

論文の内容の要旨

X-ray study of the accretion flow onto highly magnetized neutron stars

(X線観測による強磁場中性子星への
質量降着流の研究)

氏 名 丹波 翼

背景: 強磁場中性子星への降着流からの X 線放射

中性子星は、ブラックホールを除いて宇宙空間で最も密度の高い天体であり、強重力、高密度、強磁場下での特異な物理現象を実現する宇宙で唯一の実験室である。特に、連星からの質量降着がある場合には、莫大な重力エネルギーを X 線帯域の電磁波放射に変換し、大光度の X 線源として観測される。そのような天体は「X 線パルサー」と呼ばれ、降着物質と中性子星の相互作用を直接観測できるため、中性子星研究の中心的な役割を果たすとともに、極限状態の物理現象をマクロなスケールで再現する唯一の環境としても重要な意味を持つ。

中性子星への降着物質は、 $\sim 10^{12}$ G という強力な磁場の磁気圧によって磁気圏でせき止められ、磁力線に沿って磁極に到達する。中性子星の表面に至るまでに降着物質は減速され、磁極の直上に光学的に厚い「降着円柱」を形成する (Basko & Sunyaev, 1976)。光度が $\sim 10^{37}$ erg s $^{-1}$ を超える明るい X 線パルサーの場合、減速機構は中性子星からの放射圧が支配的になり、バルク・熱コンプトン散乱によって重力エネルギーが X 線放射に変換される (Becker & Wolff, 2007)。大光度 X 線パルサーの観測スペクトルは、このような降着円柱における逆コンプトン散乱で説明される。

本研究の目的: X 線パルサーの 3 次元物理描像の解明

従来の降着円柱モデルは、磁力線に沿った 1 次元モデルをもとにしており、等方的な放射を仮定している。しかし、実際の降着円柱からの放射は非等方的であり、その帰結として、X 線パルサーでは一般的に軌道位相・自転位相に伴う X 線スペクトルの複雑な時間変動が観測される。放射の非等方性の原因としては、降着円柱の幾何学構造や中性子星による遮蔽・反射、中性子星の自転運動、周辺物質による散乱・吸収といったものがあげられる。これらの要因はいずれも、降着系と周辺物質の 3 次元構造に起因するものであり、従来の 1 次元モデルではスペクトルの時間変動を説明することができない。本研究の目的は、X 線パルサーの 3 次元物理描像の解明であり、スペクトルの時間変動から得られる観測事実を 3 次元物理モデルに基づいて説明することを目指す。

本研究の手法: X 線観測データの時間変動解析

本研究では、X 線パルサーからの放射の時間変動に着目し、軌道位相・自転位相に伴うスペクトル変動から 3 次元物理描像の確立を目指す。先行研究 (Odaka et al. 2014) では、星風降着型 X 線パルサー Vela X-1 における軌道位相に伴う放射スペクトルの変動の観測結果が、降着円柱における逆コンプトン散乱をシミュレーションで再現した 3 次元物理モデルと比較されている。その結果、Vela X-1 のスペクトル変動は降着率の変動に伴う降着円柱のジオメトリの変化に起因することがわかっている。しかし、Vela X-1 のような星風降着型 X 線パルサーでは、降着率の変動が激しい上に自転周期が長いため、自転位相で分解した時間変動解析を行うことができない。本研究では、Odaka et al. (2014) で用いられた物理モデルを用いて、軌道位相と自転位相の両方に沿った時間変動の解析を行った。本研究にふさわしい天体として、われわれは安定した降着率と短い自転周期をもつ円盤降着型 X 線パルサーに着目した。その中でも大統計の期待できる光度と距離をもつ 2 天体 Cen X-3 と Her X-1 を解析対象として選定し、NuSTAR 衛星・NICER 衛星を用いて 0.6–78 keV という広帯域の X 線データを解析した。その際、現存するアーカイブデータの解析だけでなく、さらなる良質なデータの確保のため、Cen X-3 に関しては過去最長となる軌道周期 2 周分の観測を NuSTAR 衛星に提案した。観測提案は採択され、2022 年 1 月に実際に観測を行った。

X 線パルサー Cen X-3 の星周物質の物理描像

われわれはまず、Cen X-3 の軌道位相に伴うスペクトル変動に着目し、スペクトル、ライトカーブ、パルスプロファイルにいたるまで NuSTAR 衛星、NICER 衛星の長時間観測データを詳細に解析した。その結果、Cen X-3 の 4–78 keV における光度は 3.7×10^{35} – 4.5×10^{37} erg s⁻¹ と 2 桁程度変動しており、その変動がスペクトルのべきと強く相関していることを発見した。べき指数は -0.37 から 1.72 と激しく変動しており、天体の光度が

低い時にスペクトルがハードになるという性質が確認された。さらに、天体の光度が下がる際に、自転周期に伴うパルス成分が小さくなり、鉄ラインの等価幅が大きくなることがわかった。また、これらの観測事実は、特定の自転位相に絞って解析を行っても同様に検出され、自転位相と独立な星周物質によって引き起こされることが強く示唆される。

われわれは、軌道位相に伴うスペクトル変動の観測事実から、中性子星への降着流は一定であり、スペクトル変動は星風による X 線の吸収と散乱に起因するという仮説を立てた。この仮説をモデル化し、スペクトルの再解析をおこなったところ、星風による吸収・散乱だけではなく、降着円盤からの熱的放射を物理モデルに取り入れることによってスペクトル変動が説明できることを示した。明らかになった物理描像は、図 1 に示されるように、観測者の視線にある星風の塊が中性子星からの X 線放射を強く吸収・散乱することによって光度が小さくなるというものであ

る。その一方で、星風よりもサイズの大きい降着円盤からの放射は一部のみが遮蔽され、そのほかの部分は星風の影響を受けないことで、相対的に低エネルギー帯域での寄与が大きくなることがわかった。星風は非一様なクラump状になっており、その典型的な大きさと水素原子密度はそれぞれ、 $R_c \sim 8 \times 10^{10} \text{ cm}$ と $n_c \sim 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ と測定された。降着円盤からの放射は 2 温度の黒体放射で表され、それぞれ $\sim 0.1 \text{ keV}$ と $\sim 0.5 \text{ keV}$ という温度をもち、どちらも $\sim 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ の光度をもつ。

Cen X-3 と Her X-1 の降着流の 3 次元描像の解明 (Chapter 9)

次にわれわれは、Cen X-3 と Her X-1 の自転位相に伴うスペクトル変動の解析をおこなった。Her X-1 は Cen X-3 と異なり、軌道位相に伴うスペクトル変動をほとんど示さなかったが、自転位相に伴う変動では、両者に共通する性質が発見された。Cen X-3 と Her X-1 はどちらの天体もエネルギーとともにパルス成分が増加するという傾向がみられた。さらに、パルスプロファイルの形状のエネルギー依存性も両天体でよく似ており、低エネルギーバンドでフラットな構造だったものがエネルギーが上がるにつれて鋭いピー

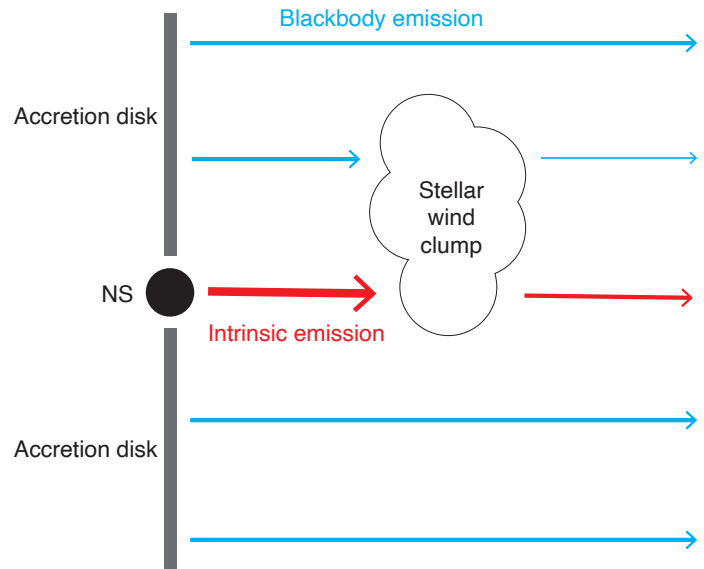


図 1 Cen X-3 の星周物質の物理描像。(論文 Fig. 7.12)

クに変化していくという性質が明らかになった。また、サイクロトロン共鳴吸収線のエネルギーも自転位相に伴って変化しており、Cen X-3 の場合は 25.1 keV から 29.0 keV、Her X-1 の場合は 31.9 keV から 37.6 keV の範囲で変動し、光度変動と正の相関をもつことがわかった。

われわれは、降着円柱における強磁場中のバルク・熱コンプトン散乱で発生する放射を 3 次元モンテカルロシミュレーションで再現する物理モデルを構築した。そこから計算されるパルスプロファイルを観測データから得られたものと比較した。その結果、Cen X-3 と Her X-1 のいずれの場合も共通の以下のような 3 次元物理描像を明らかにした。まず、両者の観測データを再現するためには、半径に対して高さが 10 倍程度の細長い降着円柱が必要であることがわかった。さらに、降着円柱上部から放射される“pencil beam”の寄与はほとんどなく、降着円柱の側面から出る“fan beam”の直接成分と fan beam が中性子星表面で反射されて観測者に届く反射成分の 2 種類の放射成分で観測結果を説明できる。図 2(a) に示すように、降着円柱の電子温度と同等のエネルギーを持つ光子は比較的等方的に放射されるため、直接成分と反射成分の両方が存在する。逆に、図 2(b) に示すように、光子のエネルギーが大きい場合は、降着流の運動エネルギーによって下向きに光子が放射されるため、ほぼ全てが反射成分として観測される。一方、Cen X-3 と Her X-1 のパルスプロファイルの違いは、磁軸と観測者の視線のなす角度の違いのみで説明でき、Her X-1 は円柱の軸から 10° 以内のほぼ真上から観測しているのに対し、Cen X-3 は円柱の軸から観測者の視線が 10° 以上ずれているという違いがある。さらに、以上のような 3 次元構造では、従来の仮説のようにサイクロトロン共鳴吸収線を降着円柱内で生成することは難しく、中性子星表面の反射で生成している可能性が高いことを指摘した。

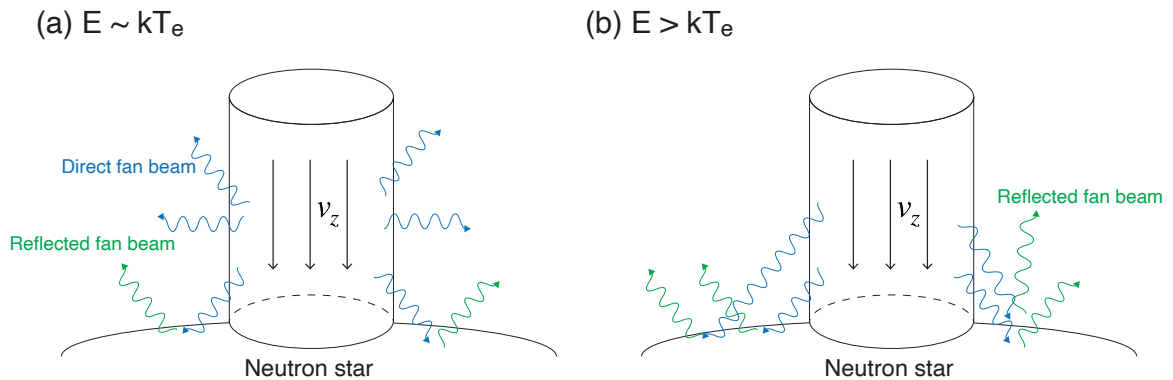


図 2 Cen X-3 および Her X-1 の質量降着流からの X 線放射の 3 次元描像。(a) 光子のエネルギーが電子温度と同等のときは、直接成分と反射成分が共存する。(b) 光子のエネルギーが電子温度を超えると、反射成分が卓越する。(論文 Fig. 9.11)