

論文内容の要旨

論文題目: X-ray Study of Optically-thick Accretion Disks around Stellar Black Holes

(ブラックホール周りの光学的に厚い降着円盤の
X線を用いた研究)

氏名 久保田 あや

1 はじめに

X線観測の発展に伴い、ブラックホール (BH) が実際に存在することは今日、疑いのないものとなってきた。BH は物質を降着することによる重力エネルギーの解放で明るく輝いていると考えられるが、BH 周りの物理は重力半径 ($R_g = 2GM/c^2$; G は重力定数、 M は BH 質量、 c は光速) によって規格化されるため、その放射は BH 質量にあまりよらず X線領域にあらわれる。したがって、X線観測は BH 研究のもっとも有効な手段といえる。本論文では、伴星からの質量降着によって X線で明るく輝いている、BH 連星を扱う。

BH 連星は、ソフト状態とハード状態という二つの特徴的なスペクトル状態を示す。ハード状態ではベキ型の硬いスペクトルを示すのに対し、ソフト状態では弱いハードテイルを伴った 1 keV 程度のソフトな明るいスペクトルを特徴とする。過去 30 年にわたる研究により、ソフト状態のスペクトルは BH 周りに形成された光学的に厚い降着円盤からの多温度の黒体輻射の重ね合わせであることが示唆され、そのスペクトルは Shakura-Sunyaev (1973) による理論的な標準降着円盤の解に極めてよくあてはまることが多くの BH 連星において確認された。特に、観測で得られた降着円盤の最内縁の半径 R_{in} が、シュバルツシルト BH における最も内側の安定軌道 ($6R_g$) により一致をみせること、および明るさが一桁以上変化しても R_{in} が一定に保たれるという 2 点において、BH 連星に関する我々の理解が基本的に正しいことが証明されてきた。

2 論文の目的

このように、ソフト状態にある BH 連星の X 線スペクトルは、標準降着円盤で完全に理解できるように思われた。しかし最近、「あすか」衛星および RXTE 衛星によって、ある種の BH 連星は、標準降着円盤では理解できない挙動を示すこと観測されはじめた。観測の進歩とあい前後して、降着円盤に関するさまざまな理論が提唱され (Abramowicz et al. 1989, Narayan & Yi. 1995)、標準降着円盤は一定の条件下でのみ成り立つことが認識されるようになった。本論文の目的は、観測的技術が発達し、また理論的にさまざまな予測がなされている現在において、標準降着円盤がどこまで実際の BH 連星において成り立ち、どこで崩れるのか、また崩れるとするとその原因は何かを、明らかにすることにある。この目的のために、我々は「あすか」衛星搭載の GIS 検出器および、RXTE 衛星搭載の PCA 検出器を用いて、銀河系およびマゼラン雲に存在する 8 つの BH 連星 (Cyg X-1, LMC X-1, LMC X-3, GX 339-4, XTE J2012+381, GRS 1009-45, GRO J1655-40, and XTE J1550-564) のスペクトル解析を行なった。

3 標準降着円盤の成立とやぶれ

標準降着円盤は、降着物質の重力エネルギーが円盤中の粘性摩擦によって熱に変換され、それが効率良く輻射されるという理論的モデルであり、降着物質がもつ重力エネルギーの半分が放射される。したがって、この場合、観測されるスペクトルは円盤の内側の半径 R_{in} と温度 T_{in} で完全に記述することができる。図 1 に二つの代表的な BH 連星 (LMC X-3 と GRO J1655-40) について、得られた T_{in} と R_{in} (左)、および T_{in} と L_{disk} (右) の関係を示す。両者はともに同程度の BH 質量 ($6-7 M_{\odot}$) と軌道傾斜角 i をもつ BH であるのに、その振舞いはきわめて異なる。LMC X-3 は T_{in} の変化に関わらず R_{in} が一定に、しかもほぼ $6R_g$ ($6 M_{\odot}$ では 52 km) に一致していることがわかる。このとき L_{disk} は最大で $\sim 7 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ ($\sim 0.7-0.8 L_E$) まで達している (図 1 右)。これに対し GRO J1655-40 は $T_{in} < T_c \sim 1.2 \text{ keV}$ では R_{in} 一定が保たれ、標準的な振舞いを見せるが、その値は LMC X-3 の半分程度に留まっている。

さらに、GRO J1655-40 では T_{in} が 1.2 keV に近付くと、 $T_{in}-L_{disk}$ 上で L_{disk} が飽和する現象が見られるが、その値はこの天体のエディントン限界光度 L_E の $1/10-1/7$ に過ぎない。このときスペクトルにはハードテイルの急激な増加が見られ (図 2 上)、これに伴い T_{in} も R_{in} も大きく変動する (図 3 ●)。我々は、慎重なスペクトル解析を行なった結果、このハードテイルの増大が、急激なコンプトン散乱成分の増加によるものであること、コンプトン散乱体は電子温度 10 keV で光学的厚み 2 程度であること、それは光学的に厚い円盤をサンドイッチするように、空間的もしくは時間的に部分的にカバーしているということをつきとめた。コンプトン散乱の効果を補正すると、円盤の二つのパラメータ T_{in} と R_{in} は実際は極めて一定に保たれていることもわかった (図 2b、図 3 ○)。す

なわち、この状態は、標準降着円盤が破れはじめる現場であると考えられる。

さらに質量降着率 \dot{M} が上がり、 $L_{\text{disk}} > L_c$ ($T_{\text{in}} > T_c$) の段階に達すると、上記の散乱成分は消え、再び光学的に厚い円盤からの放射が卓越してくる。しかし、我々はこの段階では、円盤の放射効率が標準状態に比べ著しく低下していることを発見した。これは、 $T_{\text{in}}-L_{\text{disk}}$ 上において、温度に対する L_{disk} の飽和として観測される。このような状態に対して、温度の半径依存性を調べたところ、標準降着円盤にくらべて、円盤の内側における温度の上昇率の低下すなわち内側での放射効率の低下が見られた。これは理論で予測されるアドヴェクション冷却優勢の降着流の描像にきわめてよく一致する。

これらを総合することで、以下のように統一的描像を得た。すなわち、BH は各々に特有な臨界光度 L_c をもち、それ以下では標準降着円盤が精度よく成り立つ。 L_{disk} が L_c に近付くと、安定な標準降着円盤の解が破れはじめ、散乱成分に代表される、不安定性が見えはじめるが、光学的に厚い円盤自体は標準状態とほぼ同じ配置を保つ。さらに \dot{M} が上昇すると、散乱成分は消え、別の安定解に移行する。その安定解は標準状態に比べると輻射効率が悪く、アドヴェクションによる冷却が効いた状態と結論できる。

4 臨界光量と BH の回転

すでに述べたように、GRO J1655 – 40 などでは L_c は L_E に比べて、一桁近く低い。では、何が L_c を決めているのだろうか。LMC X-3 と GRO J1655 – 40 を比較すると、GRO J1655 – 40 で、標準状態が破れはじめる温度 T_c は LMC X-3 で観測された T_{in} の上限とほぼ等しいことから、 L_c の値そのものよりも、温度が標準円盤の安定性を決めると考える方が自然である。したがって、標準状態で GRO J1655 – 40 の R_{in} が LMC X-3 の値より小さいという事実が、前者における低い L_c の原因であると結論される。では、 R_{in} の違いは何に起因するのだろうか。これまではシュバルツシルト BH を考え、 $R_{\text{in}} = 6R_g$ としてきたが、実際にはさまざまな回転の BH があると考えの方が自然である。回転する BH まわりの順回転の降着円盤では、 R_{in} はより小さく（もっとも極端な場合は $1 R_g$ ）なり、したがって同じ光度でも、シュバルツシルト BH の場合に比べて T_{in} がより高くなる。このことから我々は、GRO J1655 – 40 など低い L_c で標準状態の破れを示す BH 連星は降着円盤に対し順方向に早い回転を持つカー BH であると結論した。

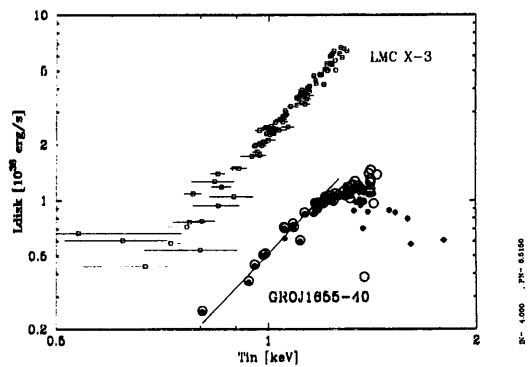
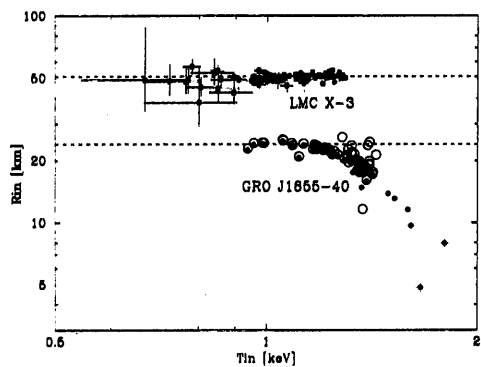


図 1: $\sim L_c$ における LMC X-3 (\square) と GRO J1655-40 (\bullet と \circ) T_{in} に対する R_{in} (左) L_{disk} (右) の関係。○はコンプトンの補正を加えたもの。

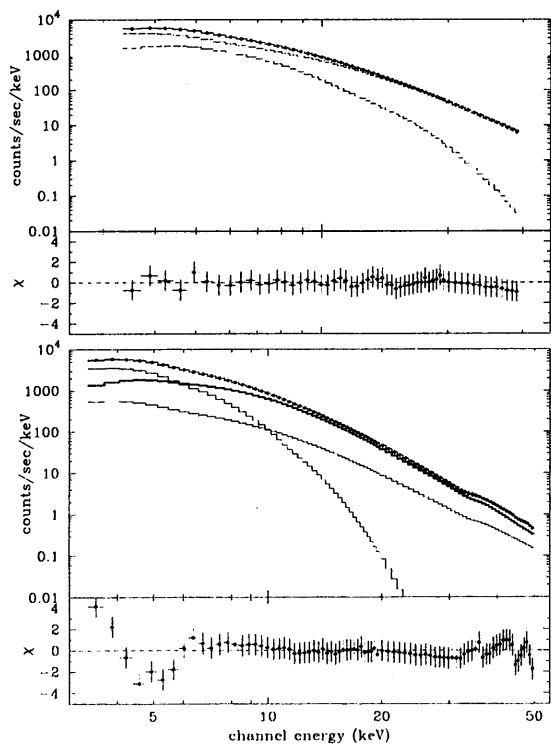


図 2: $\sim L_c$ における GRO J1655-40 のスペクトル。ハードテイル+MCD (上) とコンプトン成分を加えたもの (下)

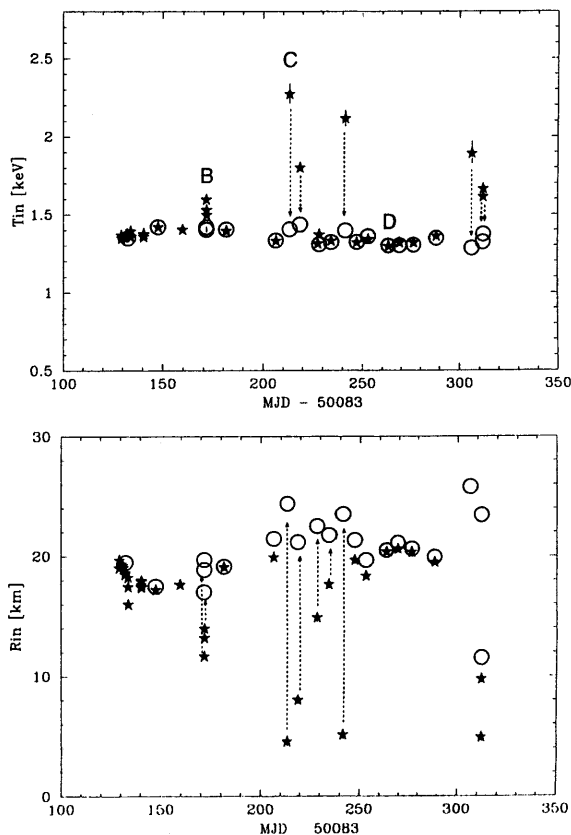


図 3: $\sim L_c$ における T_{in} (上) と R_{in} (下) の時間変化。★は図 2 の (上) に対応し、○は (下) に対応。