

氏名（本籍） <sup>あさみ</sup>阿佐美 ふ み（埼玉県）  
学位の種類 博士（理学）  
学位記番号 甲第 1034 号  
学位授与の日付 平成 26 年 3 月 20 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 **X-ray Study of Accretion-Powered Pulsar  
Hercules X-1 with Suzaku**  
(すざく衛星を用いた降着駆動型パルサーヘ  
ラクレス座 X-1 の研究)

論文審査委員 (主査) 教授 目黒 多加志  
教授 長嶋 泰之 准教授 辻川 信二  
准教授 松下 恭子  
連携大学院 物理学専攻 客員教授 玉川 徹

## 論文内容の要旨

本論文は、恒星と中性子星の連星系である降着駆動型パルサーヘラクレス座 X-1 からの X 線スペクトルにおいて、新たな放射成分の存在を示した結果である。降着駆動型パルサーは、伴星から降着した物質が中性子星の磁極に落ち込む際にその重力エネルギーを解放して X 線を放射していると考えられている。ヘラクレス座 X-1 は磁極からの放射の他にも多くの放射成分を持ち、特に鉄の K 輝線付近は複雑で、今までは経験的に磁極からの放射に加え、100 keV までの広帯域のデータでは 6.4 keV(中性鉄 K 輝線)から 6.7 keV(He-like 鉄輝線)輝線を合わせた広がったガウシアンモデルで合わせられており、10 keV までの狭い帯域のデータでは磁極からの放射が非常に高い吸収を受けた成分で表されてきた。このように従来の観測では、いくつかの鉄輝線が重ね合わされているだけなのか、または磁極からの放射のモデル化がうまくいっていないのか、別な成分が必要なのかといったことが分からなかった。そこで私は、広いエネルギー帯域、鉄輝線付近に高感度を持つすざく衛星のデータ 4 観測分を解析したところ、世界で初めて 6.4 keV, 6.7 keV の幅の狭い鉄輝線や磁極からの放射とは別に 4-9 keV の帯域に広がった放射成分が必

要なことを磁極からの放射モデルに依存しない形で示した。この成分を再現するモデルとしては部分吸収か、中心エネルギー6.5 keVで $\sigma = 1$  keV程度の幅を持った広がった輝線成分(6.5 keV 広輝線)が挙げられる。部分吸収であれば、常に吸収体が中性子星周辺にいるような描像を要求するが、そのような吸収体の存在は今まで知られていない。一方6.5 keV 広輝線であれば、光速の30%の速度を持つ物質からの蛍光輝線がドップラーブロードニングされたものが起源としてあげられる。このような速度は、磁極に落ち込む物質の自由落下速度で実現できるが、輝線の等価幅が大きく、落ち込む物質からは十分な輝線を生成することができない。よって、現在考えられている単純な描像では説明が難しいと言え、新たな吸収物質の描像や、周辺物質のジオメトリを考える必要がある。

降着駆動型パルサーとは、恒星と中性子星の連星系である。伴星から中性子星へは物質が降り積もり、中性子星まわりに円盤(降着円盤)を形成する。降着駆動型パルサーの中性子星は $10^{12}$  G、 $10^{15}$  cm<sup>3</sup>という非常に強い磁場と密度を持っており、強磁場中、高密度下での物理素過程を知る唯一の実験場と期待されている。中性子星を調べるにはそこからの放射を見るしかない。降着駆動型パルサーでは、伴星から降り積もった物質は降着物質の圧力と中性子星の磁気圧が釣り合うアルフベン半径(~1000 km)から内側では磁場に沿って中性子星の磁極へと落ち込む。このとき物質は重力エネルギーを解放しX線を放射(降着円筒放射)すると考えられている。そのため、中性子星からの情報を得るためにはX線を観測する必要がある。

本研究の対象天体であるヘラクレス座 X-1 は降着駆動型パルサーの代表とも言える天体で、X線観測の黎明期から盛んに研究されてきた。その結果、ヘラクレス座 X-1 の鉄の K 輝線付近の X 線スペクトルでは、降着円筒成分に加え、 $\sigma = 0.5$  keV 以上に広がったガウシアンか、降着円筒放射が高い吸収を受けた成分の存在が示唆されてきた。もし鉄輝線が広がっているとすると、輝線の重ね合わせや散乱、運動学的に広がっている可能性が考えられる。鉄輝線が運動学的に広がっているとすると、幅の広さから大きな速度が必要で、比較的中性子星に近い円盤内縁付近やその内側からの放射が見込まれ、中性子星近傍の物質分布や降着物質の運動を示す良いプローブとなる。さらに中性子星による重力赤方偏移が見えるような近傍からの放射だとすると、これは中性子星自体の質量や半径を知る手がかりとなる。そのため、鉄輝線付近の放射成分を知ることは非常に重要である。しかし、従来の観測ではエネルギー分解能や観測のエネルギー帯域の問題から、ヘラクレス座 X-1 の鉄輝線ふきんのスペクトルに見られた物が単に鉄輝線の重ね合わせなのか、それとも輝線とは独立した成分なのか、または狭い帯域での観測のため降着円筒放射のモデルがうまく決められずにいるフェイクな構造なのかは分からないままであった。そのため、今回今まで決着のついていなかったヘラクレス座 X-1 の鉄輝線ふきんの放射成分を明らかにし、考えられる周辺物質の分布や運動の

描像を検討する。

私は、ヘラクレス座 X-1 の X 線スペクトルに見られた鉄輝線付近の複雑な構造を詳細に調べるため、日本の X 線天文衛星「すざく」の観測データを用いた。「すざく」は 0.1-600 keV という現存の衛星では最も広いエネルギー帯域をカバーし、鉄輝線ふきんのエネルギー分解能も高いという特徴を持つため、今回の調査には最適の衛星である。観測時期による周辺環境の変化がある場合(吸収物質の変化のありなし)も考慮し、異なる年に観測された複数のデータを解析した。

X 線スペクトル解析の結果、私は観測時期に関わらずヘラクレス座 X-1 のスペクトルの 4.9 keV に広がった放射成分があることを世界で初めて示した。これは広帯域のデータを使っており、降着円筒放を表すモデルとして過去に使用された 3 つのモデルを試しているため、モデルに依存したフェイクな構造ではない。さらに、この広がった構造に加え中性鉄からの 6.4 keV、He-like 鉄からの 6.7 keV の幅の狭い輝線成分の存在も同時に示したので、鉄の狭輝線とは独立した成分であるといえる。

この 4.9 keV の広がった放射成分は、降着円筒放射が高い吸収を受けた放射成分モデル(部分吸収モデル)、または中心エネルギーが 6.5 keV で幅が  $\sigma = 1$  keV 程度、等価幅が  $\sim 650$  eV の非常に広がったガウシアンモデル(6.5 keV broad line)で表される。

前者の場合は、吸収体がヘラクレス座 X-1 のまわりに定常的にいることを要求する。しかし、過去の比較的広帯域の観測では高吸収は必要とされていないため、今回観測した時期にたまたま吸収が必要とされたとは考えにくい。また、スペクトルからは、吸収の場合みえるであろう鉄のエッジ構造もみえてはいない。以上から、少なくとも吸収で常に 4.9 keV の広がった構造を説明するのは難しいと言える。

後者の場合は、6.5 keV broad line の中心エネルギーから鉄輝線が何らかの機構によって広げられていることが考えられる。輝線の幅が広がる機構としては、1)輝線の重ね合わせ、2)Comptonization、3)ドップラーブロードニングがあげられる。

1)では、ヘラクレス座 X-1 の降着円筒放射の光度は非常に大きいので、周辺の物質は光電離されていると考えられているが、中性鉄の K 輝線は 6.4 keV、一番電離した H-like 鉄からの K 輝線は 6.93 keV であることから、 $\sigma = 200$  eV 程度にしか広がらず、観測された輝線幅を実現できない。

2)では、ヘラクレス座 X-1 の降着円盤上空にはコロナと呼ばれるガスの存在が過去の観測から示されているが、このガスによって鉄の K 輝線がコンプトン散乱を受けた場合、輝線幅は  $\sigma < 320$  eV となり、観測された輝線幅を説明するには不十分である。

3)で広げるには、高速で動く物質が必要だが、降着円盤内側の回転運動による可能性と降着物質が磁極に落ち込む時の可能性が考えられる。円盤内側の回転運動では速度が光速の 3%程度でエネルギーのシフトは 200 eV となり、今回観測された幅ほどシフトさせることはできない。一方磁極

に落ち込む物質では、アルファ半径より 1 桁中性子星に近いところでは光速の 30%ほどの速度となり、この時のエネルギーシフトは $\sim 1$  keV である。つまり、磁極に落ち込む物質からの輝線放射では、今回観測された幅  $\sigma = 1$  keV 程度には容易にエネルギーをシフトさせることができる。しかし、この場合磁極と落ち込む降着物質とのジオメトリを考えると、6.5 keV broad line の等価幅は最も効率が良い場合を考えても数 10 eV にしかならず、観測された値より 1 桁小さくなる。これを解消するには、磁極(光源)に対して落ち込む降着物質が非常に大きな立体角( $\sim 2\pi$ )を持つことを要求する。

以上から、今回ヘラクレス座 X-1 のスペクトルから得られた 4-9 keV に広がった構造の考えうる起源を検証した結果、単純な仮定では説明できず、今まで考えられてきた周辺物質の分布やジオメトリなどに大きな変更を要求する。

## 論文審査の結果の要旨

本論文はヘラクレス座 X-1 (以下 Her X-1) と呼ばれる、X 線で明るく輝く降着駆動型パルサーを、日本の X 線天文衛星「すざく」を用いて観測し、6.5 keV 付近に見られる「こぶ状成分」を観測的に明らかにした上で、その放射起源について考察したものである。

星が爆発した後に残される中性子星は、中性子の縮退圧で重力が支えられる不思議な天体である。半径 10 km 程度で、原子核の数倍の密度を持ち、 $10^8$  テスラにも及ぶ磁場を持つ天体が存在しているなど、宇宙における極限状態の物理を調べるための理想的な実験場である。一部の中性子星では、自転軸と磁軸がずれていることにより、観測者からは周期的に強い電波や X 線が観測され、パルサーと呼ばれる。今回、阿佐美氏が観測・解析した降着駆動型パルサーは中性子星と恒星の連星系であり、物質が中性子星に向けて落下し、磁力線に沿って磁極付近に落ち込むところで、衝撃波により重力エネルギー(運動エネルギー)が熱に変わることにより、X 線で明るく輝くパルサーである。物質が中性子星近傍まで落ち込んでいることから、中性子星の半径や内部の状態方程式を知る手がかりを与えてくれる天体であるが、その周辺環境など未知の部分が多く、観測による研究の新展開が待ち望まれている。

本論文は全八章から構成されている。第一章はイントロダクションである。降着駆動型パルサーについて簡単に説明した上で、論文の研究動機が端的に述べられている。

第二章は降着駆動型パルサーについてのレビューである。連星系の仕組み、物質の中性子星への降着、降着駆動型パルサーの X 線放射メカニズムなどが詳しく解説されている。また、X 線偏光観測により、降着駆動型パルサーの X 線放射メカニズムが一意に決定できることなどが説明されている。

第三章は本論文の観測対象となった、降着駆動型パルサーの一つである、Her X-1 についてのレビューである。伴星の性質を含む、連星系のパラメーター、本研究に関連する過去の X 線観測などが、わかり易くまとめられている。

第四章は「すざく」衛星に搭載された測定器について、本論文においてデータ解析する上で必要な情報がレビューとしてまとめてある。「すざく」衛星は、広いエネルギー帯域と、X 線 CCD を用いて、優れたエネルギー分解能を両立させた衛星であり、これらの観測装置の詳細が説明されている。また、データ解析の一部で用いた RXTE 衛星の全天 X 線モニターについても、簡単にまとめてある。

第五章は「すざく」による観測データのまとめと、今回の解析に使ったデータセットの詳細、スペクトルや光度曲線を求めた、データ処理についてまとめてある。

第六章はデータ解析とその結果についての詳細である。最初に Her X-1 の広エネルギー帯域スペクトルに対して、単純なべき関数で割り算をすることにより、スペクトル中の 6.5 keV 近辺に、幅の広い「こぶ状成分」が存在していることを端的に示している。その上で、過去に用いられてきたスペクトルの連続成分を表すモデルを 3 つ当てはめ、いずれでも「こぶ状成分」が統計的に有意に見られることを明確に示している。この「こぶ状成分」に対し、いくつかの放射モデル当てはめをおこない、部分的に電離した物質により吸収されたモデル、ガウシアン型の幅の広い輝線モデルのいずれかで説明することができることを示した。

第七章は前章で得た結果を、実際の中性子星周りの環境と照らし合わせ、どのような放射メカニズムが可能であるかについて、物理的に可能な案を一つずつ丁寧に検証している。最後に残った二つ（ブロップ状の高電離したプラズマの存在、もしくは、中性子星に落ち込む降着流からの放射）は観測結果とその考察からは区別できなかったものの、いずれも中性子星近辺の物質環境を知る上で重要な、新しい描像を与えてくれた。最後に、研究の今後の発展について、阿佐美氏の独自の見通しが書かれている。第八章は論文のまとめである。

本研究により、これまで存在が不明確であった 6.5keV 付近のこぶ状成分の存在が世界で初めて明らかにされた。これは、学術的に大きな研究結果である。阿佐美氏はこぶ状成分の放射起源についても丁寧に考察している。今回のデータ解析の限界を良く理解した上で、2つの放射メカニズムのいずれかであろうことを、論理的に示した。

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。