

論文の内容の要旨

X-ray Spectral Studies with *Suzaku* of Hot Flows Accreting onto Weakly-Magnetized Neutron Stars (「*すざく*」の X 線分光を用いた弱磁場中性子星への 高温降着流の研究)

小野 光

1 背景-弱磁場中性子星連星の降着流-

Low-Mass X-ray Binary (LMXB) は、低質量星 ($<1 M_{\odot}$) から弱磁場 ($<10^9$ G) 中性子星にガスが降着することで、質量エネルギーの約 20%にも達する重力エネルギーを、主に X 線として放射する近接連星系である。中性子星は、半径 (~ 12 km) と質量 ($\sim 1.4 M_{\odot}$) がよく揃い、したがって重力場も天体によらないため、強重力場での高温プラズマの振る舞いを理解する上で絶好の実験室となる。

LMXB の質量降着率、すなわち光度が高い ($>10^{36}$ erg s^{-1}) ときには主に <10 keV 程度の軟 X 線を、それより暗いときには ~ 100 keV に達する硬 X 線を主に放射し、それぞれソフト状態、ハード状態と呼ばれる。広帯域を誇る日本の「*すざく*」衛星により、近年、両状態のスペクトルがともに、(I) 光学的に厚く幾何学的に薄い標準降着円盤 (Shakura&Sunyaev 1986) からの多温度黒体放射と、(II) 中性子星表面の黒体放射が光学的に薄く幾何学的に厚い高温降着流 (コロ

ナ)に逆コンプトン散乱された成分、の2つで説明されることがわかってきた (Sakurai 2015)。ソフト状態では(I)が強く(II)のコンプトン化が弱いのに対し、ハード状態では(I)が弱まり、かつ(II)のコンプトン化が強まる、という描像である。しかしながら、この統一描像は主に単一の天体に依存しており、加えて、コロナの密度、速度場、形状などの理解は不十分であった。

2 本研究の方針

特にコロナを理解するためには、コンプトン散乱の強度などが大きく変わると考えられる、二状態の間を遷移中のデータ、もしくはその付近のデータが有用である。そこで本研究では、「すざく」衛星がその10年のミッションで蓄積したアーカイブデータの中から LMXB の観測を総ざらいした結果、幸運にも遷移の時間 (~20 ksec の継続)を捉えたデータを1つ、その付近のデータを2つ、両状態で観測された天体のデータを16個選ぶことができた。これら合計19データに含まれる LMXB は全部で5天体で、1つの観測は典型的に6時間から1日ほどである。図1は遷移を含むデータから時間を区切って作られた一連のスペクトルで、10 keV 以下は X 線 CCD カメラ (XIS)、15 keV 以上は硬 X 線検出器 (HXD)で測定された。ハード状態からソフト状態への遷移が見事に捉えられている。

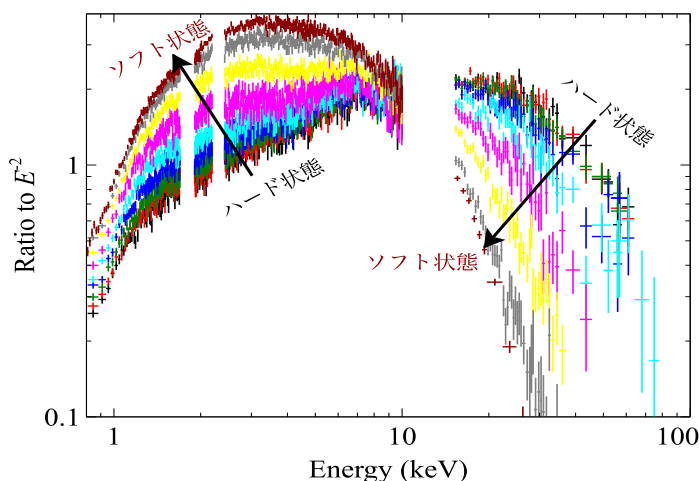


図1 検出器のレスポンスを解いた、Aql X-1の状態遷移中のスペクトル。ハード状態から順番に、黒、赤からグレー、茶色で示す。

3 解析と結果

図1と同様なスペクトルを定量解析した結果、どの天体のどのデータも(I)と(II)で説明され、注目する光度範囲 (10^{36} - 10^{38} erg s^{-1})の全体で、このモデルが物理的に妥当であることがわかった。ソフト状態では円盤の光度 L_{MCD} が強いのに対し、ハード状態ではコロナから散乱を通して黒体光子に渡されたエネルギー L_{comp} が卓越し、しかも、状態遷移の付近で両者が急激に入れ替わっており、理論的に知られている、降着流の双安定性が明確に捉えられた。

二状態間のスペクトルの変化をより統一的に定量化するために、距離などの

不定性によらない無次元パラメータ $Q = T_e / T_{\text{BB}}$ (Makishima 2016) を導入した。ここに T_e はコロナの電子温度、 T_{BB} は黒体温度である。そして観測から得られたスペクトルの諸量を Q に対してプロットしたところ、図 2 の例のように、 L_t に対するプロットでは天体の違いに応じて散乱していたデータ点が、共通の曲線の上にきれいに揃った。一方で、いくつかの天体はもう一つ、別のグループを作った。これらの違いは、 L_t が上がる時 (図 2 マゼンタ) と下がる時 (図 2 シアン) のデータに対応しており、光度変化の方向によってスペクトル状態が異なるヒステリシス効果と考えられる。従来、そうした効果の存在は知られていたが、その統一的な研究はなされていなかった。

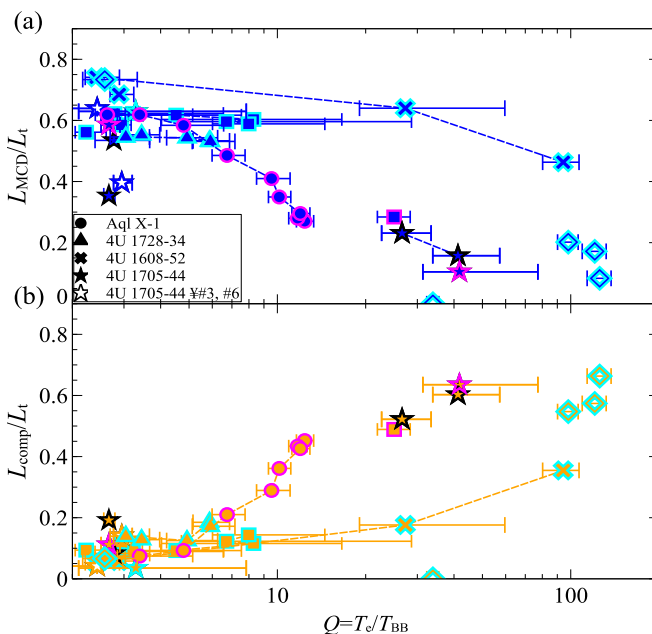


図 2 (a) 円盤放射光度(青)、(b)コンプトン散乱で与えられたエネルギー (オレンジ)。全光度が増加した時のデータをマゼンタ、減少したときのデータをシアンの色で示す。

4 解釈と考察

観測された黒体半径 R_{BB} と黒体温度 T_{BB} を図 3 にプロットすると、全観測の結果が 1 つの長方形のループを形成することがわかった。光度が大きく変化する時、いずれの LMXB もこのループに沿って、2 つの状態の間を移り変わることで、また光度上昇時と下降時のヒステリシスにより経路が異なるため、ループが生じることも明らかになった。

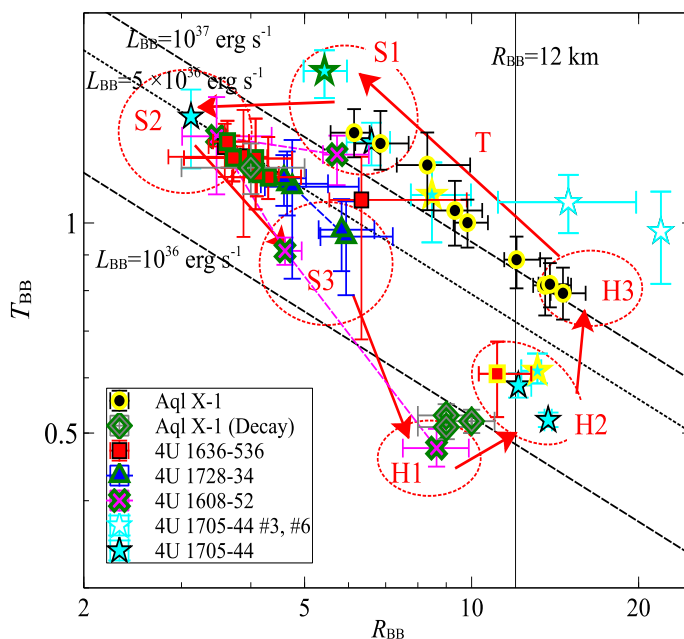


図 3 T_{BB} vs R_{BB} 。全光度が上昇したデータを黄色、減少したデータを緑の色で示す (左)。H はハード状態、S はソフト状態を表す。

図3などからは、降着率の増減に伴う降着流の変化は図4のように起きると推測される。まず、H3では円盤が比較的遠くで途切れ、コロナが発達し、中性子星にほぼ球対称に降着するため、 $R_{BB} \sim 12$ kmとなる。光度が増加すると円盤が中性子星に近づき、黒体放射はやや赤道面に偏る(S1)。次に光度が減少し始めると、降着は更に赤道面に局在化する($R_{BB} \sim 4$ km; S2)。光度が減少するに従って円盤は中性子星から離れ、H1、H2、H3と R_{BB} は ~ 12 kmまで増加する。

コロナの光学的厚みや質量降着率などから計算すると、コロナは幾何学的に膨らんでいること、そして、コロナの落下速度が自由落下速度の $\sim 10\%$ 程度と低いことがわかった。したがって、ショックなどによってコロナの回転や落下運動の大部分がイオンの加熱に使われ、その結果、落下速度が小さくなり、コロナが膨らむと考えられる。

ハード状態では $\tau < 1$ 程度と小さく、確かに従来の理解どおり、光学的に薄いことがわかった。さらに観測から得られたコロナ密度は全データを通して $\sim 10^{18}$ cm^{-3} 程度と低く、コロナ自体の emissivity は低く、逆コンプトン散乱のみが支配的に起きていることがわかった。したがって自らの放射冷却が効かず、比較的に光学的に薄く、幾何学的に厚く、高温の状態を保ち、コロナとして無矛盾に理解できることがわかった。

さらに、どの天体でも黒体放射光度が予想よりも少なかったことから、降着エネルギーの約10%が中性子星のスピナップに使われている可能性も明らかになった。

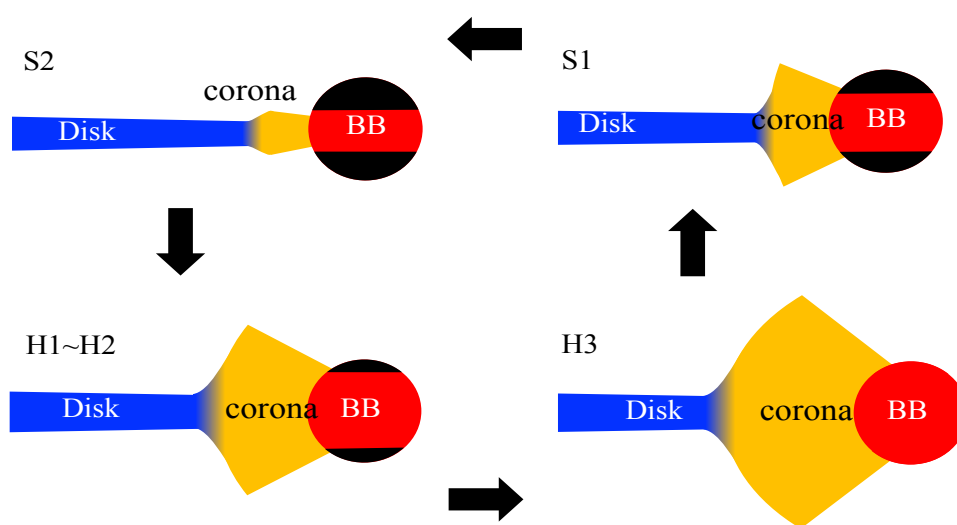


図4 降着流の変化の模式図。S1、H3などは図3に対応する。