

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03623

研究課題名(和文) プラズマ降着流からのX線放射を用いた強磁場激変星の質量及び半径の同時決定法の確立

研究課題名(英文) Mass and Radius determination of magnetic cataclysmic variables utilizing X-ray emission generated from accreting plasma flows

研究代表者

森 英之 (Mori, Hideyuki)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・招聘研究員

研究者番号：20432354

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：強磁場激変星 RX J1712.6-2414 から放射されたマグネシウム、ケイ素、硫黄の特性X線の中心エネルギー値が、視線方向速度に換算して 200 - 500 km/s ほど低いことを発見した。従来のプラズマ降着流モデルから推定される落下速度(100 km/s 程度)によるドップラーシフトより有意に大きく、連星系の固有運動など他の様々な可能性を考慮しても説明できない量であった。結果的にエネルギーのずれは、主星である白色矮星の重力赤方偏移と解釈するのが自然である。白色矮星表面の重力ポテンシャルが観測量として直接求められたことで、その質量が太陽質量の 0.9 倍以上であると見積もられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、強磁場激変星におけるX線スペクトルの重力赤方偏移を世界で初めて検出した。X線は白色矮星表面近傍から放射されるため、星表面での重力ポテンシャルの深さを観測量として直接測定できることになる。したがって、可視光光度曲線の変動から求まる連星質量比や、X線スペクトルから衝撃波加熱されたプラズマの最大温度を推定して重力ポテンシャルを求める方法とは独立に、白色矮星の質量を推定する新たな手法を与える。また従来のプラズマ降着流モデルから計算されるドップラー効果よりも輝線エネルギーのずれへの寄与が大きく、重力赤方偏移を反映したセルフコンシステントなX線スペクトルモデルの構築が必須であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We detected significant redshifts from characteristic X-ray emission lines of hydrogen-like magnesium, silicon, and sulfur ions in the X-ray spectra of RX J1712.6-2414, a magnetic cataclysmic variable, which were obtained from the Chandra High-Energy Grating observation. These redshifts were significantly larger than the Doppler shifts of the corresponding elements contained in plasma flow accreting onto a white dwarf (WD), harbored in RX J1712.6-2414. While the line-of-sight plasma velocities are estimated to be ~ 100 km/s from the prevailing accretion-flow model, those derived from the redshifts were in a range of 200 - 500 km/s. We considered several effects to mitigate the discrepancy of the energy shifts. Finally, we concluded that a gravitational redshift is a main contributor, which enables us to directly measure the gravitational potential near the WD surface. Hence, it provides us with a new method of the mass determination; the WD mass was estimated to be $> 0.9 M_{\text{sun}}$.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学 強磁場激変星 白色矮星 重力赤方偏移 プラズマ物理

1. 研究開始当初の背景

白色矮星は、遠方銀河までの距離を測るための有効な手段を与える宇宙論的天体である。白色矮星が炭素燃焼型 (Ia 型) 超新星爆発を起こす時の光度は $10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ と一定であるという仮定の下、数多くの銀河の距離を推定することで宇宙の加速膨張が確かめられた (Perlmutter, Schmidt, and Riess, 2011 Nobel Prize)。しかしながら、銀河の形態や宇宙の歴史によらず爆発時の光度が一定であるという仮定については、十分な検証がなされているとは言えない。Ia 型超新星爆発は従来、白色矮星の質量がチャンドラセカール限界を超えた時に暴走的核融合反応が起こって生じると考えられてきた。そのため爆発メカニズムは、星の内部構造に強く依存する。しかし近年、軽い白色矮星同士が衝突合体するシナリオも提示されており、限界質量以下で爆発が起こる可能性も示唆されている (Hillebrandt & Niemeyer 2000)。

白色矮星の内部構造を解き明かすためには、圧力と密度の関係、つまり状態方程式の解明が欠かせない。電子縮退した星の状態方程式については様々なモデルが提唱されているが、**白色矮星の質量と半径という基本観測量すら同時に精密決定することが困難である**ことから、未だ十分な解明には至っていない。星の質量決定には、通常連星系の軌道運動が利用される。光度変動から質量関数が分かるものの、そこには軌道傾斜角の不定性が残る。一方、白色矮星を主星とする近接連星系の一種である、強磁場激変星 (magnetic Cataclysmic Variables, mCVs) からの X 線スペクトルを用いた質量推定法が、近年計算機の進化とともに精密化されている (Suleimanov et al. 2005, Hayashi et al. 2018)。

X 線スペクトルによる質量推定では、白色矮星の重力ポテンシャルを直接算出するため、軌道傾斜角の不定性は含まれない。しかし X 線スペクトル算出の元となる、質量降着流モデル全てにおいて、衝撃波により加熱された降着流プラズマは放射によって全エネルギーを失い、白色矮星表面での着地速度がゼロになることを仮定している。mCVs からの X 線スペクトルには、白色矮星表面から放射されていると推測される未知の黒体放射成分が検出されており、プラズマの内部エネルギーは一部運動エネルギーとして白色矮星に吸収される可能性が示唆されている。白色矮星半径の決定方法の確立に向けて、黒体放射を含む全ての物理素過程を取り込んだ X 線放射モデルの構築が進められているが、その妥当性を保証するためにも着地速度ゼロの境界条件に対する検証は必須と言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、Chandra 衛星の獲得済み観測データを用いて、白色矮星表面近傍のプラズマ降着流の速度場を世界で初めて直接決定することにある。さらに、得られた物理構造を忠実に反映したプラズマ降着流モデルを計算機上で再現した上で、新たな X 線放射モデルを構築する。Chandra/「すざく」衛星で得られた X 線スペクトルにこの放射モデルを適用することで、白色矮星の質量と半径を同時に精密に決定する手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、Chandra 衛星で獲得済みの RX J1712.6 - 2414 のデータを用いて、白色矮星表面近傍に形成されるプラズマ降着流の速度場を観測的に求める。まず 自転周期の位相毎に分割した X 線スペクトルを作成し、特性 X 線の中心エネルギーを精密に決定してドップラーシフトを検出する。特性 X 線の中心エネルギーの決定精度が本研究の成否の鍵を握るため、申請者らは Chandra 衛星の分散型分光器による長時間観測を実施し、最高のエネルギー分解能と光子統計をもった X 線スペクトルを獲得した。特性 X 線が検出できれば、電離度に応じてプラズマの電子温度を算出できる。次に、得られたプラズマの速度と温度の観測量 (v, T_e) を、現行の X 線放射モデルの計算で使われる降着流モデルの理論値と比較する。観測値がモデルとずれていた場合には、得られた (v, T_e) を元に改めて降着流内部構造の方程式を解きなおす。さらに コンプトン散乱過程を加えた新たな X 線放射モデルを構築する。RX J1712.6 - 2414 を始めとした mCV 全てについて、Chandra/「すざく」衛星で得られた良質の X 線スペクトルにこのモデルを適用して、質量と半径の精密同時決定に挑む。

4. 研究成果

Chandra 衛星で得られた、強磁場激変星 RX J1712.6 - 2414 の X 線精密分光データの解析を行った。マグネシウム、ケイ素、硫黄の特性 X 線のエネルギー中心値が、有意に低エネルギー側にずれている (赤方偏移している) ことを発見した (図 1 参照)。これらのエネルギーのずれは、輝線を放射するプラズマの視線方向速度にして 200 - 500 km/s に対応する量であった。これまで広く使われている降着流モデルにおいて、現実的な白色矮星質量・磁場・質量降着率の仮定の下でエネルギー・運動量方程式を解いて得られる、各元素の降着速度に伴うドップラーシフト (100 km/s 程度) を優に超える偏移であった。連星系の固有運動による視線方向速度や降着流プ

ラズマの光学的厚みが輝線のエネルギー中心値に与える影響など、様々な効果を丁寧に検討した結果、輝線の中心エネルギーのずれは RX J1712.6 - 2414 の主星である白色矮星の重力ポテンシャルによる重力赤方偏移が主要因である、との結論に至った (Hayashi et al. 2023)。強磁場激変星の X 線スペクトルからの重力赤方偏移の検出は世界初であり、申請者らが獲得した分散型 X 線分光器を活用した長時間観測によって初めて可能になったものである。

降着流の X 線放射領域は白色矮星表面近傍であるため、本結果は白色矮星表面の重力ポテンシャルの深さを観測的に直接測定したことになる。X 線スペクトルから求まる衝撃波加熱されたプラズマ降着流の最高温度を元に推定する従来の方法とは、独立かつモデルに依存しない形で重力ポテンシャルを決定できるため、新たな白色矮星質量の決定手法を与えることになった。RX J1712.6 - 2414 の白色矮星質量は太陽質量の 0.9 倍以上と見積もられ、従来の X 線スペクトルで得られた推定質量 (0.6 - 0.8 太陽質量) より重いことが分かった (図 2 参照)。

本研究では、当初自転周期の位相毎に分割した X 線スペクトルを作成し、輝線の中心エネルギーの位相変調を使って降着流内部におけるプラズマ速度を算出する予定であった。しかし降着流を比較的直上から見ている RX J1712.6 - 2414 において、プラズマの視線方向速度に基づくドップラーシフトよりも重力赤方偏移の寄与が大きいことが分かったため (さらに重力赤方偏移は降着流の幾何学的構造に依存しない)、プラズマ速度の算出は慎重に進めざるを得なくなった。また放射モデル構築の際には、従来考慮されていなかった白色矮星の重力赤方偏移の効果を取り込み、セルフコンシステントな X 線スペクトルモデルを作成する必要が出てきた。従来の手法とは異なる質量推定値が得られたことから、より一層物理素過程を忠実に取り込んだモデル計算が必須となってきている。

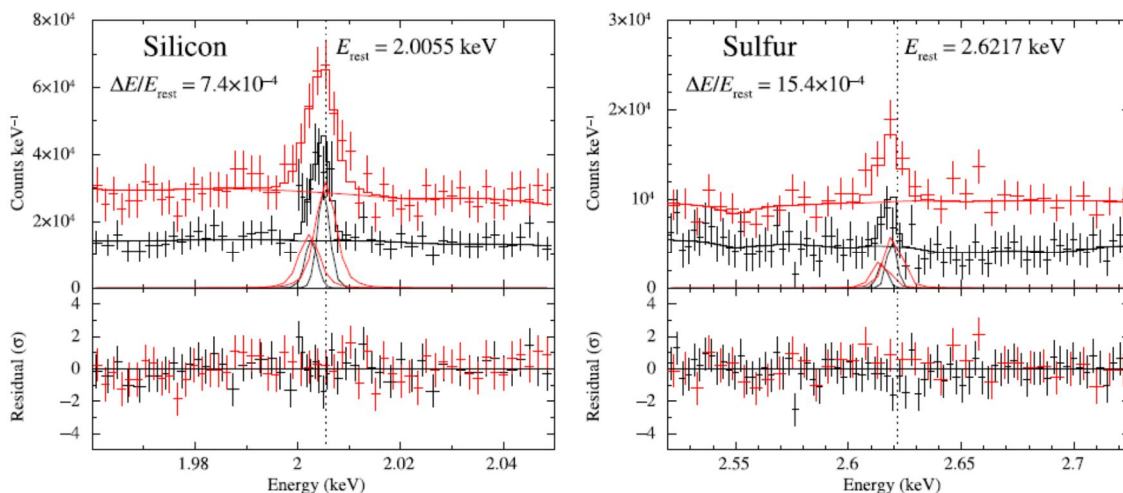


図 1 Chandra 衛星で得られたケイ素、硫黄の特性 X 線スペクトル。実線はモデルを示しており、データとモデルの残差は下段にプロットされている。縦の破線は特性 X 線エネルギーの理論値であり、実データはそれよりも低い (赤方偏移した) エネルギーでピークを示している。

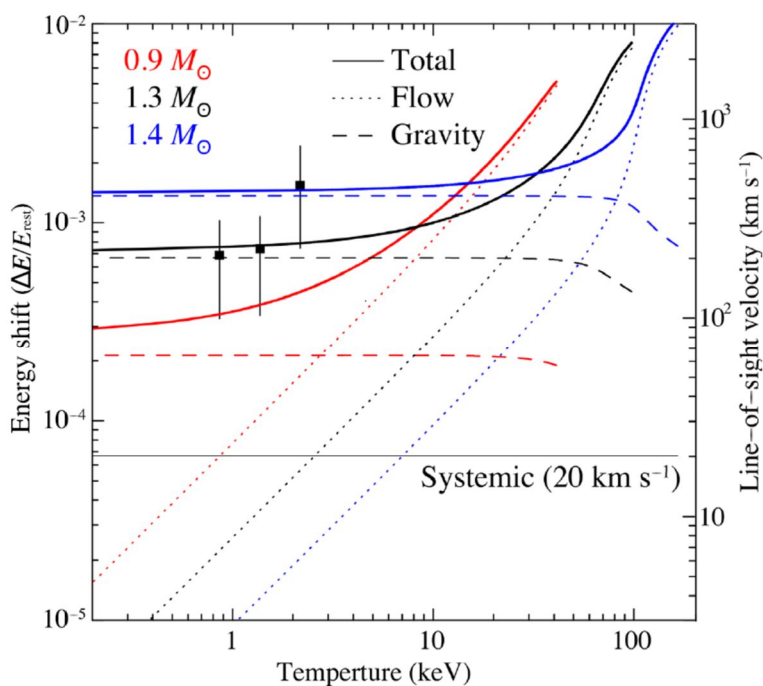


図 2 RX J1712.6 - 2414 の降着流プラズマにおける温度 (横軸) と速度 (縦軸) の関係。速度は、マグネシウム、ケイ素、硫黄の特性 X 線エネルギーのずれから算出している。温度は、各元素イオンを代表するプラズマ温度を示す。実線はそれぞれ、0.9 (赤), 1.3 (黒), 1.4 (青) 太陽質量を仮定した時の理論曲線を示す。内訳は、連星系の固有運動 (実線)、プラズマの落下速度に伴うドップラーシフト (点線)、重力赤方偏移 (破線) である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hayashi Takayuki, Mori Hideyuki, Mukai Koji, Terada Yukikatsu, Ishida Manabu	4. 巻 953
2. 論文標題 Gravitational Redshift Detection from the Magnetic White Dwarf Harbored in RX J1712.6?2414	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/acd001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hideyuki Mori, Takayuki Hayashi, Manabu Ishida, Yukikatsu Terada, Yoshitomo Maeda
2. 発表標題 X-ray observation of a diskless intermediate polar, RX J1712.6-2414, with Suzaku
3. 学会等名 44th COSPAR Scientific Assembly（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林多佳由、森英之、向井浩二、石田学、寺田幸功
2. 発表標題 強磁場激変星 RX J1712.6-2414 からの重力赤方偏移
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------