

氏 名 近藤 恵介

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2228 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 「すざく」衛星による X 線連星パルサー Hercules X-1 のパルス  
位相別スペクトル解析と X 線放射領域の研究

論文審査委員 主 査 坂尾 太郎  
宇宙科学専攻 准教授  
堂谷 忠靖  
宇宙科学専攻 教授  
国分 紀秀  
宇宙科学専攻 准教授  
尾崎 正伸  
宇宙科学専攻 准教授  
北本 俊二  
立教大学 理学部 教授

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏 名 近藤 恵介

論文題目 「すざく」衛星による X 線連星パルサー Hercules X-1 のパルス位相別スペクトル解析と X 線放射領域の研究

X 線連星パルサーは、強磁場中性子星と通常の恒星からなる近接連星系で、恒星から中性子星に向けて流れ込む物質の重力エネルギーを開放して X 線を放出しているため、降着駆動型パルサーとも呼ばれている。降着物質が開放するエネルギーによって形成される高温領域である「降着柱」およびその周辺から放射される X 線が、中性子星の回転に伴い見え隠れするため、パルスとして観測される。X 線連星パルサーとその周辺では、地上にはない高温・高密度や強磁場環境が実現している。したがって、X 線連星パルサーは、物質や光の相互作用を研究する上での実験室として価値が高く、重要視されている。

Hercules X-1 (Her X-1;ヘラクレス座 X-1) は、X 線天文学の初期から知られている代表的な X 線連星パルサーの一つである。Her X-1 は、1972 年の X 線パルスの発見以来、様々な研究がされてきたが、X 線放射機構そのものについては深い議論がされておらず、その後発見された多くの X 線連星パルサーと同様に、観測されたエネルギースペクトルの現象論的理解にとどまっていた。~0.1 keV から数十 keV の広範囲にわたる連続放射がパルス位相と共に複雑に変化するという観測スペクトルの特徴が、理解を難しくしている要因といえる。また、ベキ関数の高エネルギー側にカットオフがかかるという単純な現象論的なモデルで、多くの X 線パルサーの広帯域のスペクトルが比較的良く再現できたため、その放射機構について考察を深めようという必要性が、観測精度が向上する近年まで、高くならなかったことも一因と考えられる。

本研究では、X 線天文衛星「すざく」で観測した Her X-1 の X 線スペクトルを、パルス位相に分解して詳細に解析した。Her X-1 は、これまでの観測からパルス周期や連星系のパラメータなどが明確になっているため、スペクトル解析から X 線連星パルサーの放射機構を議論するのに最適な天体といえる。また、高銀緯に位置しているため星間吸収が極めて小さく、1 keV 以下の軟 X 線スペクトルまで十分観測できるという点でも適している。ただし、Her X-1 はパルス周期が 1.2 秒と短く、「すざく」搭載 XIS (X 線 CCD カメラ) の通常の露光時間 (8 秒) では、パルス周期を位相分解した観測はできない。そこで、露光時間を 0.1 秒に縮め、残りの 7.9 秒分の露光データを捨てるという特殊な観測モード (burst option) のデータを用いて、解析を行うことにした。実質的に使えるデータ量が 1/80 になるものの、これによりパルス位相ごとの解析をするのに十分な時間分解能を実現することができる。

解析は、一つの単純な仮定を出発点として行った。すなわち、中性子星の回転に伴う連続成分の変動は観測者から見た放射領域の射影面積の変化によるものであって、各放射領域からのスペクトル形自体は視線方向と放射領域のなす角度には依存しないというものである。この指針に沿って、パルス位相で区切った X 線スペクトル同士を組み合わせ、強

度比スペクトル（エネルギービン毎の X 線強度比をエネルギーの関数として表したスペクトル）を求める解析した。次に、位相変化に伴ってスペクトル形が変化せずに強度のみが変わる成分の存在を探すため、強度比スペクトルが定数となるエネルギー範囲を探した。そのエネルギー範囲では、一つの放射成分が卓越していると考えられる。さらに、適切なペアのスペクトルを適切な重みづけで引き算することで、その範囲で支配的な放射成分の抽出を試みた。そして、 $\sim 1$  keV 以下の低エネルギー帯で卓越する黒体放射様成分、 $\sim 2-6$  keV の中間エネルギー帯で卓越するベキ関数状成分、 $\sim 18$  keV 以上の高エネルギー帯で卓越する黒体放射様成分、の 3 つの本質的成分の候補を見出した。このうち、中間エネルギー帯のベキ関数状成分については、最新の理論モデルとの比較から、降着柱からの多温度黒体放射の現象論的なモデルになっていることが推測された。そこで、低温の黒体放射モデル、多温度黒体放射モデル、高温の黒体放射モデルの組み合わせで、位相別エネルギースペクトルの同時フィットを試みたところ、十分良く再現できることを確認した。この結果をもとに、過去に提案され、多くの X 線連星パルサーの観測スペクトルを良く再現できる現象論的モデル（NPEX: Negative and Positive power-law with an EXponential cutoff model）と本論文で得られた 3 成分との関係を議論するとともに、最新の放射モデルで示唆されている放射成分との対応について考察し、3 成分の理論的な裏付けについて検討を加えた。

このように、モデルに依存しないスペクトル解析から 3 成分の存在を導き出し、その関数形に制限を加えたのは、本論文の独自の成果である。これら 3 成分については、最新の理論モデルから予想される放射成分とも整合する結果になっていることから、今後 X 線パルサーからの X 線放射スペクトルを記述するモデルとして、多くの X 線パルサーへの適用が期待される。

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏 名 近藤 恵介

Title  
論文題目 「すぎく」衛星による X 線連星パルサー Hercules X-1 のパルス位相別スペクトル解析と X 線放射領域の研究

本論文は、代表的な X 線連星パルサーのひとつであるヘラクレス座 X-1 (Hercules X-1) を対象として、「すぎく」衛星の観測データをもとに、独自の着想による解析を行い、その X 線放射機構および放射領域の解明を試みたものである。X 線連星パルサーからの X 線放射については、もっぱら経験的なモデルがスペクトル解析に使われて来たが、本論文では、モデルに依存しない解析で、複数の放射成分の存在を明らかにし、そのスペクトル形について制限を加えたところに独自性がある。

本論文は、全 5 章からなる。第 1 章では、introduction として、X 線パルサーの観測の歴史、質量降着の geometry、放射領域の構造や放射機構に関する過去の研究、ヘラクレス座 X-1 の特徴、X 線天文衛星「すぎく」、データ解析手法などが説明されている。X 線連星パルサーは、強い磁場を持つ中性子星と大質量星（まれに小質量星）との近接連星系で、伴星からのガスが中性子星に落ち込む際に、重力エネルギーを解放してガスが高温になることで X 線を放射する。中性子星に落ち込むガスは、最終的には中性子星の磁場に沿って落下するようになり、中性子星近傍で定在衝撃波を生じ、円柱状の高温プラズマ（降着柱と呼ばれる）を形成する。この降着柱が中性子星の自転により見え隠れすることで、X 線パルスが生じると考えられている。これらの説明の後、X 線パルサーの放射成分の同定とそのスペクトル形をモデルに依存しない解析から明らかにするという本論文の目標が設定され、その目的達成に最適なデータとして、X 線天文衛星「すぎく」によるヘラクレス座 X-1 を選んだ理由が明快に説明されている。また、データ解析にあたっては、X 線パルサーからの各放射成分は、中性子星のスピンの伴う視線方向と放射領域のなす角の変化により、強度は変化するもののスペクトル形は変化しないという前提を採用することが、その背景とともに説明されている。

第 2 章では、「すぎく」によるヘラクレス座 X-1 の観測の説明、採用した特殊な観測モード、データ処理の方法が簡潔に記述されている。

第 3 章は、Analysis and Results について記述してあり、本論文の中心となる章である。出願者は、パルス周期を 5 つの位相に分け、各位相ごとのスペクトルを作成し、さらに様々なスペクトルの組について、その比を作成した。出願者は、解析にあたって採用した前提から、あるエネルギー帯でひとつの放射成分が卓越すれば、そのエネルギー帯ではスペクトルの比が一定になることに着目し、実際に 3 つのエネルギー帯で比が一定になっていることを、統計的な検定で明らかにした。さらに、適切な組のスペクトルについて、適切な重み付けで差分を取ることで、各エネルギー帯で卓越する放射成分のスペクトル形を明らかにした。その結果、約 1 keV 以下で卓越する低温の黒体放射成分、約 2-6 keV の中間エ

エネルギー帯で卓越する、カットオフを伴う冪関数成分、約 18 keV 以上で卓越する高温の黒体放射成分、の3つの成分を明らかにした。これは出願者独自の、モデルに依存しない解析手法によって得られた、オリジナルな結果である。さらに出願者は、中間エネルギー帯で卓越する、カットオフを伴う冪関数について、X線パルサーの放射領域の最新理論モデルとの比較から、これが降着柱からの多温度黒体放射に対応すると解釈した。そこで、降着柱からの多温度黒体放射を記述するために既存のモデルを拡張し、実際にそのモデルで全ての位相のスペクトルを再現できることを示した。このように、代表的なX線パルサーであるヘラクレス座 X-1 のX線放射が、低エネルギー帯で卓越する(低温の)黒体放射、中間エネルギー帯で卓越する多温度黒体放射、高エネルギー帯で卓越する(高温の)黒体放射、の3つの重ね合わせで説明できることを実際の観測データに基づき示したのは、大きな成果である。

第4章の Discussion では、上記の結果が、解析の前提となっていた、スピンの伴うスペクトル変化は、スペクトル形は変わらず強度のみ変化する放射成分の重ね合わせで再現できる、という前提と整合していることが説明された。さらに、各放射成分の特徴や物理パラメータについて、最新の理論モデルと比較するとともに、磁場による放射の異方性や、重力による光の進路の曲がり方など、現状のモデル化の限界についても適切な説明がなされている。

第5章では、Conclusion として、本論文で採用した解析手法について振り返るとともに、同様な解析手法が、他の明るいX線パルサーにも幅広く応用されることが期待されると結んでいる。

以上、本論文はX線パルサーであるヘラクレス座 X-1 からのX線放射を、モデルに依存しない独自の解析手法を用いて3つの放射成分に分離し、各々の放射領域を最新モデルとの比較から同定するとともに、その放射機構についても新たな知見を与えた。本論文の成果は、X線パルサーの放射機構の理解を、観測の視点から大きく前進させるものであり、当該分野の学術の進展に大きく寄与するものである。よって、審査委員会は、本論文が博士論文として十分な水準に達していると判断した。