

「すざく」で観測した降着型天体における熱的コンプトン過程の系統的解析

牧島一夫(東大理/理研), Zhongli Zhang, 野田博文, 鳥井俊輔, 櫻井壮希,
小林翔梧, 小野光, 中澤知洋(東大理), 杉崎睦, 山田真也(理研)



SSS14 P3-4

§1. はじめに：熱的コンプトン散乱 (ThCS) 過程

- ❖ 降着する中性子星(NS)やブラックホール(BH)では、降着流の加熱で発生する温度 T_e の軟光子が、温度 T_e の「高温電子雲」で散乱され高エネルギーを獲得する、熱的コンプトン散乱 (ThCS) 過程が広く見られる。
- ❖ ThCSは主に y パラメータ ($y \equiv 4kT_e/m_e c^2 \times$ 光子散乱回数) で特徴づけられる。 y が大ほど、図1(a)のように、ThCSのスペクトルは硬化。
- ❖ しかし同じ $y \sim 1.5$ でも図1(b)と(c)のように、 T_e や光学の厚み τ は大きく異なる場合がある $\Rightarrow y$ 以外にもパラメータが必要では？
- ❖ 電子雲の T_e は、イオンからの加熱と軟光子による冷却の釣り合いで決まる $\Rightarrow$ この釣り合いを表す温度比 $Q \equiv T_e/T_s$ が、もう一つのパラメータになると着想。

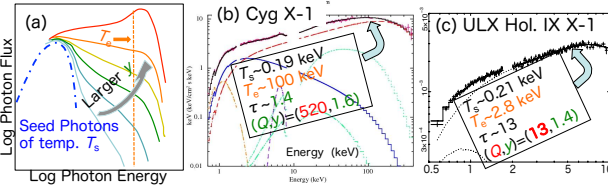


図1：(a) ThCS過程の模式図。(b) 「すざく」で得たBH連星 Cyg X-1のLow/Hard状態のスペクトル^[1]。Hard ThCS成分のモデルにはCompPSを使用。(c) 「すざく」によるULX Hol IX X-1のスペクトルを、円盤放射+ThCS (nthCompコード)でフィットしたもの^[2]。

§2. 考察した天体の種別

主に「すざく」で観測された降着型天体のうち、ThCSの見られる以下の天体を考察した。xspectにおけるThCSの計算コードとしては、 $T_e > 30$ keVかつ $\tau < 3$ の場合は高温に適したCompPS、 $T_e < 30$ keVでは大きな τ を扱えるnthCompを使用。

- (1) Low/Hard状態のBH連星：Cyg X-1^[1](図1)。軟光子源は円盤を仮定し、0.7-300 keVスペクトルを、「円盤放射+ハードThCS+ソフトThCS+反射」でモデル化。
- (2) Very High状態のBH連星：GX 339-4^[3], XTE J1550-563^[4], GRO J1655-40^[5]。軟光子源は円盤放射を仮定するが、スペクトルのモデル化は簡単ではない。
- (3) High/Soft状態のLMXB (低質量星とNSの連星)：Aql X-1^[6,7], MAXI J0556-332^[8], および dipping 天体 4U 1916-053^[9]。ほぼ1-30 keV帯域のスペクトルを、ソフトな円盤放射と、ThCSされた $\tau \sim 10$ の黒体放射(NS表面からと仮定)で表現^[6]。
- (4) Low/Hard状態のLMXB: Aql X-1^[6,7], GS 1826-238^[10], 4U 1636-53^[11], 4U 1705-44^[11], 4U 1812-12^[11], および2つの dipping 天体 XB 1323-619, EXO 0748-676^[9]。モデルは(3)と同じだが T_e が高く τ が低い。使用帯域は1-100 keV。
- (5) Power-Law型のULX天体: Hol IX X-1^[2] および NGC 1313 X-1^[12,2]。0.5-10 keVスペクトルを、低温 ($T_e \sim 0.2$ keV) 円盤とそのThCS ($\tau \sim 10$) で表現。
- (6) 円盤放射的な状態のULX天体: NGC 1313 X-1^[12,2] および M33 X-8^[2]。スペクトルは多くの場合 Slim Disk で再現されるが、ここでは(5)と同じモデルを援用。
- (7) I型Seyfert銀河の soft excess成分: Mkn 509^[13]。 $T_s \sim 0.02$ keV, $T_e \sim 0.5$ keV, $\tau \sim 17$ と、低温で濃密なコロナによるThCS。

§3. 予備的な調査

- ❖ 図2(a)は§2で挙げた全天体につき、 τ と T_e の相関をとったもの。全体的に $y \sim 1$ に近く分布することがわかる。
- ❖ 図2(b)は同様に、 y と T_e の相関を示す。何やら規則性がありそうに見えるが、明瞭ではない。

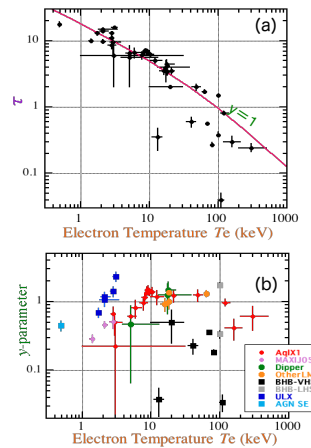
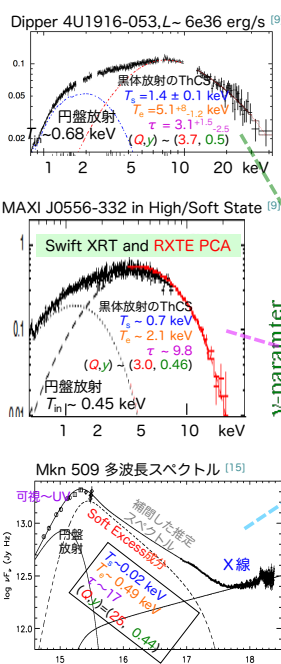


図2：(a) 調べた天体の τ と T_e の相関。赤い曲線は $y=1$ を示す。(b) 同じく y と T_e の相関。天体の種別を色で分けてある。

§4. (Q, y) ダイアグラム



- ❖ そこで Q と y の関係をプロットすると図3の結果を得た。特記のないデータは「すざく」のもの。
- ❖ T_e と T_s が近い場合を含めるため、 y パラメータは、 $y \equiv 4k(T_e - T_s)\tau(1 + \tau/3)/m_e c^2$ として計算。

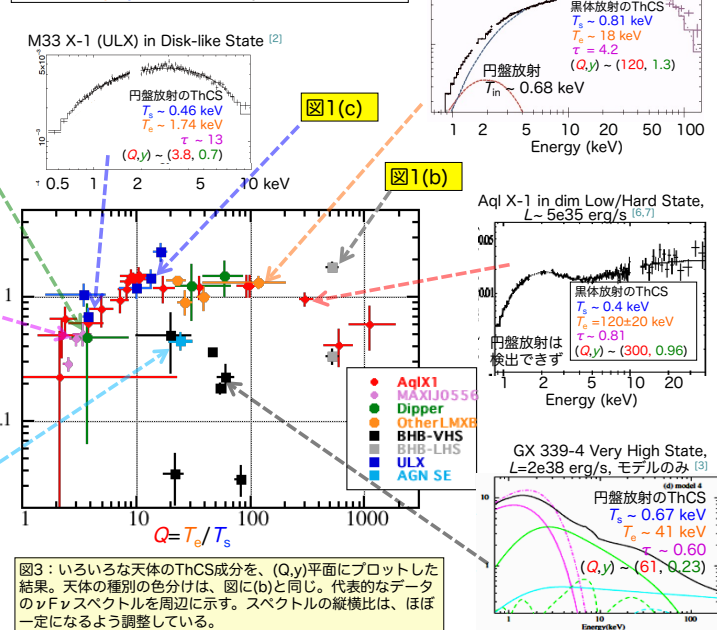


図3：いろいろな天体のThCS成分を、(Q, y)平面にプロットした結果。天体の種別の色分けは、図に(b)と同じ。代表的なデータのy-fspectrumを周辺に示す。スペクトルの縦横比は、ほぼ一定になるよう調整している。

§5. 考察と結論

新たに導入した (Q, y) プロットはひじょうに効果的で、様々な天体におけるThCS過程を系統的に調べることが可能にしてくれた。

- (1) 驚くべきことに10個近いLMXB(丸印)は、Dippersも含めて、ほぼ共通な1つの滑らかな曲線に沿って分布する。すなわち質量降着率を唯一のパラメータとする、one-parameter family である。図2(b)と比べると、 Q という物理量の有用さが明らか。
- (2) その曲線上で $Q \sim 7$ を境に、右側がLow/Hard状態、左側がHigh/Soft状態である。すなわち Q は状態の判別指数として絶好。Low/Hard状態の電子雲ではイオンによる加熱が強く効くのに対し、High/Soft状態では τ が大きく、光子冷却が強い。
- (3) LMXBが2つの状態の間を遷移するさい (Aql X-1のデータ点を参照)、プロット上を時間的に左右にきわめて短時間で動くが、 y の値はほぼ連続的に滑らかにつながり、不連続な飛びを示さない。「1次の相転移」(状態変数が温度の関数として不連続に飛び)ではなく「2次の相転移」(状態変数の温度微分が不連続になる)と言えるかも。
- (4) 円盤をほぼ真横から見ているDipperと、それ以外のLMXBの間には、コロナの異方性を反映した違いが期待されるが、まだ計測誤差が大きく、有意な結論は出せない。
- (5) LMXBに比べ、BH天体 (BH連星、ULX、AGNのsoft excess) は、明らかに2次元に散らばる。これは質量降着率 (および傾斜角) に加え、BH質量や、降着物質の放射効率など、独立なパラメータがあるためであろう。LMXBでは、ジェットやアウトフローを無視すれば、放射効率はつねに ~ 1 である。
- (6) Very High StateのBH連星とPL型のULXは、ともに $10 < Q < 100$ という、中間的な Q の領域に現れる。両者の間に関係があるかもしれない^[14]。

§6. 今後の課題と展望

- (1) 図3に載せる天体の例数を増やすこと。
- (2) 熱的コンプトンの計算コードによる結果の違いを慎重に検討すること。
- (3) Dipping LMXBのデータをより精密に解析し、通常LMXBとの差異を探すこと。
- (4) Aql X-1の状態遷移中の貴重な「すざく」データ^[15]を、詳しく調べること。
- (5) Very High StateのBH連星のデータは、スペクトルのモデルを吟味すること。
- (6) 理論の専門家の協力を得て、理論的な解釈を展開すること。
- (7) ASTRO-Hに向けての戦略を練ること。

【参考文献】

- [1] (Cyg X-1) Makishima, K., Takahashi, H., Yamada, S., Done, C. et al., PASJ **60**, 585 (2008).
- [2] (ULX) 小林翔梧ほか、日本天文学会 2013春J60a, 同2014秋 J147a; paper in preparation.
- [3] (GX339-4) Tamura, M., Kubota, A., Yamada, S., Done, C. et al., ApJ **753**, id 65 (2012).
- [4] (XTE J1550-563) Kubota, A. & Makishima, K. ApJ **601**, 428 (2004).
- [5] (GRO J1655-40) Kobayashi, M., Kubota, A., Nakazawa, K. et al. PASJ **55**, 273 (2003).
- [6] (Aql X-1 Paper1) Sakurai, S., Yamada, S., Torii, S., Noda, H. et al. PASJ **64**, id 72 (2012).
- [7] (Aql X-1 Paper2) Sakurai, S., Torii, S., Noda, H., Zhang, Z., Ono, K. et al. PASJ in press (2014).
- [8] (MAXI J0556-332) Sugizaki, M., Yamaoka, K., Matsuoka, et al. PASJ **65**, id 58 (2013).
- [9] (dippers) Z. Zhongli ほか、日本天文学会 2013秋J119a; paper in preparation.
- [10] (GS 1826-238) 小野光ほか、日本天文学会 2013秋J117a; paper in preparation.
- [11] (Other LMXBs) 櫻井壮希による、今回の発表のための解析結果。
- [12] (NGC 1313 X1) 小林翔梧による、今回の発表のための解析結果。
- [13] (Mkn 509) Noda, M., Makishima, K., Yamada, S., Torii, S. et al. PASJ **63**, SP3, S925 (2011).
- [14] および Mehdiour, M., Branduardi-Raymont, G., Kaastra, J. S. et al. A&A **534**, id.A39 (2011).
- [15] (ULX & VHS) Makishima, K., in "Black Holes from Stars to Galaxies - Across the Range of Masses", Ed. V. Karas and G. Matt. Proc. IAU Symposium #238, Cambridge University Press, pp.209 (2007).
- [16] (Aql X-1 transition) P.山岡和貴氏の「すざく」公開データを、櫻井壮希がウィックに解析した結果。