

氏名（本籍） ^{くぼ}窪 ^た田 ^{めぐ}恵（東京都）
学位の種類 博士（理学）
学位記番号 甲第 1173 号
学位授与の日付 2019 年 3 月 19 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目 **Investigation of an enigmatic hump around
30 keV in Suzaku spectra of Aquila X-1 in
the Hard State**
(Aquila X-1 「すざく」 スペクトルのハード
状態における 30keV 付近の未解明なハンプ
構造の調査)

論文審査委員 (主査) 教授 松下 恭子
准教授 鈴木 克彦 教授 辻川 信二
客員教授 (連携大学院) 玉川 徹 教授 長嶋 泰之
立教大学 理学研究科 物理学専攻 教授 北本 俊二

論文内容の要旨

本学位論文は、中性子星 (NS) と低質量恒星の連星系 (NS-LMXB) である Aquila X-1 の、X線スペクトルの 30 keV 付近に見られる未解明のハンプ構造について、その統計的有意性を実証し、起源について考察したものである。NSは、重力崩壊型超新星爆発のあとに、その残骸として残る天体である。中性子の縮退圧で支えられた非常に高密度（半径約12 km、質量は太陽の 1.4 倍程度）な天体であり、その密度は飽和原子核密度 ($2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$) の 3 倍程度にまで達する。構成要素が核子であるため巨大な原子核とみなすことができ、原子核物質を検証する実験場として期待されている。また、鉄より重い元素の起源は、天文学において最重要なテーマであるが、NS-LMXB で起きる X 線バーストは、その候補の一つとして考えられている。

本学位論文は全部で 8章から構成される。1章は序論で、この研究の背景と目的を述べている。2章では、中性子星の概要、本研究の対象である NS-LMXB の特徴である、スペクトルと状態遷移の関係、Type-I X 線バーストに伴う核融合反応のプロセスについてまとめている。3章では、本論文で解析する天体である Aquila X-1 について、先行研究をまとめている。4章では、観測に使用した「すざく」および NuSTAR 衛星についての詳細をまと

めている。5章は、これらの衛星による Aquila X-1 の観測の詳細と、データリダクションについてまとめている。6章は、2007 年の「すざく」衛星で観測されたデータの解析とその結果、2011 年「すざく」と 2016 年 NuSTAR のデータ解析についても述べている。7章で、得られた結果をもとにハンプ構造の起源を考察し、8章でまとめと結論を述べている。

1. 研究の背景・目的

NS-LMXB は、NS と太陽質量以下の恒星との連星系で、伴星から絶えず質量降着が起きている。物質は角運動量を保持したまま降着し、NS 周辺に降着円盤を形成する。この系に属するNSは磁場が弱い ($\sim 10^{7-9}$ G)、最終的に物質は NS 表面に堆積し、密度と温度が上がると突発的に核融合反応が起こる (Type-I バースト)。特に NS-LMXB の場合、降着物質の主成分は水素であるので、NS 表面は陽子が過剰な環境にあることが期待される。このような環境で核融合反応が起こると、早い陽子捕獲反応 (rp-process; Wallace & Woosley, 1981) により、最大で原子番号 $Z \sim 50$ の元素が生成されることが理論的に示唆されているが (Schatz+2001, Jose+2010)、観測的証拠は未だ得られていない。

NS-LMXB は、降着円盤の不安定性により、準周期的にアウトバーストを起こす。静穏期では、伴星からの降着物質は NS 表面から離れたところでケプラー回転している。伴星からの降着物質はほぼ一定の流量で降り注ぎ、降着物質が円盤に蓄積して臨界密度を超えると、溜まった物質は NS に落下し始め、円盤の内側は NS 表面近傍まで到達する。このとき、円盤内側からの多温度黒体放射 (< 10 keV) により、低エネルギー側で増光する。これがアウトバーストのメカニズムである。NS-LMXB のエネルギースペクトルは、このアウトバーストに伴って、ハード状態とソフト状態の間を遷移することが知られている。ソフト状態は、アウトバーストの明るい時期に対応し、円盤起源の軟X線放射が支配的になっている。このとき、降着物質は NS 表面の赤道面上に集中的に降着して、表面を加熱することで、赤道面は黒体放射で輝く。さらに、この放射は円盤内側にトラス上に分布する、光学的に薄く幾何学的に厚い高温降着流 (コロナ) によって逆コンプトン散乱され、数十 keV 程度まで叩き上げられる。ハード状態は、アウトバーストの増減光時に対応しており、降着円盤内側は NS 表面から数十 km のところまで遷移している。このとき、コロナは NS 表面をほぼ球状に取り囲んでいる。NS 表面からの黒体放射がコロナで強く逆コンプトン散乱されてスペクトルは 100 keV 程度まで伸びる。どちらの状態においても、スペクトルは円盤からの多温度黒体放射と、NS 表面からの黒体放射がコロナで逆コンプトン散乱された放射の2つの成分 (以下、基本モデル) で説明できることが知られている (Sakurai+2012, 2014)。

Aquila X-1 は、「すざく」衛星により、2007 年のアウトバーストの減光時に 7 回観測されている。いずれのスペクトルも、上述の基本モデルで大局的には説明できるが、明るいハード状態にある 2—4 回目観測スペクトルの 30 keV 付近にこのモデルでは説明できないハンプ構造があることが先行研究で示唆されていた (Sakurai+2012)。しかし、2—4 回の観測を個々に解析していたため、構造が統計的に有意でなく、さらなる議論はされていなかった。

2. 研究内容・結果

30 keV 付近のハンプ構造の正体を調べるために、構造が報告されている 2007年の「すざく」データの解析を行った。光子統計を上げるために、3 観測分のスペクトルを足し合わせたデータを用いた。

まず我々は、モデルの連続成分に変更を加えることでスペクトルを説明しようと試みた。ハンプ構造を作り得る連続成分モデルとしては、次の二つが考えられる。(1) NS 表面からの放射と円盤内側からの放射がともに逆コンプトン散乱されているモデル。フィット結果から得られた円盤の内縁半径が ~ 10 kmとなり、ハード状態で想定される半径と矛盾する結果となった。(2) 光源と観測者の間に濃い吸収体があることを想定したモデル。フィットの結果、30 keVの残差は解消せず、かつ得られた吸収体の水素柱密度は $1.6 \times 10^{25} \text{ cm}^{-2}$ なので、このような高密度な吸収体があった場合、散乱を考慮すると、非常に大きな放射強度が必要とされ、物理的に不自然な結果となった。

以上の解析より、連続成分のモデルを変更することでは、観測されているハンプ構造は説明できないことがわかった。続いて、30 keV に局在する成分を基本モデルに加えることで説明を試みた。(1) 元素輝線を想定した放射モデルである Gaussian モデル。解析の結果フィットは基本モデルから改善し、残差の構造は解消した。得られた Gaussian の中心エネルギーと幅はそれぞれ、29–34 keV と 4–0 keV であった。(2) 再結合放射を想定した redge モデル。これは、自由電子が公開電離した元素に捕獲された時に差分のエネルギーをX線として放射する過程である。Gaussian モデル同様、フィットは改善し残差の構造は解消した。K-edge のエネルギーと電子温度はそれぞれ、26–28 keV と 6–21 keV と得られた。検出器応答やバックグラウンドの不定性の検討、および F検定による偶然確率の計算から、観測されている構造は、系統的・統計的に有意であることが確認できた。

また我々は、他の Aquila X-1 のデータにおける構造の有無を確認するために、2011 年のアウトバーストの増光時に観測されたデータのうち、ハード状態のスペクトルと、2016 年のアウトバーストの終わりかけを観測した NuSTAR のスペクトルの解析を行った。その結果、いずれの場合も顕著な構造は存在しなかったが、それと同時にこれらの観測では、2007 年のデータと比べてコロナの光学的厚さは有意に厚いということもわかった。

3. 考察・まとめ

類似したスペクトル構造は、Aquila X-1 2004 年のアウトバーストを観測している RXTE のスペクトルや、4U 1812-12 の INTEGRAL と BeppoSAX の同時観測スペクトルにも確認できた。しかし、2007 年「すざく」の 2—4 番目以外のデータや 2011 年「すざく」のデータおよび、2016年 NuSTARのデータにおいて、ハンプ構造は確認できなかった。以上の情報から推察すると、ハンプ構造が観測できる条件は、硬 X 線で十分に明るく、コロナが光学的に薄いことが必要であると考えられる。

解析結果から、ハンプ構造は元素の K 殻構造を説明する 2 つのモデルで再現できることがわかった。Gaussian の中心エネルギーと再結合放射モデルの K-edge エネルギーから、該当する元素は NS 表面での重力赤方偏移 0.23 を考慮して計算すると、Gaussian モデルの場合原子番号 59—63 (Pr から Eu)、再結合放射モデルの場合、元素が H-like ま

で電離しているとすると、原子番号 48 と 49 (Cd と In) と見積もられた。さらに、再結合放射を仮定すると想定元素は、**rp-process** において最大 $Z\sim 50$ の重元素の生成が可能であるという、理論的な研究と矛盾しないことがわかった。

我々は、再結合放射の放射ジオメトリとして、**rp-process** で生成された重元素が、光学的に薄い NS 大気中に存在しており、その重元素がコロナからの硬 X 線の照り返しを受けて、光電離されている状況を考えている。このような条件で、再結合放射が観測できるためには、どのくらいの重元素が必要なのかを見積もった。(1) 観測フラックスを説明できること、(2) 中性子星大気が光学的に薄いこと、(3) 重元素が高階電離していること、そして (4) 再結合放射が重元素により吸収されないこと、の4つの条件を考慮すると、太陽組成の 10^7 倍の重元素が大気中に存在すれば、観測を説明できることを明らかにすることができた。この量は、通常の宇宙空間で考えると極めて多量であるが、Schatz+2001らの理論計算で示されている、X線バースト直後の重元素存在比と同程度であり、大きく矛盾しないことがわかった。

本論文によって初めて NS-LMXB Aquila X-1 のスペクトルのハンプ構造が、統計的な揺らぎ及び系統誤差では起こり得ないこと、さらにその起源が **rp-process** 生成元素である可能性が示された。

論文審査の結果の要旨

本学位論文は、中性子星 (NS) と低質量恒星の連星系 (NS-LMXB) である Aquila X-1 (わし座 X-1) の X 線スペクトルに見られる未解明のハンプ構造について、その統計的有意性を実証し、起源について考察したものである。

本論文は全八章で構成されている。第一章はイントロダクションである。NS-LMXB の表面で起きる Type-I バーストでの爆発的元素合成により、重い元素が生成されることが提示され、また、NS-LMXB を X 線帯域で観測した場合に見られるスペクトルの特徴が説明されている。2007 年の「すざく」衛星による観測結果を用いた先行研究で、30 keV 付近に未知のハンプ構造があることが指摘されていることを述べた上で、そのハンプが重元素起源である可能性があるとの、著者独自の仮説が端的に示されている。

第二章は、本研究に関連のある事項のレビューである。最初に NS の一般的な理解を述べ、その種類にも言及している。次に本研究の対象天体である NS-LMXB の解説と、スペクトルの特徴や状態遷移のメカニズムについて述べている。伴星から降着する物質により、NS 周りに形成される降着円盤について、その物理的な考察から導かれる標準降着円盤モデルと、多温度黒体放射スペクトルについて説明がされている。さらに、NS-LMXB を特徴づける逆コンプトン散乱の詳細を説明し、最後に Type-I バースト中で考える元素合成について、その核融合反応の説明まで踏み込んで、先行研究をまとめている。

第三章は、本論文でデータ解析する典型的な NS-LMXB である Aquila X-1 について、

先行研究をまとめている。§ 3.1 は一般的なレビューとなっており、§ 3.2 は本論文と同じ「すざく」衛星による観測のまとめになっている。Aquila X-1 は状態遷移することが知られているが、様々な状態での観測結果が示され、最後に 30 keV ハンプ構造が指摘されている観測について、その結果が端的にまとめられている。

第四章は、本論文で用いた「すざく」衛星と観測機器のまとめである。最初に衛星の概要について述べ、その主要機器ある X 線 CCD カメラと硬 X 線検出器の詳細が述べられている。特に後者については、本研究で扱う 30 keV ハンプ付近のエネルギー帯域に感度がある機器なので、どのようなデータが得られるのか、バックグラウンドをどのように落とすのかなど、詳細に述べられており、著者の深い理解がうかがえる。

第五章は、本論文で用いた「すざく」衛星の観測データについて、その観測時期、データの品質、データ処理の方法などが手短かにまとめられている。

第六章は、得られたデータのスペクトル解析を行い、様々な検討を重ねた上で、30 keV ハンプ構造の統計的有意性を示している。まず初めに、3 観測を個別にモデルフィットしハンプ構造が見られることを確認した上で、3 観測を足し合わせることで統計を上げ、その有意性を示している。用いたモデルは、降着円盤からの多温度黒体放射成分と、中性子星表面からの黒体放射が周りのコロナで逆コンプトンされた成分を足し合わせた、NS-LMXB に標準的なものである。

著者は標準的なスペクトルモデルの他にも、放射の連続成分を説明する、物理的に可能なモデルを適用し、それらでは 30 keV ハンプ構造を説明できないことを、統計的に示している。次に、標準的な放射モデルに加えることで、ハンプ構造を説明できるモデルとして、経験的な「ガウス関数モデル」と、自由電子が原子の K 殻軌道に捕まる際に X 線が放射される「再結合放射モデル」の 2 つを検討している。いずれも統計的には有意であり、このモデルを加えることにより、ハンプ構造がうまく説明できることが示されている。最後に著者は、他の時期の Aquila X-1 の観測データについても、同様の解析を試みているが、ハンプ構造は見られていない。

第七章は得られた結果を元にしたディスカッションである。§ 7.1 にこれまで得られた結果が、整理してまとめられている。§ 7.2 では「ガウス関数モデル」に対して、その物理的な解釈が行われている。ガウス分布が元素の $K\alpha$ 輝線だと考えた場合、中性子星表面での重力赤方偏移を考慮した上で、 $Z=56$ (Pr) ~ 63 (Eu) だと考えられることが示されている。ガウス分布の幅についても議論されており、熱ドップラー広がりでは説明できず、いくつかの元素の $K\alpha$ 輝線が混在している可能性がある結論づけている。

§ 7.3 では「再結合放射モデル」に対して、その物理的な解釈を試みている。同じく重力赤方偏移を考慮した上で、自由電子が結合する先の原子は $Z=48$ (In), 49 (Cd) だと考えられることが示されている。§ 7.3.4 ではどのくらいの元素量があれば、観測結果が再現できるかを検討している。中性子星の大気、高速で降着するコロナ、逆コンプトン散乱による硬 X 線の量、重元素の光電離によるイオン化、再結合放射の量などを丁寧に検討し、太陽組成の 10^7 倍の重元素があれば良いとの結果を得た。これは驚くほど多量であ

るが、中性子星表面で起きる Type-I パーストの速い陽子捕獲反応で生み出すことができる程度の量であり、全てを無矛盾に説明できることが示されている。

第八章はまとめと結論である。本研究では、Aquila X-1 の 30 keV 付近に見られる未解明のハンプ構造について、あらゆる角度からデータ解析を試みており、その統計的有意性を示したことは、最も重要な成果であると認める。ハンプ構造の物理的解釈として、速い陽子捕獲過程で生成された重元素からの放射であるというシナリオは、著者独自のものであり、独創性の点でも優れている。このシナリオは、非常に多くの重元素の存在を必要としており、一見荒唐無稽であるが、著者は放射環境を丁寧に検討し、現実的な解が存在することを示した。これまでの類似研究にはない全く新しい検討であり、優れた成果である。

本論文で示された、重元素の直接観測は、宇宙物理学では非常に重要な視点である。統計の点から、観測的にはチャレンジングなテーマ設定ではあったが、最先端研究であり、宇宙の鉄より重い重元素合成の現場としての重要性を、観測的に再指摘するというインパクトがあった。今後、この分野の研究活動を活発にするきっかけになるであろう。

以上により、本研究は博士（理学）の学位論文として十分に価値のあるものと認める。