

論文内容の要旨

論文題目： X-ray Study of Mass-Accretion Flows
onto Weakly-Magnetized Neutron Stars

(X線を用いた弱磁場中性子星への質量降着流の研究)

氏名 高橋 弘充

1 はじめに

我々の銀河系において、X線の波長でもっとも明るい天体はX線連星である。X線連星は恒星とコンパクト星（ブラックホール、中性子星、白色矮星）から構成され、恒星から放出された物質がコンパクト星に落ちる際に解放される重力エネルギーが放射エネルギー（おもにX線）に変換され輝いている。こうしたX線連星における重力エネルギーから放射エネルギーへの変換過程は、宇宙物理学における長年の研究対象となってきた。その中でも、質量降着率がきわめて高く、物質に働く放射圧が重力に匹敵しているような状況（エディントン限界）におけるX線連星の物理状態は、いまだ十分に解明されていない。とくに放射圧により、降着物質の一部が逆に吹き飛ばされる状況が予想されるものの、その観測的な定量化は、ほとんど手つかずである。

X線連星のエディントン限界に近い状態を研究するには、弱磁場中性子星と恒星の連星系（LMXB）が最適なターゲットである。中性子星の質量は $\sim 1.4M_{\odot}$ （太陽質量）であり、ブラックホールよりも約1桁小さく、相対的に低い質量降着率で放射圧が重力に拮抗しはじめる。またブラックホールでは物質がエネルギーを抱えたまま事象の地平線の彼方に消え去ることができるのに対し、中性子星は半径 ~ 10 kmの表面をもつため、物質は解放した重力エネルギーを放射せずには中性子星表面に降着することはできない。つまりLMXBでは、放射圧がより顕著に効くと期待されるのである。

LMXBの研究は1980年代から盛んに行われてきたが、その研究手法の多くは、X線フラックスとスペクトルの硬さの相関や時間変動といった現象論的なアプローチに終始していた。本研究ではそれらと一線を画し、日本のグループによって提唱され確立されてきたLMXBを記述する物理的モデル（欧米で提唱された別のモデルと対比して「東」モデルと呼ばれる; Mitsuda et al. 1984）を作業仮説として用いる。それを実測されたX線スペクトルと詳しく比較することで、放射圧が効いた状態でのLMXBの物理状態を明らかにするとともに、モデルの発展的な改良を行った。

2 研究手法

私は、これまでのX線観測衛星の中でもっとも多くLMXBを観測しているRXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) 衛星の公開データから、コンパクト星が中性子星であることが分かっている18天体を選び、利用できる全データの解析を行った。選んだデータの全観測回数は ~ 2500 回、個々の観測は典型的に数時間の継続時間を持ち、18天体を合わせた総観測時間は $\sim 1.26 \times 10^7$ 秒に達する。LMXBは質量降着率の変化に応じ、さまざまな時間スケール(数百秒 \sim 数年)でランダムに変動するが、本研究では、個々の観測期間の中での時間変動には注目せず、1つの観測から1つの平均スペクトル(3–30 keV)を求め、その定量化を行うことにした。スペクトルを定量化するさいには、理論的な放射モデルを装置の応答関数で畳み込んで予想データを作り、それを実測データと χ^2 検定で比べるという、この分野の標準的な手法を用いた。さらにモデルに依存しない解析として、スペクトル同士の差や比を求める手法も多用した。

3 データ解析と結果

3.1 質量降着率がエディントン限界以下

光度がエディントン限界($1.4M_{\odot}$ の中性子星の場合、 2.1×10^{38} erg s^{-1})より十分に低く、重力が支配的な状況では、図1の例のように、すべてのLMXBのエネルギースペクトルは低温と高温の2成分で再現された。低温成分は温度 ~ 1.5 keVの多温度黒体放射(MCD)モデルで合い、光学的に厚く幾何学的に薄い標準降着円盤からの放射と解釈できる。また高温成分は温度 ~ 2.5 keVの黒体放射(BB)であり、中性子星表面に降着した物質からの放射であると考えられる。このBB成分の温度は局所的なエディントン温度にほぼ一致し、またデータから求まるBBの表面積は、中性子星の全表面積の数分の1であることから、降着円盤が中性子星に接する赤道付近が帯状に光っていると考えられる。この結果は「東」モデルで提唱されている物理的描像と一致しており、これにより今までにない多数の天体の観測データから、「東」モデルの正当性を検証することができた。

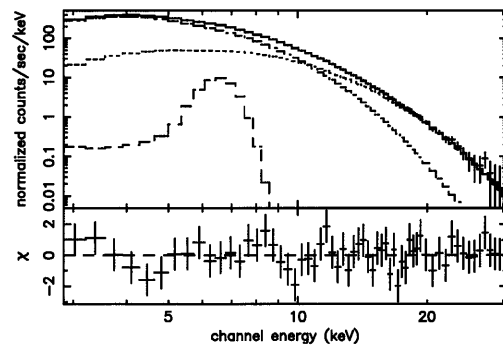


図1: (上) 光度がエディントン限界以下のときのエネルギースペクトルを「東」モデルで再現した例。天体は4U 1608-522、推定された全放射光度は 4×10^{37} erg s^{-1} で、MCD(降着円盤)とBB(中性子星表面)成分に加え、鉄イオンによる輝線の寄与も示してある。(下) 観測データとモデルとの残差。

LMXBの中には、光度がエディントン限界の数分の1でとどまるものもあり、他方でエディントン限界に近づくものもある。後者では質量降着率の増加につれ、スペクトルの低エネルギー側が大幅に増加するのに対し、高エネルギー側の変動は小さい(図2左)。これは、MCD成分の光度が質量降着率に比例して増加しているのに対し、BB成分は頭打ちになっているからである。この結果は、これまで降着

円盤を通して中性子星表面まで降着していた物質（図4上）が、放射圧が増加するにつれ、降着円盤の最内縁から落ちることができずに吹き出すようになるため（アウトフロー、図4中）と解釈できる。

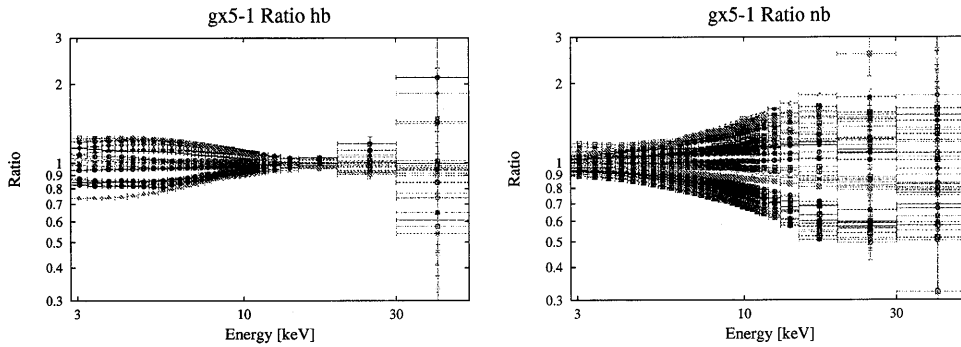


図 2: 平均スペクトルに対する 1 観測ごとのスペクトルの比。質量降着率がエディントン限界以下（左）とほぼ限界付近（右）の場合。天体はどちらも GX 5-1。

3.2 質量降着率がエディントン限界以上

質量降着率がエディントン限界の臨界値を越えるようになると、前とは逆に、高エネルギー側が激しく変動し（図2右）、さらにスペクトルは東モデルの2成分だけでは再現できないことが明らかになった。この原因を調べるため、質量降着率がエディントン限界付近のスペクトルと、その臨界値を越えた状態のスペクトルを比較すると、エネルギー ~ 7 keVの帯域に温度 ~ 1.5 keVのBB（BB1）で表される新たな成分（BB1）が出現していることが明らかになった（図3）。その結果、この状態のスペクトルには、前よりも温度の低い ~ 0.7 keVのMCDモデル（降着円盤）と ~ 2.5 keVのBBモデル（BB2、中性子星表面）というももとの2成分に加え、中間のエネルギー帯域に新たに検出されたBB1の3成分が存在することが分かった。さらに、天体間の比較から、降着円盤を上方から観測していると考えられる天体では2.5 keVのBB2成分が検出されるのに対し、円盤の水平方向から観測している天体では、この高温BBがスペクトルから消えさっていることを発見した。

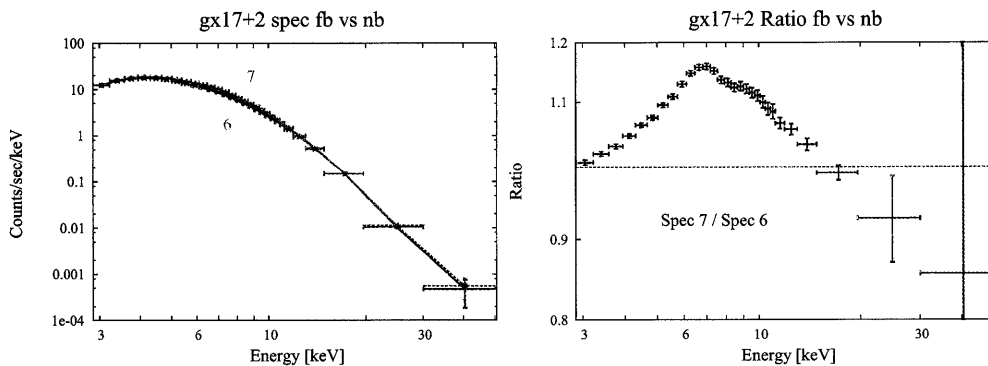


図 3: （左）質量降着率がエディントン限界付近の状態（緑、6）と、その臨界値を越えた状態（赤、7）のスペクトル。（右）そのスペクトル同士の比（7を6で割った結果）。これは降着円盤を上方から観測していると考えられている GX 17+2 の結果。

以上の観測結果を受け、エディントン限界を越え放射圧の影響が大きい状況では、LMXBは次のような物理状態にあると結論できる（図4下）。（1）降着円盤の最内縁は自身の放射圧によって膨れ上がり光学的に薄くなっている。MCD成分として観測される光学的に厚い領域の内縁は、半径の大きい、すなわち温度の低い場所に後退している。（2）円盤の膨れた領域から、一部の物質は球対称に近い形で中性子星表面に降着し、BB2成分を放射している。（3）残りの物質はアウトフローとして吹き出しており、その総量が多いためアウトフロー自身が光学的に厚くなり、BB1成分として観測される。（4）アウトフローが完全な球対称ではないため、中性子星表面（BB2成分）は円盤に平行な方向からだとBB1成分に隠されるが、円盤上方からは直接に観測することができる。

4 まとめ

本論文では、RXTE衛星の多天体かつ多数回におよぶ観測データを解析し、弱磁場中性子星（LMXB）における質量降着流の統一描像を構築することに世界で初めて成功した。この結果、質量降着率と降着円盤を見込む角度という2つのパラメータだけで、質量降着率がエディントン限界の臨界値の $\sim 1/10$ から数倍におよぶ広い範囲において、LMXBからのX線放射を説明することができるようになった。さらに、質量降着率が高い状態では、多量でかつ普遍的なアウトフローが存在することを確立し、その物理的な特徴も明らかにした。

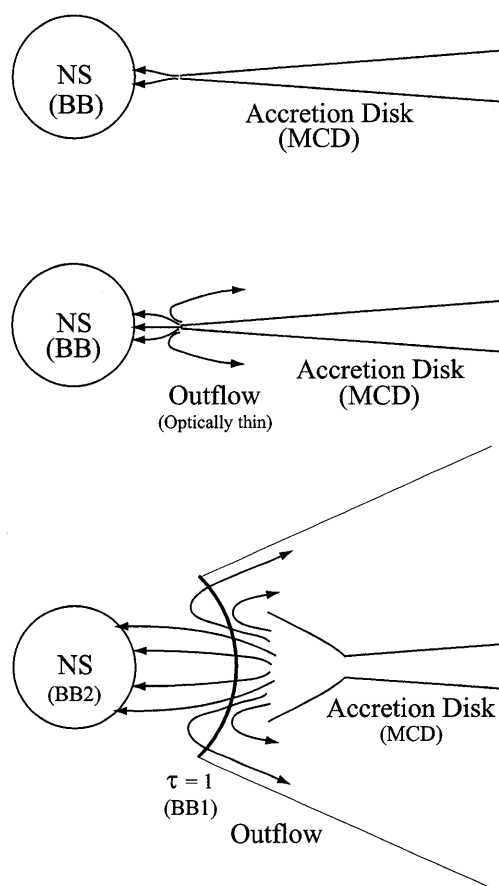


図 4: 弱磁場中性子星への質量降着流の模式図。質量降着率がエディントン限界より低い状態（上）、同程度な場合（中）、高い場合（下）。