

【学位論文審査の要旨】

1 研究の目的

白色矮星と晩期型星の連星系のうち、晩期型星から白色矮星へ質量降着が起きているものを、広く「激変星」と呼んでいる。降着物質は角運動量を持っているため、白色矮星の回りに、幾何学的に薄い「降着円盤」を形成しながら白色矮星へと落ちて行く。激変星はその過程で解放される重力エネルギーを使って、赤外線から硬X線までの広い波長帯で電磁波を放射している。

激変星の中でも、降着円盤の熱不安定性のために、可視光で2~5等級の増光を繰り返す天体を「矮新星」と呼んでいる。矮新星では、降着円盤は局所的なケプラー速度で回転しているいっぽう、白色矮星の表面の自転速度は一般的にはこれよりはるかに遅いため、降着円盤の最も内側の領域では、降着ガスが白色矮星との激しい摩擦のために急加熱される。この領域を「境界層」と呼んでいる。静穏時には質量降着率が低いため、この急加熱に放射冷却が追いつかず、その結果、降着物質は一気に温度 $10^7 - 10^8$ Kにも達する光学的に薄い高温プラズマとなる。静穏時の矮新星からのX線は、この境界層から放射される。

矮新星からのX線の観測の歴史は長く、すでに1970年代の終わりには最初のX線がU Gem（ふたご座U星）から検出されていた。しかしその後は、静穏時のX線が境界層から放出されているという理解には到達したものの、境界層の物理状態の理解はほとんど進んでいない。これにはいくつかの理由があるが、その最たるものは、境界層の幾何学的複雑さにある。対照的な例として、同じ激変星の種族の一つである、白色矮星が強い磁場を持つ強磁場激変星がある。強磁場激変星では、降着物質は白色矮星近傍で磁力線に沿って降着し、最終的にはその表面付近で、強い衝撃波を経て高温プラズマを形成するため、X線放射領域の物理状態は、基本的に一次元問題として扱える。この場合、質量、運動量、エネルギー保存の3法則を用いれば、プラズマの流速、密度、温度を解くことができる。このような幾何学的な簡単さのため、強磁場激変星の高温プラズマの理解は既に円熟期に入っている。これに対して矮新星では、(1) 境界層の入り口が白色矮星表面からどの程度の距離にあるのかがわからない、(2) 衝撃波が極端な斜め衝撃波となるため、どの程度の温度にまで加熱されるのかが不明、(3) 加熱された後のプラズマが二次元流なのか、三次元問題として扱わないといけないのかが直観的にはわからない、などの問題がある。

本研究は、このような混沌とした状況に一石を投じるため、矮新星の静穏時に卓越する境界層からの硬X線を系統的に解析し、その物理状態の解明を目指すものである。

2 研究の方法と結果

研究にあたっては、主に、欧州のXMM-Newton衛星の観測データを用いることとした。XMM-Newton衛星には、2000年の打ち上げ以来蓄積されてきた膨大な量の観測データがある。

有効面積が大きいいため、X線天体としては特別明るいわけではない矮新星の分光観測を行うには最適の衛星である。*XMM-Newton*衛星での観測時期を、AAVSO (American Association of Variable Star Observers) の可視光光度曲線と照合した結果、*XMM-Newton*のデータベースから、19個の矮新星について、25個の観測データを得ることができた。さらに、複数回の観測が行われている矮新星については、日本が2005年に打ち上げた*Suzaku*衛星、米国が2017年に打ち上げた*NICER*衛星のデータも動員して、境界層からのX線の長期的な時間変動についても調べた。

研究にはX線分光の手法を用いた。*XMM-Newton*衛星、*Suzaku*衛星、*NICER*衛星それぞれのデータに標準的なデータ処理を行ってX線エネルギースペクトルを導出し、これを適切なモデルで評価することによって、境界層プラズマの最高温度、質量降着率などの物理パラメータを得た。スペクトルの評価には、NASAゴダード宇宙飛行センターが公開しているスペクトル評価ツールであるXSPECを用いた。スペクトルモデルは、光学的に薄い多温度プラズマからの放射モデルを軸に、そのスペクトルが白色矮星表面や降着円盤から反射された場合のモデル、および反射体から放射される6.4 keVの中性の鉄K α 線を足し合わせたもので構成される。光学的に薄い多温度プラズマからの放射モデルとしては、銀河団のcooling flowからのX線スペクトルを表現するために作られたvmcflowモデル、及びemission measure (電子密度と水素密度の積をプラズマの体積で積分した量) を、プラズマ温度のべき関数として変えることのできるcevmklモデルの両者を系統的に試し、cevmklモデルの方が観測されたスペクトルを良く表現できることを確認した上で、こちらを用いることとした。

スペクトルを評価して得られた個々の矮新星の質量降着率を、それぞれの軌道周期に対してプロットしたところ、軌道周期が短い矮新星ほど、質量降着率が少ないという明確な相関を得た。これは降着理論が予想するところと傾向は一致するが、その大きさは理論予想の1/100程度以下にしかない。その原因として考えられるのは白色矮星の自転である。白色矮星の自転速度がケプラー速度に比べて無視できない程度に大きければ、境界層での重力エネルギーの解放は自転速度が無視できる場合に比べて小さくなるので、見かけの質量降着率は減少する。しかし白色矮星の自転周期が判明している7個ほどの矮新星について、期待される質量降着率を見積もったところ、観測された降着率の方が理論予想よりも系統的に小さいという結果になった。このことから境界層付近で何らかの円盤風などによって実際に質量損失が起きているものと考えられるが、詳細は今後の研究課題である。

次に、プラズマの最高温度を軌道周期に対してプロットしたところ、軌道周期が長い矮新星ほど、境界層の最高温度が高いことがわかった。ただし、白色矮星の質量分布を調べたところ、軌道周期が短いほど、白色矮星の質量が小さい傾向があることがわかった。そこで、個々の矮新星のプラズマの最高温度を、それぞれの白色矮星質量に対してプロットしたところ、白色矮星の質量が大きい矮新星ほど、プラズマの最高温度が高いという明確な相関を得た。最高温度を定量的に調べたところ、いずれの天体でも、白色矮星に自由落下する降着物質が強い衝撃波を通過した時に到達する温度の、概ね60%であることがわかつ

た。これは強磁場激変星の場合と違い、矮新星の衝撃波が斜め衝撃波であることに由来していると考えられる。この結果は、今後、境界層入り口でのプラズマ加熱機構モデルを構築する際に満たすべき条件の一つとなると考えられる。

矮新星VW Hyi (みずへび座VW星) では、*XMM-Newton*の観測データの他に、*Suzaku*に3回、*ASCA* (1993–2001) に2回の観測データがあったため、これらを全て同様の手法で解析し、質量降着率のデータを得た。その質量降着率を、直前の矮新星爆発開始からの時刻でプロットしたところ、質量降着率が時間とともに減少する明確な傾向を得た。減少率は $-2.2\% \text{ day}^{-1}$ であった。この結果は、過去の研究において、X線の光度曲線 (カウントレート曲線) から得られた結果と整合しているが、本論文の結果は光度曲線ではなく、分光観測から求めた質量降着率そのものに立脚しているため、信頼性としては格段に高いものとなっている。

NICER 衛星のデータを用いて、VW Hyi と同様の解析を矮新星 SS Cyg (はくちょう座 SS 星) に対しても行った。残念ながらこちらの方は通常の矮新星爆発 (*outside-in outburst*) ではなく、爆発が内側から始まるタイプ (*inside-out outburst*) であったため、静穏時とされていた観測期間中に矮新星爆発のデータが含まれてしまっていると考えられ、質量降着率の時間変化については明確な結果が得られなかった。それでも、可視光光度曲線が減衰している期間全般にわたって、質量降着率が巨視的には $-2.5\% \text{ day}^{-1} \sim -1.9\% \text{ day}^{-1}$ の割合で減少していることが確認できた。

3 審査の結果

本研究は、*XMM-Newton*衛星の大有効面積という特長を活かしつつ、観測対象に応じて他の衛星のデータも用いることで、未解明の点が多かった矮新星静穏時の境界層について、一定の理解に到達したという点で評価に価する。まず、プラズマの最高温度と白色矮星の質量の関係には、過去の研究ではサンプル数が少なかった上に、明確な相関も見られなかった。これは矮新星のX線スペクトルに対する理解の不足が招いた結果である。中庭君は、その後に蓄積された*XMM-Newton*の観測データを総動員し、近年、理解が進んできたX線スペクトルの知見と併せることで、プラズマの最高温度と白色矮星の質量の間に、初めて明確な相関を見出した。このことは、今後、境界層入り口におけるプラズマ加熱機構を考える際に満たすべき条件の一つとなる。また、質量降着率と軌道周期の関係においては、X線スペクトルの知見のほかに、*Gaia*衛星による天体までの距離測定の結果を利用することで、矮新星のX線光度をより正確に見積もることができるようになったことが大きく効いている。静穏時におけるVW Hyi、SS Cygの境界層を通しての質量降着率の時間発展については、これまでのカウントレートに基づいた不定性のある議論に対し、質量降着率そのものをスペクトルから評価することで、質量降着率が一日あたり数パーセントの割合で減少していることを、初めて確実なものとした。この事実は、静穏時には質量降着率が増加することを予想している理論モデルに一定の変更を促すことになる。理論モデルに反して質量

降着率が減少している原因の特定には至らなかったものの、いくつかの可能性を検討し、何らかの質量損失が起きているらしいことを突き止めた。たとえば降着円盤から吹き出す円盤風のようなものが考えられるが、そうしたものが本当に存在するなら、2022年度に打ち上げられる日本のX線天文衛星XRISMで検証可能と考えられる。

以上のように本研究は、現時点で利用可能なあらゆる観測手段を動員し、独自の手法で静穏時矮新星の境界層の物理状態の理解を大きく前進させたものである。本論文の一部は既に査読つき学術誌に掲載されている。これらのことから、本研究は博士（理学）の学位に充分値するものと判定した。

4 最終試験の結果

本学の学位規定に従って、最終試験を行った。公開の席上で論文内容の発表を行い、物理学専攻教員による質疑応答を行った。また、論文審査委員による本論文および関連分野の試問を行った。これらの結果を総合的に審査した結果、合格と判定した。