

中性子星とブラックホールの降着円盤の色温度-光度関係

Color temperature-luminosity relation of accretion disks in neutron stars and black holes

○高橋陽桜芽¹, 根来均²*Hyoga Takahashi¹ Hitoshi Negoro²

Abstract: Neutron stars and black holes both produce high-energy emission from their accretion disks through mass accretion. To compare the properties of their accretion disks, we analyzed observational data from Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) using a diskbb spectral model, which approximates accretion disk emission. The color temperature T_{in} derived from this model serves as an indicator of the disk's inner edge, and its relation to the luminosity L , representing the intrinsic radiative scale of the object, is expected to provide a clue to evaluate the difference of the objects. As a first step, we performed spectral fitting of Sco X-1, the brightest low-mass X-ray binary in the Galaxy, and derived its color temperature T_{in} and luminosity L .

1. 序

中性子星とブラックホールは、ともに質量降着によって、降着円盤から高エネルギー放射が生じる。降着円盤からの放射は、多温度黒体放射モデル (multi-color disk blackbody, diskbb) によって近似可能であり^[1], スペクトル解析を通じて、降着円盤内縁の色温度 T_{in} を得ることができる。一方で、色温度 T_{in} の値だけでは、降着円盤全体の放射を評価できない。そこで、その放射規模を表す光度 L と併せて評価することで、中性子星とブラックホールにおける降着円盤の性質を系統的に比較する。本研究では、まず第一段階として、全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)^[2] のデータを用いて、銀河系内で最も明るい LMXB (Low-Mass X-ray Binary) である Scorpius X-1 (Sco X-1) に、diskbb モデルを用いて、スペクトル解析を行った。今後、同様のフィッティングを他天体にも行うことで、色温度 T_{in} と光度 L の関係が、中性子星とブラックホールを区別する指標としての有効性を再検証する。

2. 低質量 X 線連星系 LMXB

X 線連星は、白色矮星、中性子星、ブラックホールといったコンパクト天体と、主系列星や赤色巨星などの伴星から構成され、伴星からコンパクト天体への質量降着によって X 線放射が生じる系である。コンパクト天体のうち、中性子星とブラックホールは、恒星の超新星爆発によって生じる天体であり、元の恒星質量が太陽質量の 8 から 30 倍の場合は中性子星、30 倍以上の場合はブラックホールになると考えられている^[3]。X 線連星系は、低質量 X 線連星系 LMXB と高質量 X 線連星系 HMXB に分かれ、伴星がおおよそ太陽質量かそれ以下

の場合は LMXB、それ以上の場合は、HMXB と分類される^[4]。

3. 多温度黒体放射モデル

降着円盤からの放射は、外側ほど低温で、内側ほど高温となる。そのため、単一温度の黒体放射でスペクトルフィッティングを行うことは適切ではなく、降着円盤を各半径に対応する黒体放射の重ね合わせで近似した多温度黒体放射モデル (diskbb) が一般に用いられる。本モデルでは、光学的に厚い降着円盤を前提とし、半径ごとの温度分布を次式で与え、黒体放射の重ね合わせを計算している^[1]。ここで、 T_{eff} は有効温度、 r は降着円盤の半径である。

$$T_{\text{eff}}(r) \propto r^{-3/4} \quad (1)$$

diskbb モデルの形状は、Fig 1 の紫の実線に示すように、様々な半径の黒体放射成分が重なり合うことで、単一の黒体放射とは異なり、滑らかなピークを示す。

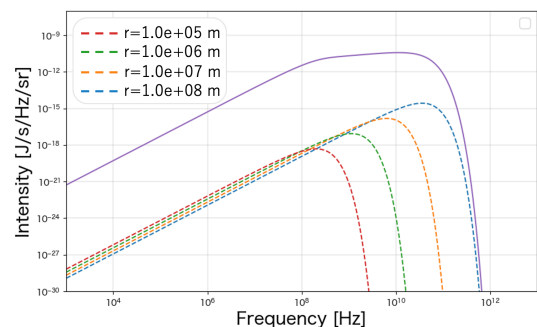


Figure 1. Comparison between blackbody components at each radius (dashed line) and the multi-color disk blackbody component (solid line)

4. 色温度と有効温度

本研究では、スペクトル解析から直接得られたフラックスを用いて光度を算出したが、有効温度 T_{eff} から光度を求める方法も存在する。有効温度とは、ある放射源から単位時間単位面積あたりの放射エネルギーを、周波数全体で積分したボロメトリックフラックス F_{bol} により、次式で定義される。ここで、 θ は放射面の法線と光線の放射方向がなす角、 I_ν は放射強度である [5]。

$$F_{\text{bol}} = \int \cos \theta I_\nu d\nu d\Omega \equiv \sigma T_{\text{eff}}^4 \quad (2)$$

有効温度 T_{eff} と色温度 T_{in} の関係式は、spectral hardening factor f を用いて、次式で表すことができる [6]。

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{\text{in}}}{f} \quad (3)$$

5. フィッティング

MAXI の on-demand [7] を用いて、2025 年 9 月 1 日から 2025 年 9 月 3 日にかけて、Sco X-1 のデータを取得した。

光度 L の計算では次式を用いた。

$$L = 4\pi d^2 F \quad (4)$$

ここで、 d は天体までの距離、 F は 2-20 keV における単位時間単位面積あたりの観測された放射エネルギーである。一般に、光度の算出ではボロメトリックフラックスが用いられるが、MAXI/GSC のエネルギー帯域は、2-20 keV であるため、今回の調査で用いたフラックス F は、2-20 keV のエネルギー帯域に限られる。今回、天体までの距離 d は、 $d = 2.8 \pm 0.3$ kpc を用いた [8]。

また、解析の際には、降着円盤由来の diskbb 成分 (diskbb)、中性子星表面由来の 2 keV 黒体放射成分 (bbody) [1]、および星間物質による X 線吸収 (tbabs) を考慮してフィッティングを行った (Fig 2) [9]。その後、diskbb 成分のみを抽出し、フラックスを算出した (Table 1)。なお、tbabs の水素カラム密度 N_{H} は、本解析において有意に決定されなかった。

Table 1. Color temperature T_{in} and the 2–20 keV luminosity L of Sco X-1

Source	T_{in} (keV)	L (10^{38} erg/s)
Sco X-1	2.21 ± 0.08	2.57 ± 0.56

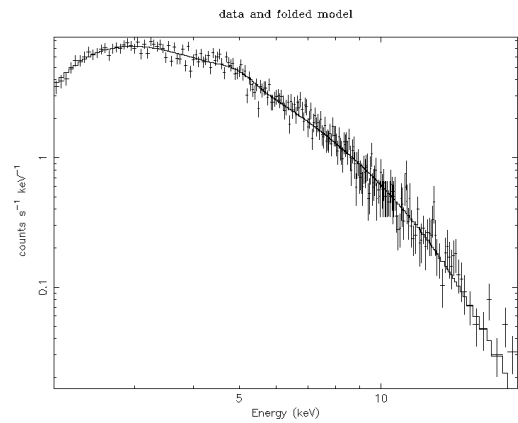


Figure 2. Spectral fitting of Sco X-1 with the model tbabs * (diskbb + bbody)

6. 今後の課題

今回の調査では、diskbb モデルを Sco X-1 のみに適用したが、MAXI の過去データに含まれる他の天体を解析対象に加えることで、中性子星とブラックホールを区別する指標となり得る色温度 T_{in} の閾値について、より汎用的な考察を進める。

参考文献

- [1] Mitsuda, K., et al., 1984, PASJ, 36, 741
- [2] Matsuoka, M. et al., 2009, PASJ, 61, 999
- [3] 福江純, 他, 「輝くブラックホール降着円盤 降着円盤の観測と理論」, プレアデス出版, 2007
- [4] 福江純, 他, 「超・宇宙を解く 現代天文学演習」, 恒星社厚生閣, 2014
- [5] Rybicki, G. B., & Lightman, A. P., "Radiative Processes in Astrophysics", John Wiley & Sons, Inc, 1979
- [6] Shimura, T., & Takahara, F., 1995, ApJ, 445, 780
- [7] MAXI on-demand process <https://maxi.riken.jp/mxondem/>
- [8] Bradshaw, C. F., Fomalont, E. B., & Geldzahler, B. J., 1999, ApJ, 512, L121
- [9] Wilms, J., Allen, A., & McCray, R., 2000, ApJ, 542, 914