

論文内容の要旨

論文題目

X-ray Studies of the Black Hole Binary Cygnus X-1 with *Suzaku*

X線衛星「すざく」によるブラックホール連星 Cygnus X-1 の研究

山田真也

1 研究の背景：ハード状態の理解の進展と残された謎

ブラックホールの理論的予言から、その存在を証明することは宇宙物理学の重要な課題のひとつであった。1970年代にブラックホール候補の第一号として Cyg X-1 が認識されて以降、銀河系内やマゼラン雲にある約20個のX線天体がブラックホール連星として認定され、詳細な観測が行われ、近年ではブラックホール時空の精緻な測定へと進みつつある。ブラックホール連星の研究における残された大きな謎の一つは、光度がエディントン限界の数%以下で実現する「ハード状態」における、激しく変動する強い硬X線放射の解釈である。これは、1970年代から気球実験などで研究され、 ~ 100 keV 付近で折れ曲がる power-law 的なスペクトルは、光学的に薄い降着円盤の高温電子により、何らかの低エネルギー光子が逆コンプトンされたものであるという、熱的コンプトンモデルが提唱された。このモデルは観測とおおむね矛盾しないが、標準降着円盤の内縁半径はどのあたりか、コロナはどんなサイズや形状をもつか、低エネルギー光子の起源は何か、数秒からミリ秒に至るタイムスケールで速いランダムな強度変動を生み出す機構は何か、という根本的な謎が未解決のままであった。

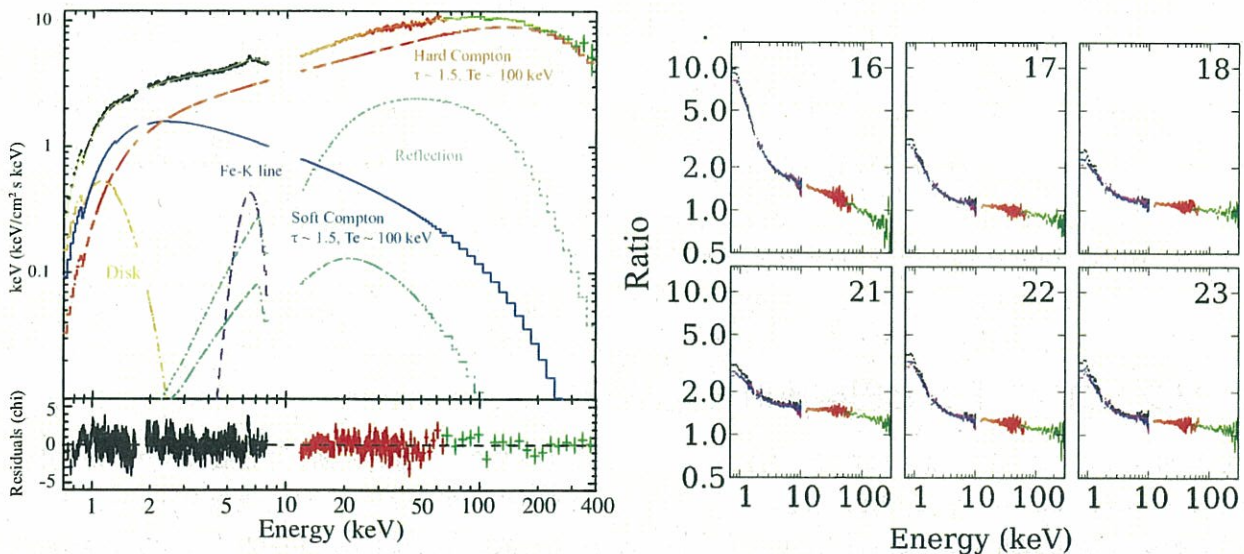


図1 (左)「すざく」によるCygX-1の νF_ν スペクトル、ベストフィットモデル、およびそれを構成する各成分(上)。ベストフィットモデルとデータの残差(下)。(b)25回の観測で得られたスペクトルのうち、代表的な6つを第3観測の平均スペクトルに対する比として示したもの。

この謎を解明すべく、我々は「すぎく」でCyg X-1を観測し、その結果の第一報を牧島他 (2008) としてまとめてきた。図1 (左上) は、CygX-1 の検出器応答を取り除いたデータおよび最終的に得られたベストフィットモデルの νF_ν と、各モデル成分 (ソフト/ハードコンプトン、標準降着円盤、鉄輝線、反射成分) である。この研究では、著者が中心となり、早い変動を調べるために、XIS データを用いて $\Delta t = 1$ 秒の時間分解能で強度を判別し、各時間で XIS と HXD のデータを積分して明暗のスペクトルを抽出する新しい解析手法 (“強度判別分光法”) を考案し、 $\Delta t = 1$ 秒で変動するパラメータを決定することにも成功した。

本論文では、初期成果をさらに深化すべく、「すぎく」衛星が 2005-2009 年に行った Cyg X-1 の全 25 観測のデータを系統的に解析した。そのさい、観測ごとに平均した 0.5 – 300 keV のスペクトル同士を比較するとともに、強度判別分光法により $\Delta t = 1-2$ 秒、ショット解析により $\Delta t = 1$ 秒以下のスペクトル変動を抽出することで、様々な Δt で変動する成分を同定し、牧島他 (2008) で用いたモデル成分の検証、さらには激しい時間変動の起源に迫った。

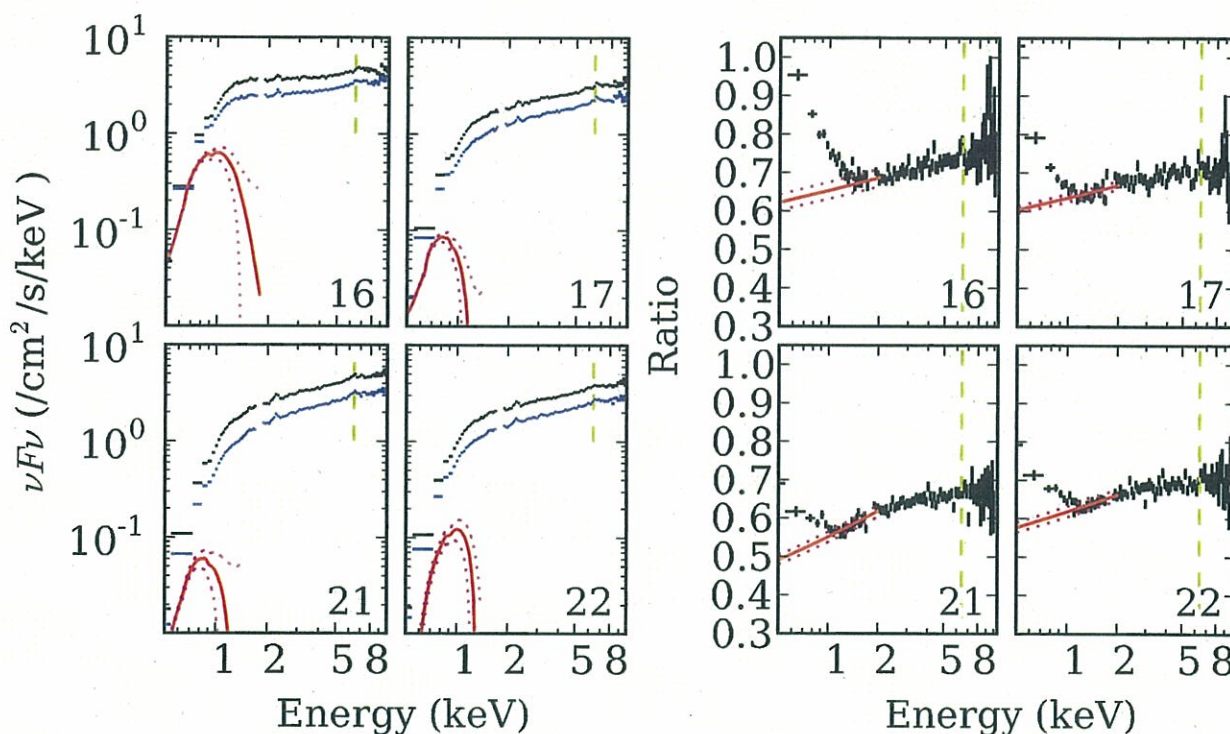


図2 (左) $\Delta t = 1-2$ 秒の強度判別分光で得られた High(黒)と Low(青)の νF_ν スペクトル。赤は抽出された円盤成分。(右) 左の High のスペクトルで、Low のスペクトルを割ったもの。

2 ソフトコンプトンと円盤放射

X線強度が弱かった第3観測 (2007年4月) の平均スペクトルを基準に、他の時期の広帯域スペクトルの比をとったもののうち、6つを図1(b)に示した。このように、約 10 keV 近くまでソフトな超過が見られ、その強度変動は $\sim 2-10$ 程度とひじょうに大きい。しかし、円盤からの放射は、図1 (左) からわかるように高々約 2 keV までである。よって、この軟 X線超過は、牧島他 (2008) が導入したソフトコンプトン成分であると考えられる。異なる時期のスペクトルを比較することで、スペクトルのモデリングに頼らず、この成分の存在の示唆を得た。

図2(左)は、強度判別分光法を用いて、 $\Delta t = 1-2$ 秒でXISのデータを平均より明るい時と暗い時に分けて集積したもの、図2(右)は暗い時のスペクトルを、明るいときのスペクトルで割ったものである。ここでは、25観測のうち、軟X線超過の強い4観測を選んで示した。この比をみると、 ~ 2 keV以下で再び顕著な軟X線超過が現れた。ただし、強度はたかだか2倍程度と、図1(右)にくらべるとはるかに弱く、スペクトルの形もずっと軟らかい。さらに図1(右)は、明/暗の比であるのに対し、図2(右)は逆の暗/明比にとってある。以上のことから、上で同定したソフトコンプトン成分とは別に、より軟らかい別の放射性分があり、1-2秒の時間スケールでソフトコンプトン強度が変動するのに対し、こちらは強度一定であることがわかった。

では、この $E < 2$ keVの成分は何であろうか？これを調べるため、図2(右)の比において、ピンク色の直線からはみでた成分が変動しない成分と仮定して抽出した成分を図2(左)にピンクで重ねてみた。これらは、図1(左)でモデルフィットから得られた円盤放射性分によく似た形をもつので、それらを円盤モデルで定量化を試みたところ、よく再現でき、得られたパラメータも物理的、経験的に円盤と考えて矛盾がないものであった。よって、直に見える円盤放射がスペクトル中に存在し、1-2秒の時間スケールで変動しないことも、モデルを用いて確認することができた。さらに軟X線フラックスが増加すると、ソフトコンプトンがより卓越するとともに、円盤の内縁半径がBHにより近づく兆候も得られた。

このようなソフトコンプトンは一体どのようにして明るくなっているのだろうか？コンプトン放射は y パラメータと種光子で表現される。図2(右)を見ると明るくなるとスペクトルがソフトになっている事がわかる。これは、 y パラメータが下がっている事を意味するため、コンプトン放射が明るくなるには、種光子が増えなくてはならない。種光子が増える場合には、明るくなるとじかに見える円盤放射が下がるため、明るいスペクトルを暗いスペクトルで割った場合には、円盤がまったく変動しないと仮定した場合よりも比がおおきくなる。このように考えると、図2(右)の16観測目に見える異常に高い比も、自然と解釈できる。よって、明るくなるとコンプトン雲が円盤を覆う立体角度が増え、種光子が増え、直に見える円盤放射がさがると考えられる。

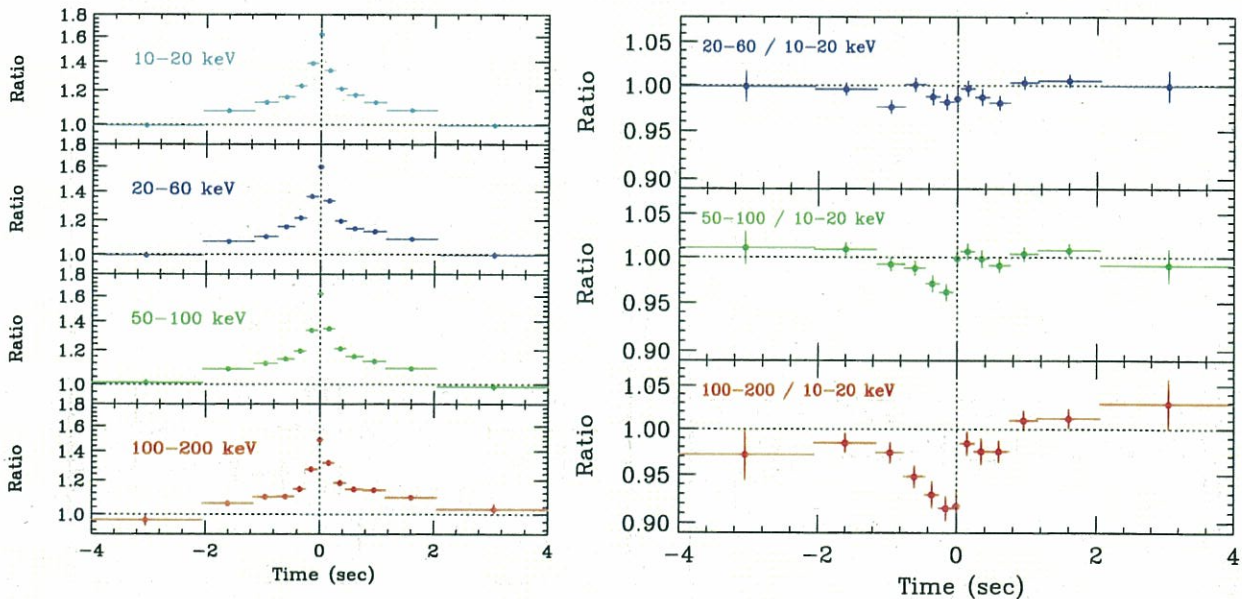


図3 「すざく」HXD-PINとGSOのショットプロファイル(左)、および、それらと10-20 keVとの比(右)。個々のショットの抽出は、XISデータを用いて行った。

3 ショット解析

「ぎんが」衛星の時代から根来ら (1995) によって詳細に研究されてきた「ショット解析」という手法がある。ある時間間隔の中で、最もカウントレートの高くなっている部分(ショット)のみを抽出して足し合わせるものである。彼らは Cyg X-1 が明るくなるさい、スペクトルは数十ミリ秒の時間スケールで徐々にソフトになり、ピークを過ぎると急激にスペクトルがハードに戻ることを見いだした。ただし、エネルギー帯域が $< 30 \text{ keV}$ と限られていたため、放射領域のどの物理量(コンプトン電子温度、光学的厚みなど)がどう変化しているか、特定するに至らなかったし、ショットを作り出す機構も不明のままであった。

そこで本研究で注目したのが、XIS のタイミングモード (Psum モード) である。このモードで XIS データを取得すれば、十分な統計と十分な時間分解能でショットプロファイルを構築でき、それに合わせて HXD のデータを重ね合わせることで、 $\sim 300 \text{ keV}$ までショット解析が可能になった。図 3(左)には、XIS で決定したショットのタイミングを元に抽出した、HXD の4バンドのショットプロファイル(縦軸はショットの外側の値で規格化している)。さらに、エネルギー帯域による違いを明確にするために、それらと $10\text{--}20 \text{ keV}$ との比を図 2 (右) に示す。このように、ショットプロファイルはほぼ左右対称であるにも関わらず、エネルギー帯域に依存した非対称性があり、とくに $100\text{--}200 \text{ keV}$ 帯域でそれが顕著になることがわかった。これは、根来らの結果を、より高エネルギーまで延長する結果である。

スペクトルの変化を見るために、ピークの前後 0.05 秒のスペクトルを抽出し、図 4(左) に示す。比較のため時間平均スペクトルを赤で示す。両者の比をとると、図 4(左) 下のように、ショットのピークにかけて、硬 X 線スペクトルが明らかに軟かくなりカットオフが下がっていることが判明した。さらに物理量の変化を追うため、ショットのフェーズごとにスペクトルを集結し、コンプトンモデルによる定量化を行った。その結果、図 4(右) に示すように、電子温度と y パラメータが徐々に下がり、光学的厚みが徐々に増加する事がわかった。牧島他 (2008) は電子温度、光学的厚みのどちらが変化しているかが分からなかったが、これにより、明るくなると、電子温度が下がり、光学的厚みが上がることがわかった。

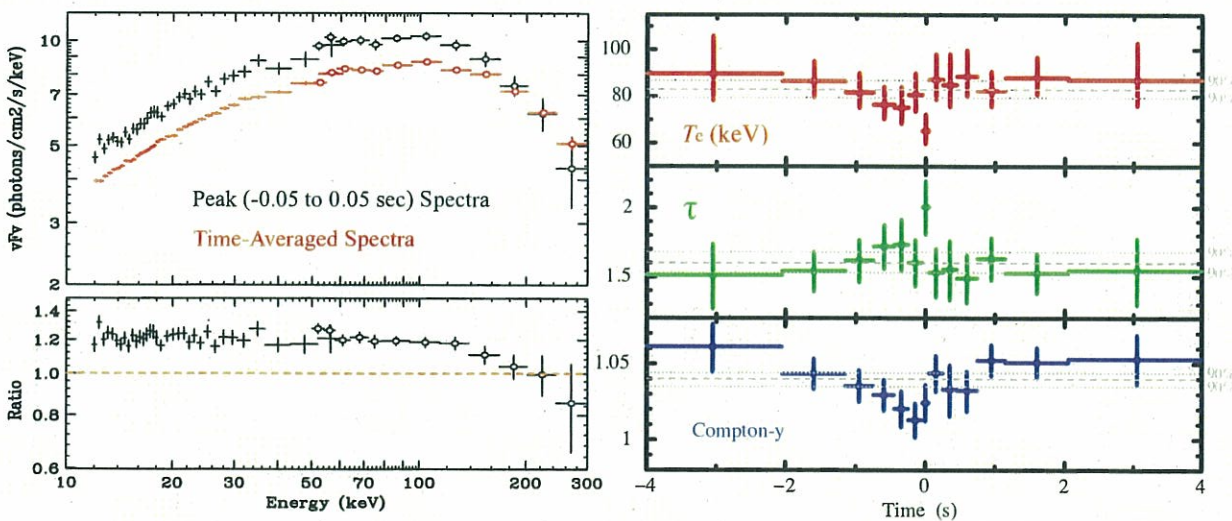


図 4 (左) ショットのピーク時 (-0.05 から 0.05 秒) のスペクトル (黒) と全観測時間の平均スペクトル (赤)、およびそれらの比 (下)。 (右) スペクトルフィットから得られたショットの進行に伴うコンプトンパラメータの変化。