

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

### *Suzaku* Studies of Mass Accretion Flows in Weakly-Magnetized Neutron Star Binaries

(「すざく」による弱磁場中性子星連星における質量降着流の研究)

櫻井 壮希

## 1 背景 – 弱磁場中性子星連星における降着流

Low-Mass X-ray Binary (以下 LMXB) は低質量星 ( $\lesssim 1M_{\odot}$ ) と弱磁場 ( $B \lesssim 10^9$  G) 中性子星から成る近接連星系である。恒星からのガスはロッシュローブを通じて中性子星へ降着し、その重力エネルギーを主に X 線放射として解放している。LMXB では降着物質が最終的に中性子星表面で熱化されるため、全重力エネルギー (1 核子あたり 200 MeV) のほとんどが放射に変換されると期待される。これは降着流のエネルギー収支を議論する上で極めて重要で、事象の地平線へとエネルギーが持ち越されてしまうブラックホール連星に比べて大きな利点である。

LMXB は、光度  $L$  が Eddington 光度  $L_{\text{edd}}$  の  $\gtrsim 10\%$  ではソフト状態、 $L \lesssim 0.1L_{\text{edd}}$  ではハード状態という、2 つの異なるスペクトル状態をとることが知られている。前者のスペクトルは図 1 (赤) のように  $< 20$  keV 以下で卓越し、後者 (黒) では同領域のフラックスが 1 桁小さいものの、べき状の硬いスペクトル (光子指数  $\sim 2$ ) は 100 keV 以上にまで延びる。ソフト状態の研究は早くも 1980 年代に一定の決着を見せ、スペクトルが降着円盤からの多温度黒体放射 (Mitsuda et al. 1984) と中性子星表面の赤道部からの黒体放射 (およびそのコンプトン) とで解釈できることが繰り返し確かめられてきた。いっぽうハード状態の研究は、硬 X 線バンド ( $> 20$  keV) での良質なデータの不足もあり、21 世紀初頭まで大きな進展は得られなかった。

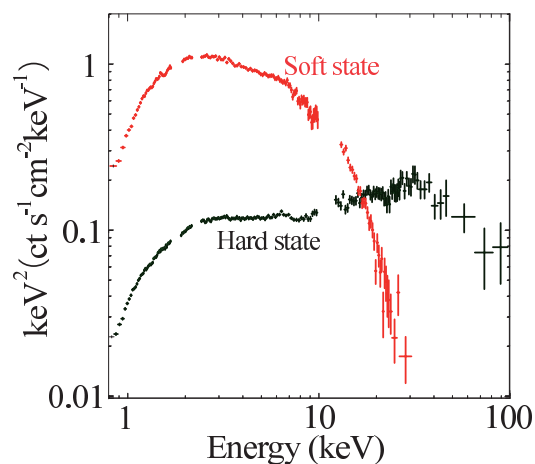


図 1 「すざく」による LMXB Aql X-1 のソフト状態 (赤) とハード状態 (黒) の  $\nu F_{\nu}$  スペクトル。

近年の硬 X 線観測機器、とくに「すざく」の登場は、LMXB のハード状態の研究にブレイクスルーをもたらすと期待される。「すざく」搭載の XIS と HXD は、他衛星では困難な 0.5 ~ 100 keV という広帯域・同時観測を可能にし、図 1 (黒) で示したハード状態のスペクトル研究に最適なためである。

## 2 研究手法

我々は LMXB のハード状態における降着流を解明すべく、「すざく」アーカイブデータの中から 8 天体を選定し、それらの計 17 個の広帯域スペクトルを解析した。すでに Sakurai et al. (2012) および Sakurai et al. (2014) において我々は、 $L \lesssim 0.01L_{\text{edd}}$  のハード状態における作業仮説を得ることに成功している。したがって、この仮説を広く他の天体でも検証しつつ、より信頼度を高め、最終的には光度 5 桁以上 ( $10^{32} - 10^{37.5} \text{ erg s}^{-1}$ ) にまたがるハード状態の包括的な描像を打ち立てることを目標とした。また、たいへん幸運なことに、上記データの中には Aql X-1 が状態遷移 (ハード → ソフト) を起こしたものが含まれる。この貴重な現象についても、本研究の重要な因子として詳細に解析を行う。

## 3 解析結果

### 3.1 $L \sim 0.01L_{\text{edd}}$

光度が  $L_{\text{edd}}$  の数 % 程度 ( $\sim 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ ) の場合、図 2(左) に示すスペクトルは、内縁温度が  $T_{\text{in}} \sim 0.3 \text{ keV}$  で内縁半径が  $R_{\text{in}} \gtrsim 20 \text{ km}$  の円盤放射と、強くコンプトン (電子温度  $T_e \sim 50 \text{ keV}$ 、光学的厚みは  $\tau \sim 1$ ) された黒体放射成分 (温度は  $T_{\text{bb}} \sim 0.5 \text{ keV}$ ) とで再現されることが判明した。黒体放射の半径は  $R_{\text{bb}} \sim 10 \text{ km}$  と中性子星半径に近い値を示し、複数の天体で無矛盾な結果となった。したがって、降着流は半径  $\gtrsim 20 \text{ km}$  において、光学的に厚い標準降着円盤から光学的に薄く幾何学的に厚い形状へと変化する、これこそがコンプトン化を引き起こすコロナであると考えられる。中性子星にはほぼ等方的に降着して表面全体が黒体放射で輝き、その光子が後続のコロナでコンプトン散乱されて、硬い連続成分になると解釈できる。

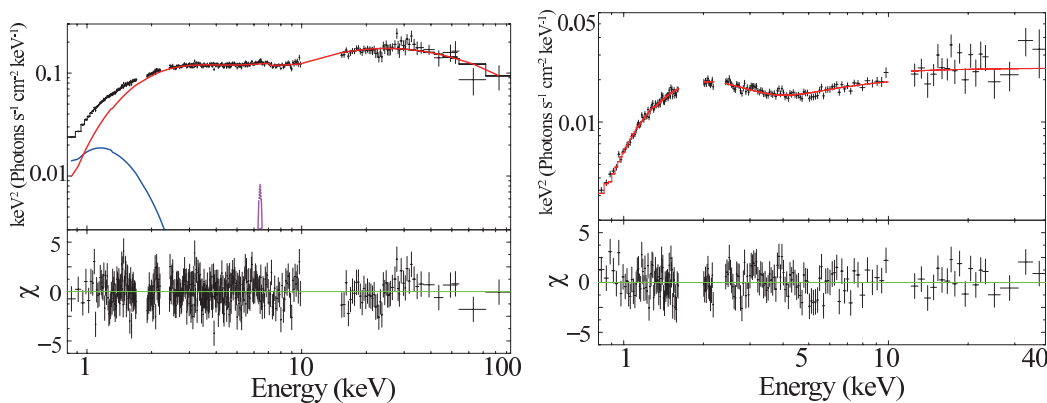


図 2 Aql X-1 の  $L \sim 0.01L_{\text{edd}}$  (左) と  $L \sim 0.001L_{\text{edd}}$  (右) における「すざく」X 線スペクトル。青は円盤放射、赤はコンプトン化された中性子星表面の黒体放射を示す。

### 3.2 $L < 0.01L_{\text{edd}}$

上記の場合より光度が下回ると ( $L < 0.01L_{\text{edd}}$ )、スペクトルは図 2 (右) に示すような、 $\sim 4 \text{ keV}$  付近が窪んだ形状になる。このスペクトルはコンプトン化黒体放射のみで再現され、小さい  $\tau$  ( $\sim 0.1$ ) により元の黒体放射が  $< 3 \text{ keV}$  で際立っている。図 3(右) に示すように、このような低光度での黒体半径は  $10 \text{ km}$  より有意に小さくなり (矢印 a2)、概ね  $R_{\text{bb}} \propto L^{0.24}$  の関係が成り立っている。この原因には主に 2 種の可能性がある。一つは、中性子星大気による散乱で黒体の色温度が

上昇し、見かけの半径が小さく見える効果である。もう一つは、低光度になると中性子星磁気圏が発達し、降着流が絞られ、中性子星の磁極に集中するというものである。

一方で、我々は $\tau$ の $L$ に対する挙動にも着目した。光度は降着流の密度( $\propto \tau$ )と断面積 $S$ 、そして動径速度 $v_r$ の積に比例するため、後者2つが一定なら $L \propto \tau$ となるはずである。しかし、 $L$ が§3.1の時より $\sim 2$ 桁以上低くなっても、 $\tau$ は $\lesssim 1$ 桁の変化に留まっているため、 $S$ もしくは $v_r$ も $L$ と共に減少する必要がある。上記の磁場説は1つの仮定で2つの現象(黒体半径の減少と、 $S$ の減少)を同時に説明できるため、より望ましいと考えられる。

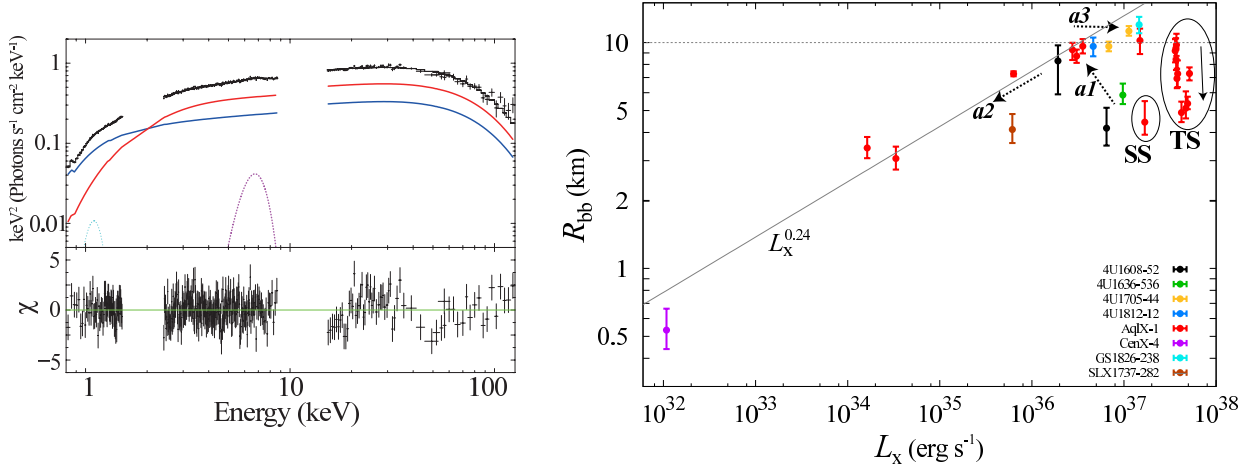


図3 (左) 光度 $L \sim 0.1L_{\text{edd}}$ におけるAql X-1の $\nu F_\nu$ スペクトル。青はコンプトン化円盤放射、赤は同じくコンプトン化された中性子星表面の黒体放射を示す。(右)  $L$ - $R_{\text{bb}}$ プロット。SSはソフト状態、TSは状態遷移(下記§3.4)時のデータ点を示す。

### 3.3 $0.01L_{\text{edd}} < L \lesssim 0.1L_{\text{edd}}$

光度が $L_{\text{edd}}$ の10%程度に達する場合、スペクトルは2種類に分けられる。1つは $L \sim 0.01L_{\text{edd}}$ の時と同様、円盤放射とコンプトン化黒体放射で再現され、 $T_{\text{in}} \sim 0.6$  keV、 $R_{\text{in}} \sim 14$  km、 $T_{\text{bb}} \sim 1$  keV、そして $R_{\text{bb}} \sim 5$  kmを示す。もう一方は図3(左)のように、円盤放射も黒体放射も共にコンプトン化されている場合である。このとき $T_{\text{in}} \sim 0.3$  keV、 $R_{\text{in}} \gtrsim 40$  km、 $T_{\text{bb}} \sim 0.6$  keV、そして $R_{\text{bb}} \sim 10$  kmと、前者とは大きく異なる値をもつ。これらは質量降着のヒステリシス効果によるものと解釈できる。前者は図3(右)中の矢印a1のように、ソフト状態から光度が下がりハード状態へ遷移した直後、後者はハード状態からソフト状態へ向かって光度が増している状態(同図a3)と考えられる。

### 3.4 ハード → ソフト状態遷移

Aql X-1は2011年に「すぎく」によって3回観測され、その内の1つがハード状態からソフト状態への遷移の瞬間を捉えている。我々は過渡期の時間を10分割し、それぞれのスペクトル解析を行った。スペクトルは図4(左)のように劇的な変化を遂げるものの、これまでの結果と同様に、円盤放射とコンプトン化黒体放射の和ですべて再現された。状態遷移は各パラメータの急速かつ連続的な変化( $T_{\text{in}} = 0.5 \rightarrow 0.9$  keV,  $R_{\text{in}} = 30 \rightarrow 18$  km,  $T_{\text{bb}} = 1.0 \rightarrow 1.5$  keV,  $R_{\text{bb}} = 10 \rightarrow 5$  km,  $T_e = 13 \rightarrow 3$  keV,  $\tau = 4 \rightarrow 6$ )によるものと判明した。また我々は図4(右)のように、円盤放射、黒体放射、コンプトンコロナの各光度の比を求めた。状態遷移に伴って円盤放射の光度 $L_d/L$ が卓越し、全体の半分程度にまで増大する一方、コンプトンの光度比 $L_c/L$ は減少し、黒体放射の光度 $L_{\text{bb}}$ はほぼ全体の25%という一定比にとどまっていた。本来、降着物質は中性子星表面に到達する際、全重力エネルギーの半分以上を保持し、それが熱化されて $L_{\text{bb}}$ になると考えられるので、この $L_{\text{bb}} < 0.5L$ という挙動はいささか奇妙である。この理由としては、エネルギーの一部が中性子星の自転の加速に使われているか、またはradiation dragの効果によりコロナ中で降着物質から

光子へのエネルギー（および角運動量）輸送が効率的に行われ、中性子星表面に着くまでに半分以上の重力エネルギーを失っている可能性が挙げられる。

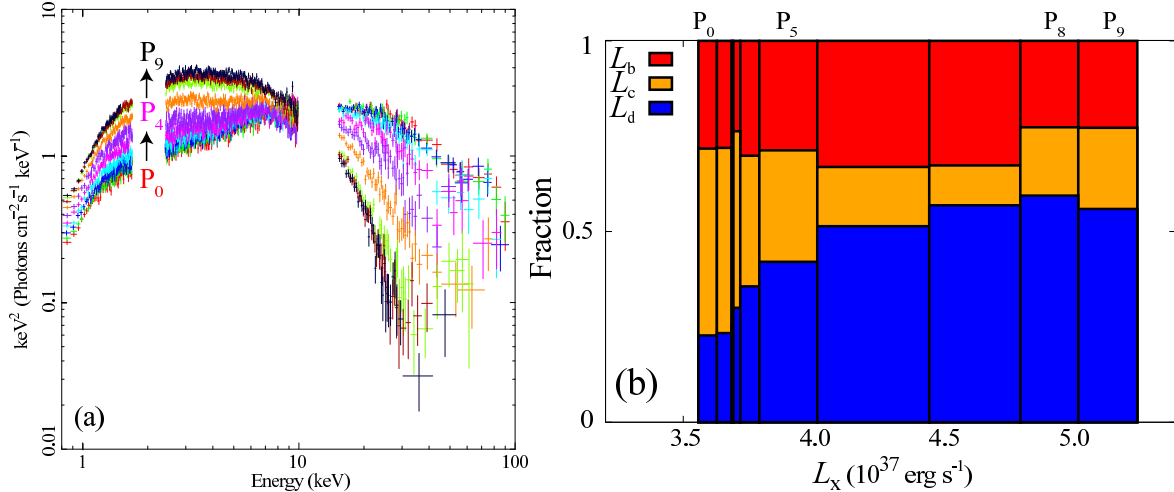


図4 Aql X-1 のハード → ソフト状態遷移時におけるスペクトル変化 (a) と、各放射成分の光度変化 (b)。右図 (b) で  $L_d, L_c, L_b$  はそれぞれ円盤放射、コンプトンコロナ、黒体放射の光度の割合を示す。

### 3.5 $Q - y$ ダイアグラムによる統一化

我々は Makishima (2014) によって導入された新パラメータ  $Q \equiv T_e/T_{bb}$  を用いて、以上で得られた様々な光度における結果の統一化を試みた。修正されたコンプトン  $y$  パラメータ  $y = 4k(T_e - T_{bb})\tau(1 + \tau/3)/m_e c^2$  を  $Q$  に対してプロットすると、図5のように、すべてのデータ点がある1つの軌跡を描くことが確認された。ここでは §3.3に見られたヒステリシスの効果は解かれ、ソフト状態とハード状態は  $Q = 5$  を境に分けられている。また上記の状態遷移 (3.4) はこの境界を連続的に辿っていることが判明した。

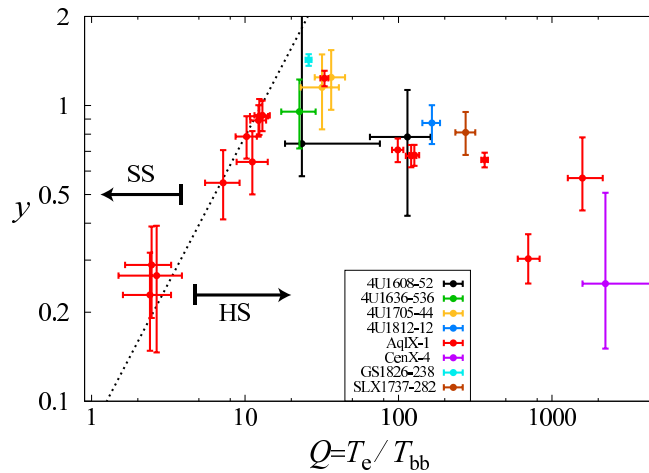


図5 我々の全サンプルデータを用いて作成した  $Q - y$  ダイアグラム。SS がソフト状態、HS がハード状態を示す。

## 4 結論

我々は「すぎく」の広帯域性能を活かし、LMXB のハード状態のデータ解析を行った。スペクトルが円盤放射、中性子星表面の黒体放射、コンプトン成分という3つ(以内)の成分で表されることを示し、3者の光度に対する振る舞いを明らかにした。その結果、ハード状態を広い光度範囲 ( $10^{32} - 10^{37.5} \text{ erg s}^{-1}$ ) において統一的に解釈できる、包括的な描像を打ち出すことに成功した。また、それがソフト状態の従来描像と無矛盾に接続されることを、ハード → ソフト状態遷移時のデータ解析によって解明した。