

論文内容の要旨

Study of Hard X-ray Emission from Accreting Neutron Star Binaries

(質量降着を伴う中性子星連星系からの
硬 X 線放射の研究)

三谷 烈史

はじめに

低質量 X 線連星 (LMXB) は、全天でもっとも明るい X 線源として知られる。LMXB は中性子星やブラックホールと言ったコンパクト星と、太陽と同程度の質量をもつ恒星の近接連星系であり、重力の強いコンパクト星に、伴星からの質量が降着することで、 10^{37} erg/s から 10^{38} erg/s という極めて強い X 線を放射する。質量降着による X 線放射については特に 20 keV 以下の帯域ではこれまでも多くの研究がなされており、伴星から降着する物質の重力エネルギーが降着円盤からの多温度黒体放射と中性子星表面からの 2.5 keV 程度の黒体放射として放射されると考えられている。しかし、時に観測が報告されている ~ 100 keV まで延びるような放射はこの黒体放射では説明できず、他の物理過程が働いているはずである。これを解明するためには継続的に硬 X 線スペクトルの形を捉えることが必要不可欠である。しかし、これまでそのような観測は圧倒的に不足していた。

2004 年 11 月に軌道に投入された Swift 衛星 BAT 検出器は、一度に全天の 1/6 という非常に広い範囲を観測し、15–150 keV の硬 X 線領域でこれまでにない感度でスペクトルを取得することができる。我々は BAT を用いて、中性子星を含む LMXB のうち、放射圧と重力が釣り合うエディントン限界光度 L_{Edd} ($1.4M_{\odot}$ の中性子星の場合、 2.1×10^{38} ergs $^{-1}$) 付近で輝く『Z 天体』と、それより暗く $0.01 \sim 0.1L_{Edd}$ で輝く『Atoll 天体』について、1 年に及ぶ硬 X 線スペクトルを初めて系統的に解析した。これまでの研究から前者は 6 天体、後者は 17 天体がそれぞれ分類されており、本論文ではその全てについての結果をまとめた。

Swift 衛星 BAT 検出器の軌道上キャリブレーション

BAT を用いて、天体の放射スペクトルを正しく取得するためには、検出器で観測されたスペクトルから、有効面積などの特性を考慮して天体からの光子スペクトルを再構築する応答関数の検証が必須である。Swift 衛星 BAT 検出器は、3 万個ものテルル化亜鉛カドミウム (CZT) 半導体検出器を用いることにより広い視野を実現した。我々はその検出器応答の構築と評価を担当し、Swift の軌道投入後、約半年をかけて軌道上キャリブレーションを行った。

我々は、硬 X 線の標準天体であるカニ星雲の観測を行い、その結果を系統的に解析した。BAT で観測されたカニ星雲のスペクトルと、検出器の応答を用いた予想スペクトルを比較したところ、20 keV 以下と 80 keV 以上の一部を除いて数%の精度で一致することを示した。この過程で ADC チャンネル

とエネルギーの変換の見直しや、吸収体の見直しを行っている。これらに基づく改善では完全にカバーできない帯域は、補正項とシステムティックエラーを導入した。図1に現在用いられている検出器応答を用いて、BATの広い視野内の多数の点で取得したカニ星雲のスペクトルを評価した結果を示す。カニ星雲の放射モデル関数としてベキ関数 $F(E) = K \cdot E^{-\Gamma}$ を使い、ノーマリゼーション K と光子指数 Γ をフリーパラメータとして、検出されたスペクトルを検出器の応答関数を畳み込んだスペクトルで評価した。

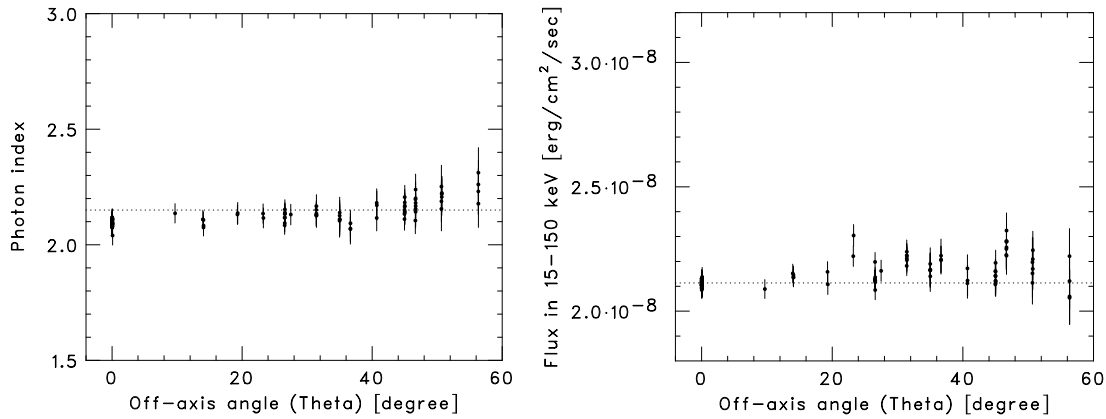


図1: BAT 視野内の様々な位置で観測されたカニ星雲のスペクトルをベキ関数 $F(E) = K \cdot E^{-\Gamma}$ でフィットした時の光子指数 (Γ , 左) とフラックス (右)。横軸はBATの主軸からの角度。

BATの主軸から40度以内であれば、光子指数は典型的に知られている2.15によく一致し、40度を超えるとずれていく傾向は見られるものの、10%以内に留まっている。また、フラックスはBATの視野全体で $\pm 8\%$ (peak-peak)の範囲で決めることが可能であることを示した。本論文の解析ではスペクトルの評価が重要であるため、現時点での応答関数で十分にスペクトル精度が得られる30度までの観測データのみを用いる。

BATによる中性子星LMXBの継続的な硬X線観測

Z天体において、近年に報告されるようになった100 keVまで延びるような硬X線放射について、その有無を確認し、かつ変動を捉えるために、現在知られている6つ全てのZ天体を解析した。その中で、地球までの距離が2.8 kpcと近く、抜きん出て明るい「さそり座X-1」(Sco X-1)の解析を詳細に行った。広い視野を持つBAT検出器を用いることにより、初めてLMXBの硬X線スペクトルを約一年間にわたってモニターすることが可能になった。Sco X-1について、計614 ksec、677観測を解析し全て足し合わせることで、硬X線放射が約100 keVまで折れ曲がらずベキ関数的に延びるスペクトルであることを初めて明確に検出した。さらに、この変動を追うために、2つのエネルギーバンド(16-20 keVと20-60 keV)のカウントレートを各観測で求め、両者の相関図(Intensity-Intensity diagram; IID)を作った(図2)。

BATがその優れた感度でほぼ定常的にモニタした結果、Sco X-1の硬X線の状態はきれいに2分岐を示しており、しかも、時間発展を追うと、変化はこのブランチに沿ってしか起こらないことを初めて観測的に示した。IID上で9つの領域に分け、それぞれで平均したスペクトルを作ると、図の領域1~4ではベキ関数的な放射が存在するが、領域5~9では、存在しない。さらに領域4から1にかけて黒体放射の大きさはほとんど変わらないにも関わらず、ベキ関数の強度が増加することを示した(図3)。領域4から5にうつると急激にベキ関数的な放射はなくなり、領域5から9のスペクトルはほぼ黒体放射で記述できる事が明らかになった。このように100 keVまで伸びるベキ関数的放射の変動を明確に捉えたのは初めてである。

次に他のZ天体についても同じIIDを作り分類を試みた。Sco X-1にくらべ暗いため、2分岐は明確でないものの、初めてIID上で観測データを分離することが可能となり、50 keV以上の放射が強い時と弱い時に分類できることを示した。

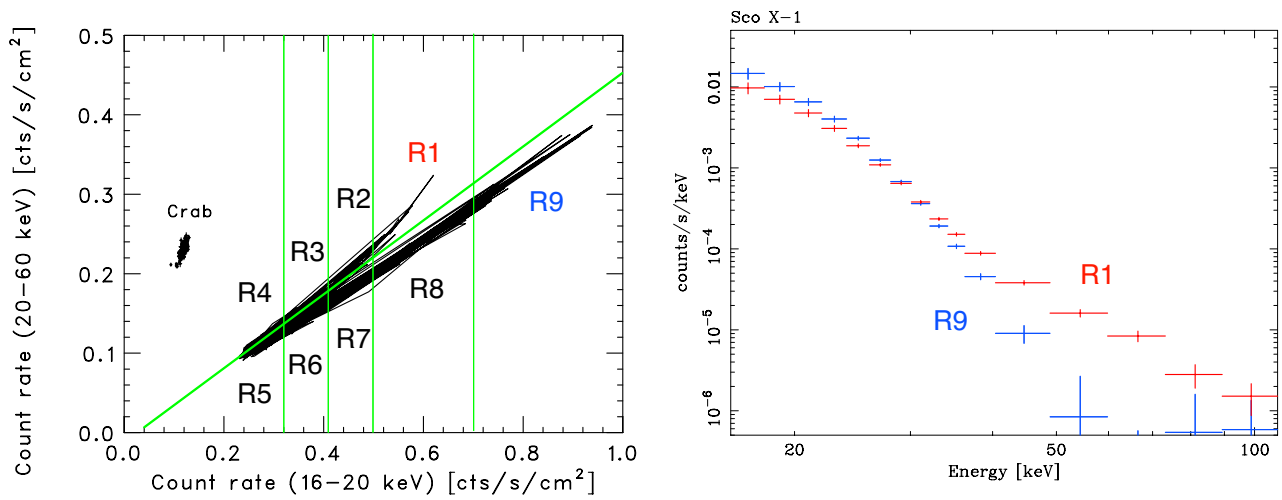


図 2: BAT 観測された Sco X-1 の Intensity-Intensity diagram(左) とハードブランチ上先端でのスペクトル(右; 赤)、ソフトブランチ上先端でのスペクトル(右; 黒)

Atoll 天体は Z 天体に比べ暗いが、ブラックホール連星で見られる状態変化に似たスペクトル変動を示す。これら 16 天体について、特に硬 X 線領域でのふるまいに焦点をしばった系統的な解析を行い、スペクトルの変動を捉えた。図 4 に 2 天体のライトカーブといくつかの状態のスペクトルを示す。比較のために *RXTE* 衛星全天 X 線モニター ASM 検出器で得られている、1.5–12 keV ライトカーブも同時に示した。この解析の結果、多くの天体において硬 X 線のライトカーブは X 線のそれと全く異なる挙動を示す時間帯があることがわかった。軟 X 線に大きな強度変動がなくても、硬 X 線の様子が大きく異なることがあり(図 4 右下)、このことは、BAT を用いた硬 X 線サーベイによって、LMXB の降着状態の遷移を明確に検出できることを示している。BAT を用いた硬 X 線観測は定常的にほぼ全天のデータが得られるため、LMXB の硬 X 線での変動に加え、そのスペクトルの詳細を系統的に評価できるのが特徴である。特に 4U1608-522 という天体において、*RXTE* 衛星 PCA 検出器と同時期の観測をあわせて評価することにより、単純なパワーローではなく、2 keV からべき 1.8 で続く放射が 90 keV 程度でカットオフされていることが示唆された。これは、観測された硬 X 線が、温度 20 keV ほどの高温の電子雲が何らかの軟 X 線をたたきあげることによる放射であると解釈される。

まとめ

本研究では、Swift 衛星 BAT 検出器の広い視野をいかした広域観測データを活用して、低質量 X 線連星 (LMXB) の解析を行った。「かに星雲」の観測データを用いた軌道上キャリブレーションによって検出器応答の精度を向上させた後、BAT 検出器のこれまでにない感度と優れた分光能力を活かして、中性子星を主星とする明るい低質量 X 線連星 (LMXB) について約 20 天体の硬 X 線スペクトルの変動を一年にわたって系統的に詳細にモニタした。これにより、100 keV までのびるべき関数状の硬 X 線が普遍的に存在すること、それらが LMXB の降着状態によって遷移することを示した。これはブラックホール候補星と同様に、中性子星においても、数 10keV 程度の高温電子あるいは加速された非熱的電子の存在によって説明される。

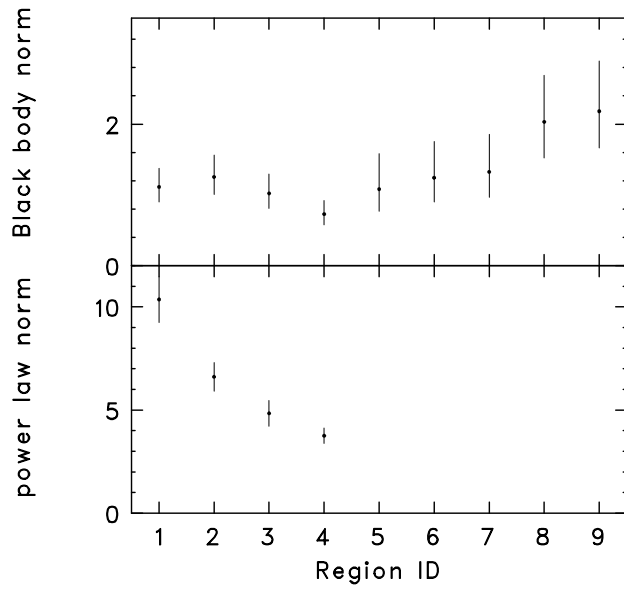


図 3: 各領域ごとのスペクトルをフィットした時の黒体放射の放射量の変化とベキ関数の大きさの変化。領域 5-9 では、ベキ関数を含まれない。

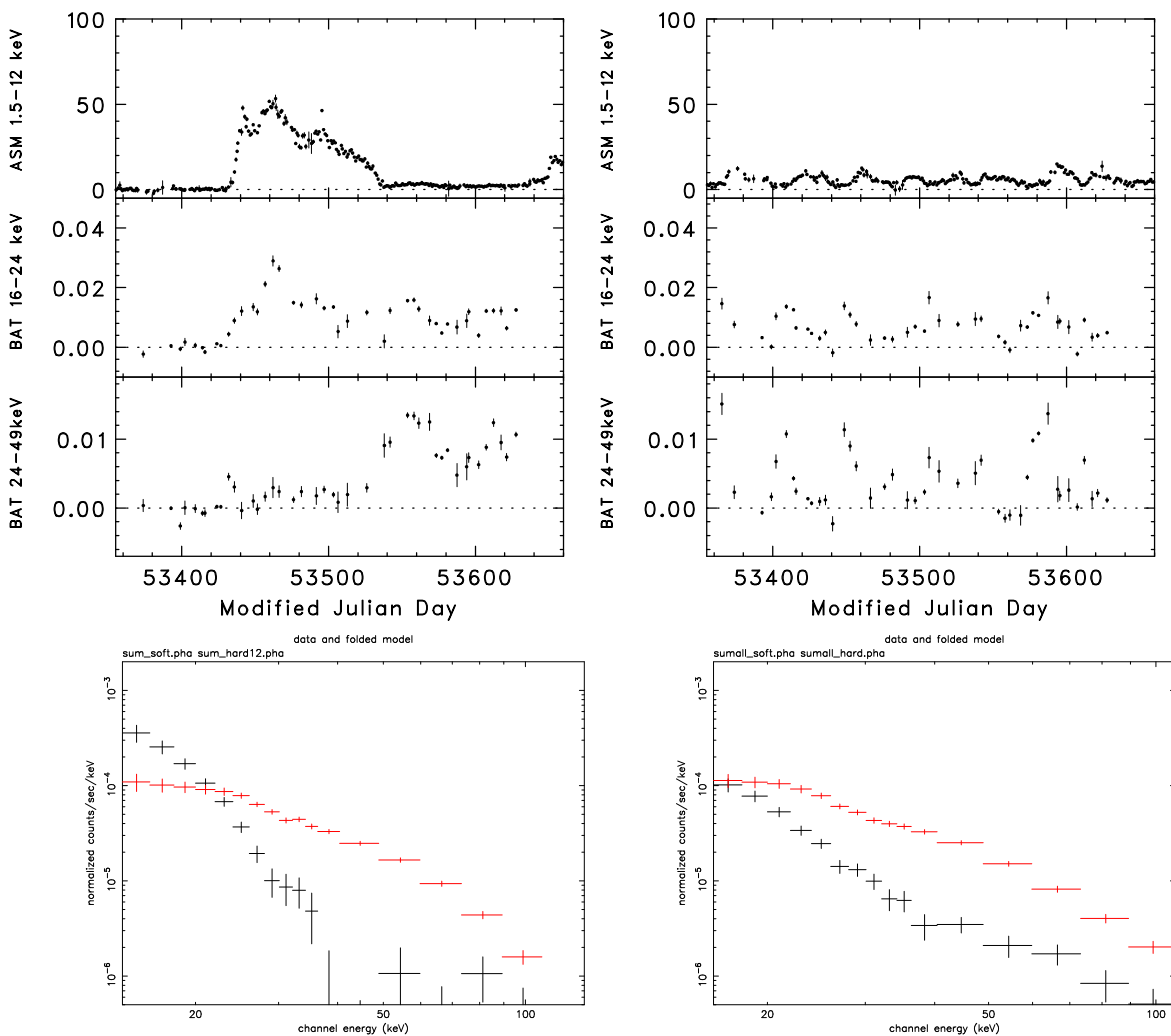


図 4: 4U1608-522、4U1636-536 のライトカーブ (それぞれ左上、右上) と 2つの状態のスペクトル (それぞれ左下、右下)。