

「すざく」を用いたエディントン限界に近いCyg X-2の軟X線放射の解析

○白井 裕久、高橋 弘充、永江 修、深沢 泰司(広大理)

1. Introduction

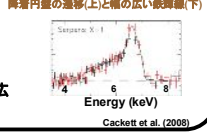
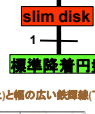
エディントン限界付近での物理を研究するため、我々は2006年5月に「すざく」で観測されたCyg X-2のアーカイブデータを解析した。Cyg X-2は中心に弱磁場中性子星(NS)を持つ低質量X線連星系(LMXBs)でエディントン限界付近(光度 $\sim 2 \times 10^{38}$ erg/s)で輝いているZ天体である。今回、我々は以下の2点について集中的に解析した。

1. 降着円盤の状態

エディントン限界に近いような質量降着率では、降着円盤が標準降着円盤からslim diskと呼ばれる状態になると考えられている。標準降着円盤とslim diskでは温度分布が違っていると考えられていて、標準降着円盤では $p = -0.75$; $T \propto r^{-p}$ なのに対して、slim diskでは $-0.75 < p < -0.5$ になり、低温度側の放射が相対的に増加すると考えられている。しかし観測的には、ブラックホール連星系ではエディントン限界に近いような質量降着率での観測例が少ないことや、星間吸収が大きい。これに対し、LMXBsの中のZ天体は常にエディントン限界付近で輝いている。その中でもCyg X-2は吸収が少ないこともあり、降着円盤の放射が優勢な1keV以下の放射を観測するのに適している。

2. 鉄輝線領域のbroadな構造

最近のLMXBsの観測で、6keV周辺のbroadな構造が観測されており、それらはbroadな輝線放射(Cackett et al. 2008)や黒体放射(温度 ~ 1.5 keV、高橋ら 2006)として解釈されている。このようなbroadな構造を解析するには、スペクトルの連続成分を決定することが重要である。そこで、我々は広帯域で同時観測でき、優れたエネルギー分解能を持つ「すざく」で鉄輝線領域の解析を詳細にした。



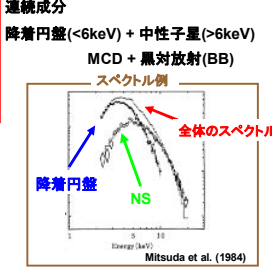
2. Suzaku Observation

すざく衛星		
検出器	XIS(CCD)	HXD-PIN
エネルギー帯域	0.2-12keV	10-70keV
	$\Delta E \sim 130$ eV @ 6keV	HXD-GSO
	50eV @ 0.53keV	50-600keV

Cyg X-2の「すざく」アーカイブデータを解析
 観測日 2006/5/16
 光度 1.3×10^{38} erg/s
 観測時間 ~ 40 ksec

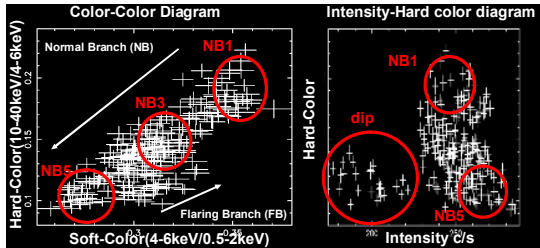
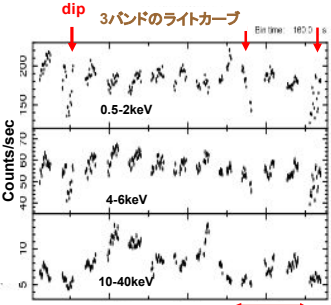
本研究には、連続成分の決定のために広帯域で観測でき、鉄輝線領域での優れたエネルギー分解能を持つ「すざく」が最適

「すざく」は高いエネルギー分解能で広帯域の観測が可能



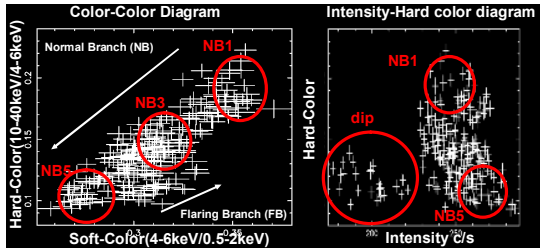
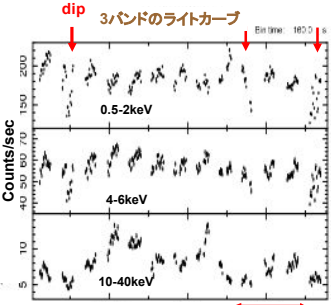
3. Results

3-1. Light Curve and Color-Color Diagram

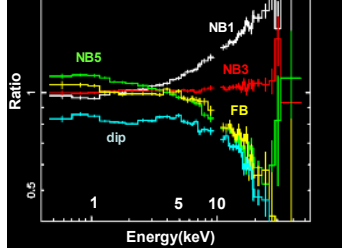


Normal Branch (NB), Flaring Branch (FB), Dipの3状態を観測
 →状態遷移を観るためにColor-Color図上の位置で7個のスペクトルを作成

3-2. Deviation from the standard accretion disk (Excess observed @ ~ 1 keV)



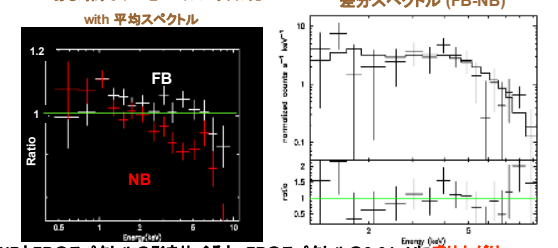
Gaussianモデルでは物理的におかしい



- NB1→NB5でfluxが連続的に増加 4keV以下 ⇔ 減少 4keV以上 (スペクトルがsoftになっている)
- FBでは4-10keVのfluxがNB5よりも高い
- FBのスペクトルはNB1に比べてsoft
- dipではFBと同じスペクトルの形をしているしかし、fluxは20%ほど小さい

3-3 (a). Broad structure around 6 keV @FB

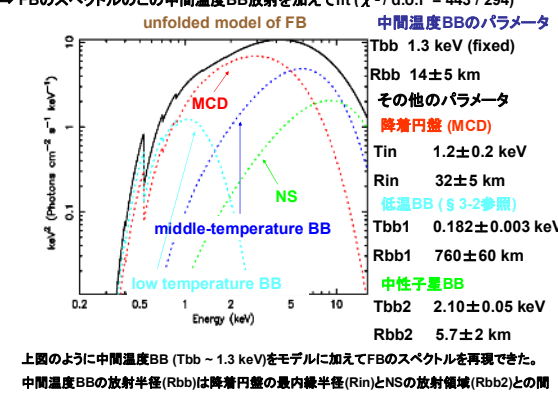
より細かい変動を観るために160secごとにスペクトルを作成...変化を観る
 ある時間でのFBとNBのスペクトル比



NBとFBのスペクトルの形を比べると、FBのスペクトルの3-6 keVに盛り上がり
 2つのスペクトルの差分 → 温度 ~ 1.3 keVの黒体放射で再現

disk lineのようなbroadな輝線では再現できない
 このことはNB→FBへの状態遷移で中間温度の黒体放射成分が現れる (降着円盤 < T < 中性子星)

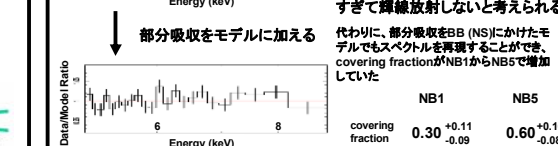
⇒ FBのスペクトルのこの中間温度BB放射を加えて fit (χ^2 d.o.f = 443 / 294)



中間温度BBのパラメータ
 Tbb 1.3 keV (fixed)
 Rbb 14 ± 5 km
 その他のパラメータ
 降着円盤 (MCD)
 Tin 1.2 ± 0.2 keV
 Rin 32 ± 5 km
 低温BB (§ 3-2参照)
 Tbb1 0.182 ± 0.003 keV
 Rbb1 760 ± 60 km
 中性子星BB
 Tbb2 2.10 ± 0.05 keV
 Rbb2 5.7 ± 2 km

上面のように中間温度BB (Tbb ~ 1.3 keV)をモデルに加えてFBのスペクトルを再現できた。
 中間温度BBの放射半径(Rbb)は降着円盤の最内半径(Rin)とNSの放射半径(Rbb2)との間

3-3 (b). Broad structure around 6 keV @NB



モデル:MCD + BB (NS) + BB (低エネルギー側)で再現 ~ 6 keVにbroadな構造
 disk lineモデルで再現。
 ⇒ 最内半径 ≤ 70 km程度

この距離では電離パラメータが大きすぎて輝線放射しないと考えられる
 代わりに、部分吸収をBB (NS)にかけたモデルでもスペクトルを再現することができ、covering fractionがNB1からNB5で増加していた

我々は「すざく」で観測したCyg X-2のアーカイブデータを解析した。
 1keVのexcessは輝線構造でなく、dust scatteringとは考えにくい。これは部分的にslim diskになっている状態を観測している可能性がある。

NBからFBの遷移で中間温度BBが現れた。この放射は高橋らによる光学的に厚くなるようなoutflowの描像と一致する。
 NBでは6 keV付近にbroadな構造があり、outflowによる部分吸収を加えることでこの構造を再現できた。

4. Discussion

標準降着円盤からのexcess @ 1 keV

~ 1 keVの放射...低温BB(~ 0.18 keV)で再現

温度・放射半径から降着円盤の外側の領域からの放射と考えられ、放射強度は質量降着率の増加と共に増加したことから、降着円盤の一部である可能性が示唆される。

降着円盤の温度分布を
 $T(r) = T_{in}(r/R_{in})^{-0.75}$, $T_{in} = 1.44$ keV, $R_{in} = 24$ kmとすると
 $\Rightarrow r \sim 680$ kmでの温度 ~ 0.12 keV (低温BBの温度と近い値)

この結果は相対的に低温度側の放射が増加するslim diskの描像と一致する。

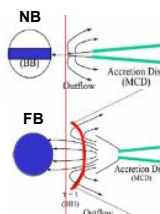
なので、降着円盤全体の温度分布が一様に変化しているのではなく、局所的にslim diskとなっている可能性が考えられる。

FBでの描像 broadな構造 @ 6 keV

NBからFBに状態遷移する時に中間温度BBが検出された。この放射は温度、放射半径を考慮すると降着円盤の最内半径付近から放射していると考えられる。この現象は他のZ天体でも過去の観測で報告され(高橋ら 2005, 2006)、光学的に厚いoutflowが見えたと解釈されており、このoutflowについて、以下のようなシナリオが提案されている

outflowは降着円盤とNS表面からの放射圧によって生じている。右図のように、NBではoutflowの総量が少なく、質量降着率が増加しFBになると、outflowの光学的厚みが増す(右図下)。この結果、光学的に厚いoutflowからの放射がFBでの中間温度BBとなって検出されたと考えられる。また、FBでは30 keV以上の放射が検出されなくなるのはoutflowがNSからの放射を隠すためと考えられている。

NBでの描像
 鉄輝線領域の構造が部分吸収モデルで再現できたのは、outflow物質による吸収と考えることができ、NB1からNB5でcovering fractionが大きくなったのはoutflowの総量が増加したと考えたとconsistent。



このoutflowは降着円盤とNS表面からの放射圧によって生じている。右図のように、NBではoutflowの総量が少なく、質量降着率が増加しFBになると、outflowの光学的厚みが増す(右図下)。この結果、光学的に厚いoutflowからの放射がFBでの中間温度BBとなって検出されたと考えられる。また、FBでは30 keV以上の放射が検出されなくなるのはoutflowがNSからの放射を隠すためと考えられている。