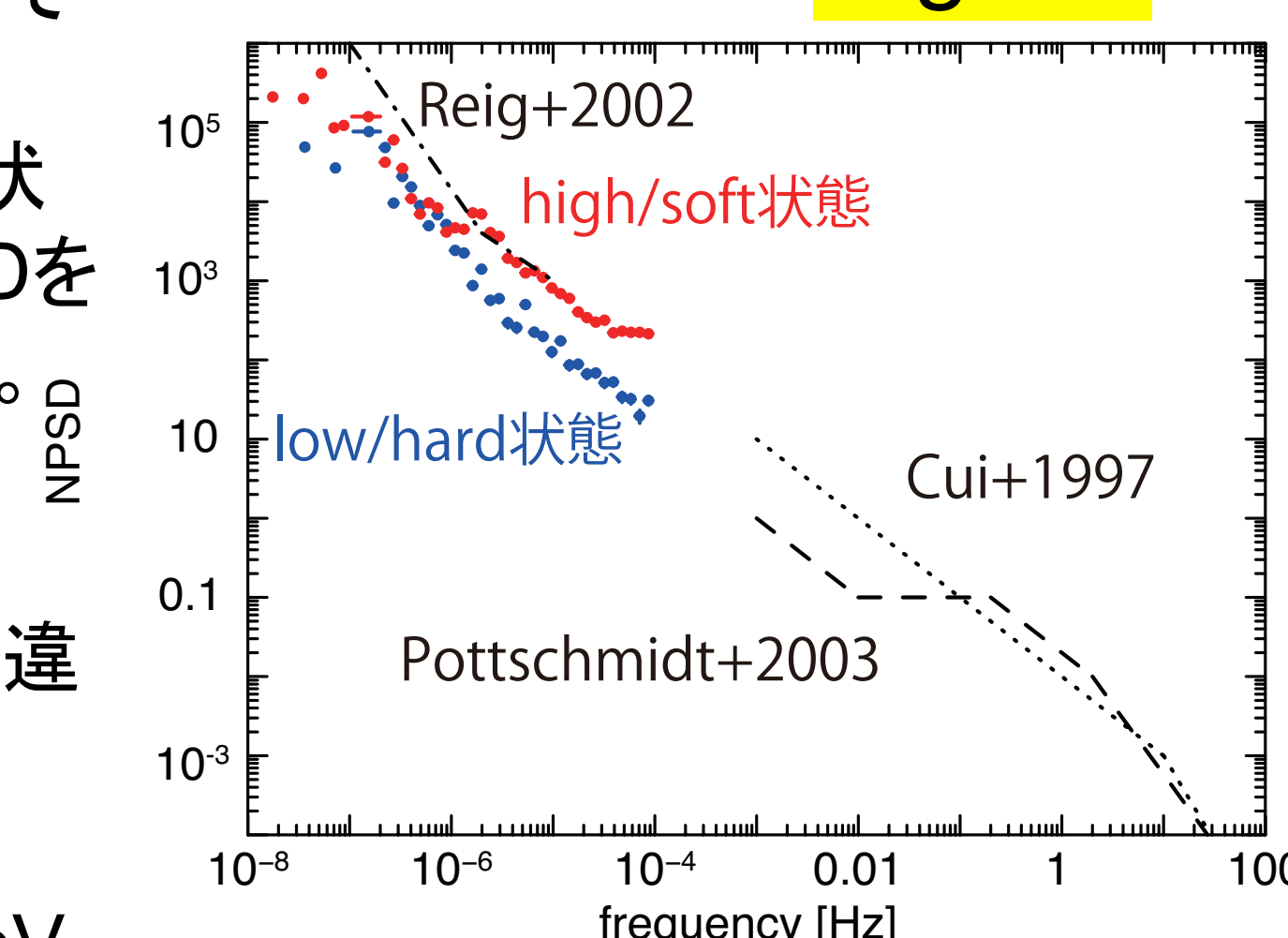
- **low/hard状態(Fig 3a):** エネルギー帯によるパワーの違いは小さい。
- **high/soft状態(Fig 3b):** 10-20 keV帯域では、4-10 keV帯域よりも約2倍パワーが大きい。4-10 keV帯域では、2-4 keV帯域よりも約5倍大きい。

Fig 3b



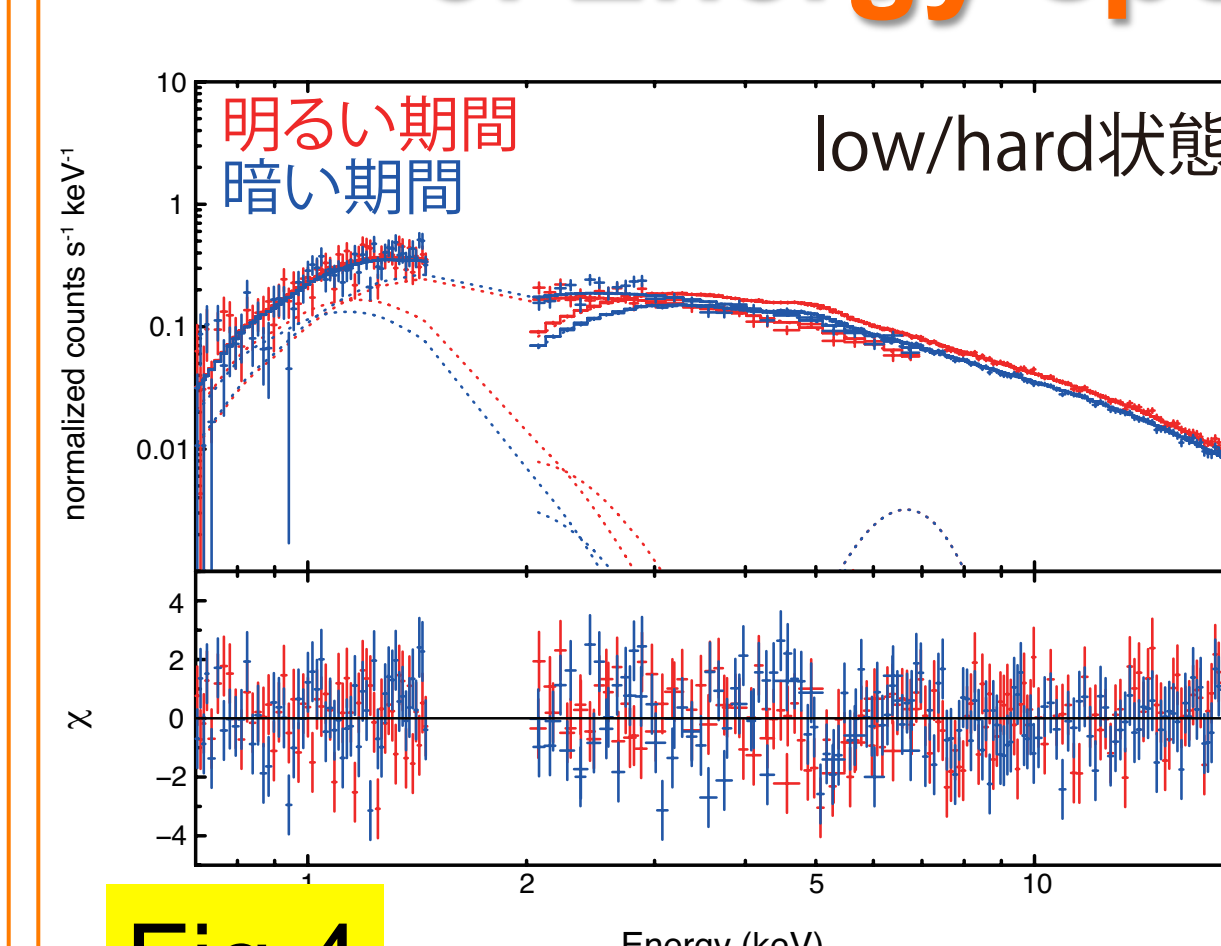
2-4 keV帯域の変動パワーは2状態で同程度であるが、それ以上の高エネルギー成分に変動性の違いがあることがわかる。また、両状態とも、**5.6日の軌道周期のピークが現れている。**

Fig 3c



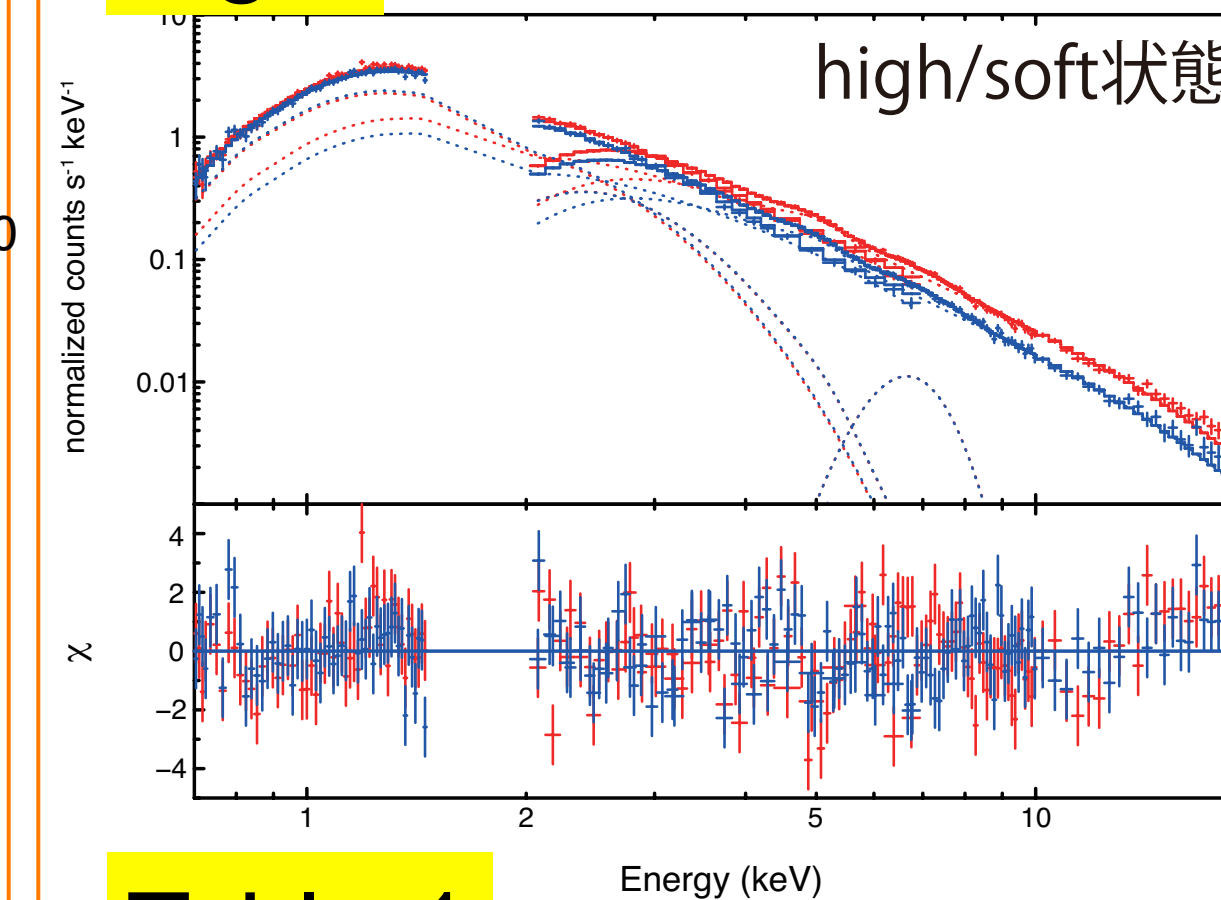
さらに、我々の結果は先行研究[1][2]による高周波数帯域( $10^{-10}$ - $10^{-3}$  Hz)のPSDのほぼ延長上にのることを確認した(Fig 3c)。  
また、**high/soft状態のNPSDは、low/hard状態よりも約1桁パワーが大きいことがわかった。**

## 3. Energy spectrum analysis



エネルギー帯域と変動成分の関係を詳細に調べるため、物理的なモデルlow/hard状態、high/soft状態における、明るい時期/暗い時期のエネルギースペクトルをそれぞれ抽出し、円盤成分(低エネルギー成分)とコンプトン成分(高エネルギー成分)の放射を仮定したモデルフィッティングを行った(Fig 4, Table 1)。

Fig 4



- **low/hard状態:** 2つのスペクトルの変化は大きくない。円盤成分、コンプトン成分ともに~10%変動している。

Table 1

Model = phabs*(diskbb+ntbComp+gaussian)					
Component	Parameter	hard/bright	hard/dim	soft/bright	soft/dim
phabs	$N_{\text{H}}$	$6.1 \pm 0.6$		$3.6 \pm 0.1$	
diskbb	$T_{\text{in}}$ (keV)	$0.23 \pm 0.02$	$0.20 \pm 0.02$	$0.48 \pm 0.01$	$0.47 \pm 0.01$
ntbComp	$\Gamma$	$1.68 \pm 0.01$	$1.65 \pm 0.01$	$2.81 \pm 0.03$	$2.91 \pm 0.04$
	$r_{\text{in}}^{\text{bb}}$ (km)	$116.4^{+17.0}_{-13.9}$	$135.8^{+23.2}_{-18.1}$	$53.5^{+1.7}_{-1.6}$	$52.5^{+1.7}_{-1.6}$
Luminosity		$1.76 \pm 0.04$	$1.50 \pm 0.03$	$2.71 \pm 0.02$	$2.35 \pm 0.02$
fit goodness	$\chi^2_{\nu}$	1.37 (420)		1.38 (370)	

**high/soft状態:** 高エネルギー側で明らかに変化が大きい。円盤成分は~10%、コンプトン成分は~20%変動している。

## 4. Discussion & Conclusion

・ **MAXIにより、初めてCyg X-1の1年以上継続したhigh/soft状態の観測が行われた。** PSD解析から、high/soft状態では「高エネルギー帯域の成分の時間変動が大きく、低エネルギー帯域の成分は変動が小さい」というエネルギー依存性があることがわかった。これは、hotコロナからのコンプトン放射によるハード成分は、光学的に厚い降着円盤からの熱的放射によるソフト成分よりも激しく変動するというを示唆する。

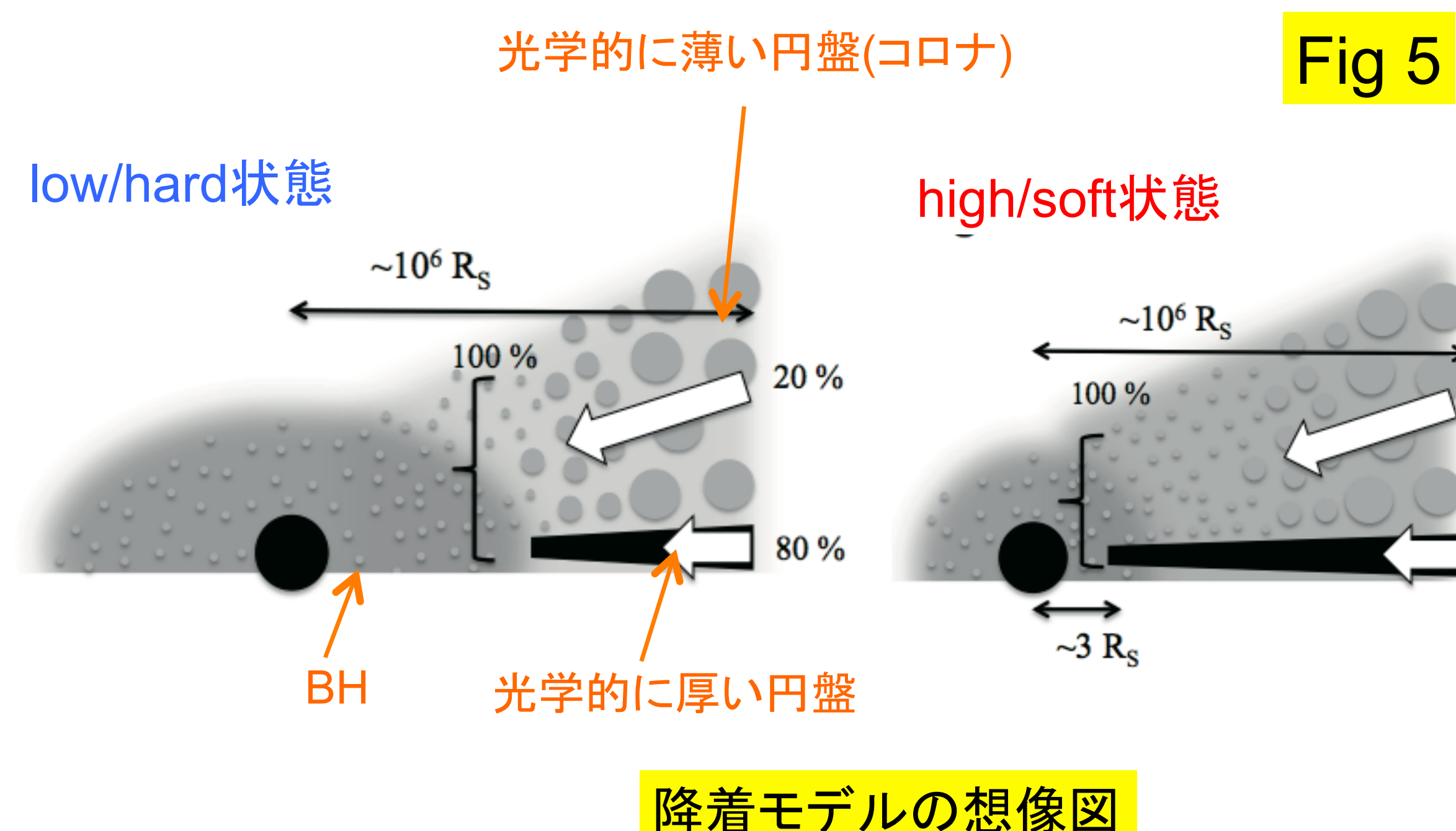
・  $3 \times 10^{-8}$  Hz という長い変動は、質量降着率の変動によるものと考えられる[3]。質量降着率の変動の原因は、以下の2つが考えられる。

### 1. 質量降着の影響

光学的に厚い降着円盤では、粘性時間スケールが熱的スケールよりも長いいため、BHから遠い場所での変動をBH近傍のX線放射領域まで伝搬することができない。そこで、光学的に薄い円盤(コロナ)を導入する[4]。質量降着は、光学的に厚い円盤と、その上下に存在する光学的に薄い円盤(コロナ)を通ると考える(Fig 5)。我々の観測結果から、光学的に薄い円盤(コロナ)はBHから $\sim 10^6 R_s$  ( $\sim 10^{12-13}$  cm)まで延びていると推定される。

### 2. stellar windの影響

Cyg X-1での質量交換は、一般的に伴星からのstellar windの捕獲によると考えられている。BHが外合周辺にあるときに、ソフトX線が吸収を受ける「dip」現象があり、この周期は変化することが知られている[5]。このstellar windの不安定性が、質量降着率の変動に影響を与えている可能性が考えられる。



降着モデルの想像図

- [1] Pottschmidt, K., Wilms, J., Nowak, M. A., et al. 2003, A&A, 407, 1039
- [2] Cui, W., Zhang, S. N., Jahoda, K., et al. 1997, The Transparent Universe, 382, 209
- [3] Reig, P., Papadakis, I., & Kylafis, N. D. 2002, A&A, 383, 202
- [4] Churazov, E., Gelfand, M., & Revnivtsev, M. 2001, MNRAS, 321, 759
- [5] Kitamoto, S., Miyamoto, S., Tanaka, Y., et al. 1984, PASJ, 36, 731
- [6] Sugimoto, J., Mihara, T., Sugizaki, M., et al. 2014, JPS Conference Proceedings, 1, 013104