

# **X-ray Probing of the Matter Surrounding Accretion-Powered X-ray Pulsars**

Yuki Yoshida

Department of Physics, Graduate School of Science, Rikkyo University,  
3-34-1 Nishi-Ikebukuro, Toshima, Tokyo 171-8501, Japan

A doctoral thesis submitted to the Department of Physics,  
Graduate School of Science, Rikkyo University  
September 2018



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Review</b>	<b>3</b>
2.1	X-ray Binary Source and Accretion . . . . .	4
2.1.1	X-ray Binaries . . . . .	4
2.1.2	Accretion in Binary System . . . . .	5
2.2	Accretion-Powered X-ray Pulsars . . . . .	10
2.2.1	General Picture . . . . .	10
2.2.2	Accretion in X-ray Pulsars . . . . .	10
2.2.3	X-ray Spectra . . . . .	13
2.2.4	Emission Line . . . . .	17
2.2.5	Classification of X-ray Pulsars . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Instrument</b>	<b>25</b>
3.1	Overview of Suzaku Satellite . . . . .	26
3.2	X-ray Telescope . . . . .	28
3.2.1	Performance and Calibration . . . . .	28
3.3	X-ray Imaging Spectrometer . . . . .	33
3.3.1	Overview . . . . .	33
3.3.2	Performance and Calibration . . . . .	35
3.3.3	Systematic Observational Effects and their Mitigation . . . . .	38
3.3.4	Operation . . . . .	40
3.4	Hard X-ray Detector . . . . .	41
3.4.1	Overview . . . . .	41
3.4.2	Performance and Calibration . . . . .	43
3.5	Summary of the Mission . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Observations</b>	<b>49</b>
4.1	Data Reduction . . . . .	50
4.2	Light Curves . . . . .	51
4.2.1	BeXB Pulsars . . . . .	51
4.2.2	SGXB Pulsars . . . . .	57
4.2.3	LMXB Pulsars . . . . .	63
4.3	Summary of Selected Sources . . . . .	66

<b>5</b>	<b>Data Analysis and Results</b>	<b>69</b>
5.1	Phase-averaged Analysis . . . . .	70
5.1.1	Phase-averaged Spectra . . . . .	70
5.1.2	Modeling of Broadband Spectra . . . . .	71
5.2	Phase-resolved Analysis . . . . .	99
5.2.1	Selection of Sources . . . . .	99
5.2.2	Pulse Period Determination . . . . .	99
5.2.3	Spectral Fitting . . . . .	105
5.2.4	Investigating Statistical Significance of Variations . . . . .	112
5.3	Phase-resolved Analysis with High Intensity State Data . . . . .	118
5.3.1	Pulse Profiles . . . . .	118
5.3.2	Spectral Parameter Variations with Pulse Phase . . . . .	118
<b>6</b>	<b>Discussion</b>	<b>123</b>
6.1	Summary of the Results . . . . .	124
6.2	Nature of Iron Lines . . . . .	125
6.2.1	Fluorescent Iron K-line Emission and its Emission Region . . . . .	125
6.2.2	Finite Light Speed Effect . . . . .	128
6.3	Possible Origins of Modulating Absorption Edge Depth . . . . .	135
6.3.1	Two Spectral Components Influenced by Different Degree Absorption . . . . .	137
6.3.2	Physical State Variation of Absorption Matter . . . . .	142
6.3.3	Geometric Variation of Absorption Matter . . . . .	146
6.4	Distribution of Iron Surrounding X-ray Pulsar . . . . .	151
6.4.1	Unified Picture . . . . .	151
6.4.2	Accreting Matter within Alfvén radius . . . . .	153
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>157</b>

## 論文要約

第1章は本論文の導入部分である。本章で、降着駆動型 X 線パルサーを対象とし、観測的に研究調査することを課題として設定した。降着駆動型 X 線パルサーとは、強磁場をもつ中性子星と恒星との連星系である。この系では、恒星から放出されたガスは中性子星へ降着するが、角運動量を持つため、直接落ちずに中性子星周りに降着円盤を形成する。降着したガスは中性子星の磁場の圧力と降着ガスの圧力が釣り合う位置 (アルフヴェン半径) で一旦塞き止められる。その後降着円盤の内縁あたりから磁力線に沿って中性子星の磁極付近に降り積もり、星表面を加熱し、X 線で明るく輝く。降着駆動型 X 線パルサーは強磁場中でのコンパクト星への降着の実験場として興味深い天体であり、X 線観測はそれらを調査する上で有用な手段である。前述した描像のような、降着駆動型 X 線パルサーにおける強磁場を持つ中性子星へ降着するプラズマ流についてこれまで研究されてきたが、観測的にはその物理状態に対して制限はこれまでつけることができていない。そこで、強磁場を持つ中性子星へ降着するプラズマ流の状態に、物理的な制限を観測的に与えることを目的とする。

第2章では X 線連星、降着駆動型 X 線パルサーといった、本論文の主題を理解する上で必要な宇宙物理学における基礎事項をまとめた。また本論文において特に注目した、降着駆動型 X 線パルサーの X 線エネルギースペクトルにしばしば観測される鉄輝線、鉄吸収端についての過去の観測結果をまとめた。これまでの観測結果に基づくと、鉄輝線の放射機構は、蛍光であると考えられる。中性子星近傍の中性もしくは低電離の鉄が中性子星からの X 線に照射されることで蛍光輝線が生じる。また鉄輝線と鉄吸収端が示す電離状態が一致することから、鉄輝線の起源となる物質による光電吸収により鉄吸収端は生じると考えられる。したがって、これら輝線、吸収端の物理パラメータは、中性子星近傍の物質の物理状態の情報が反映されている。特に鉄吸収端を観測することで得られる情報は、鉄輝線から得られる情報とは独立で、かつ X 線源と観測者の間にある物質に限定した情報を得ることができる。さらに中性子星が自転することで、観測者は様々な方向から中性子星を観測することになるため、鉄輝線及び吸収端のパラメータの自転位相に従った時間変動の情報も有用となる。鉄輝線および鉄吸収端の起源となる物質とその領域は十分に解明されていないが、候補として相手の星表面や光球面、相手の星からの星風などの中性子星から遠く離れた領域、あるいは中性子星周りに形成される降着円盤の内縁もしくは中性子星の磁場に沿った降着物質などの中性子星近傍の高密度な領域が挙げられる。特に、後者が起源となる鉄輝線、鉄吸収端を観測することができれば、強磁場中で降着するプラズマ流の物理情報を抽出することができる。そこで、降着駆動型 X 線パルサーにおける強磁場中での中性子星への降着を研究するために、降着駆動型 X 線パルサーの鉄輝線及び鉄吸収端を測定した。特に中性子星の自転位相を分割した位相別スペクトル解析を行い、鉄輝線及び鉄吸収端の変動を調査した。

第3章では本論文で用いた宇宙 X 線観測機器である X 線天文衛星「すざく」について簡潔に記述した。X 線スペクトルから輝線や吸収端の構造およびパラメータを精度よく決定するためには、十分なエネルギー分解能が必要となる。また位相別スペクトル解析を実施するため、十分な光子統計が必要となり、X 線望遠鏡により集光して観測することが必須となる。観測中のバックグラウンドはできるかぎり抑えることも重要な要素である。非常に大きな有効面積と鉄輝線及び鉄吸収端を測定するのに十分なエネルギー分解能、低バックグラウンドを実現する X 線天文衛星「すざく」によって、調査要件を満たすことができる。

第4章は、X 線天文衛星「すざく」による降着駆動型 X 線パルサーの X 線観測の概要について説明した。「すざく」衛星は科学的運用が終了した 2015 年 8 月までに、30 天体以上の降着駆

動型 X 線パルサーを 60 回以上観測した。それらの観測データを、天体そのものの明るさと観測条件、主に観測時間の長さを基準にして選別し、本博士論文では 23 天体、全 34 観測データを用いた。観測データの取得方法とそれらの最適化の詳細を説明し、観測から得られた光度曲線を示し、観測時の天体の状態について述べた。

第 5 章は、「すざく」衛星を用いた降着駆動型 X 線パルサーの鉄輝線、鉄吸収端に着目した時間平均および中性子星の自転位相に従った変動に関する観測結果を記述した。まずひとつの観測結果として、対象としたすべての天体の時間的に平均された X 線エネルギースペクトルから、鉄 K 殻輝線を検出した。また得られた X 線エネルギースペクトルを用いて、星間物質による光电吸収量と鉄輝線の等価幅を測定した。検出された鉄輝線の放射機構が蛍光であるとする、その等価幅は蛍光に寄与する物質質量に対して正の相関が期待される。蛍光に寄与する物質質量を光电吸収量で近似して、鉄輝線の等価幅の関係を調べると、概ね正の相関を示した。この結果は過去の研究報告に一致し、今回観測された鉄輝線が蛍光により放射されていることが確認できた。さらに中性子星の自転位相に従った X 線エネルギースペクトルの変化を詳細に調査した。その結果、これまで知られていた鉄輝線の強度変動に加えて、新しく、鉄吸収端での光学的厚みの変動を発見した。鉄吸収端での光学的厚みの自転位相による変動は、本論文によって初めて明らかになった降着駆動型 X 線パルサーにおける新たな現象である。

第 6 章で、得られた観測結果について議論し、筆者により独自に強磁場をもつ中性子星近傍の物質の物理状態に観測的に制限をつけた。観測された中性子星の自転位相に従った輝線強度の変動を説明するひとつのモデルとして finite light speed effect を提案した。非常に大きな蛍光領域の場合、光速度が有限である効果を考える必要があり、降着駆動型 X 線パルサーでは、X 線の照射される領域が時間によって変わるので、蛍光領域が観測者に近づく場合、単位時間当たりの蛍光の強度は強まり、離れる場合は弱まるというものである。この効果による蛍光輝線強度の時系列曲線を模擬するシミュレーションコードを開発し、「すざく」衛星で観測された鉄輝線の強度変動を再現できることを示した。さらに新たに発見した鉄吸収端での光学的厚みの中性子星の自転位相による変動の起源について議論した。この変化が現れる具体的な描像として、中性子星の磁場に捕獲され、中性子星の自転とともに回転する物質が、吸収端構造に寄与しているという解釈を提案した。この解釈をもとに、観測から得られた鉄輝線及び鉄吸収端のパラメータから、中性子星近傍の降着流のプラズマの電離度、物質密度、形状等の状態をはじめ観測的に制限をつけ、強磁場中での中性子星への降着の描像を明らかにした。

第 7 章は本論文のまとめである。