

矮新星 V1504 Cyg における公転軌道面から傾いた降着円盤による可視光変動解析

システム理工学専攻
宇宙観測システム研究

MF20043 関 亮 輔^{せき りょうすけ}
指導教員 久保田 あや

1 背景と目的～白色矮星と降着円盤～

太陽のような恒星は中心核で水素が核融合する事で核エネルギーを解放し、明るく輝いている。中心の水素を使い尽くすと、ヘリウムの核燃焼によって炭素や酸素が生成される。太陽程度の質量の恒星ではこの段階で核融合反応が止まり、コアが重力収縮を起こし、白色矮星 (White Dwarf; 以降 WD) という超高密度の天体が形成される。WD が通常の恒星と近接連星系を成していると、恒星表面のガスが WD の重力に引かれ、WD の周囲に降着円盤という回転ガス円盤を形成する。ガスは粘性摩擦により力学的エネルギーを熱エネルギーに変えながら WD に落ち込んでゆき、降着円盤は熱放射により明るく輝く。このような天体を激変星と呼ぶ [1]。激変星はガスを降着し続けるといずれ超新星爆発を起こす。超新星爆発によって宇宙空間には元素が撒き散らされ、これらは新たな星の誕生の元となると考えられている。どのように WD にガスが降り注いでゆくかを知る事は、星の進化、そして新たな星の誕生を理解する上で、きわめて重要である。本研究では、地球型の太陽系外惑星探索衛星 Kepler[2] で観測された激変星 V1504 Cyg の放射強度の時間変動を解析する。特に、円盤が連星の公転軌道面から傾いて歳差運動する事で生じると考えられる super-orbital signals という数日程度の時間変動現象 [3] に着目し、傾いた円盤という描像を一般化していく。

2 激変星の時間変動

激変星の明るさの変化は主に単位時間に落ちこむガスの質量 (質量降着率 $\dot{M}$) の変化によるものである。恒星からのガス (主成分は水素) が WD に落ち込む際、最初のうちは降着円盤外縁部に留まり、なかなか内側まで落ちない。この状態を静穏状態と呼ぶ、一定量のガスがたまると温度が水素の電離温度 ($\sim 10^4 K$) に達し、一気にガスが WD まで落ち込み明るくなる (アウトバースト)。その後、降着円盤の密度と温度が下がり再び静穏状態に戻る。このような現象を 10 日から数 100 日の間隔で繰り返す激変性を矮新星と呼ぶ [1]。図 1(左) は、本研究で解析する矮新星 V1504 Cyg の Kepler 衛星で得られた波長 430～890nm の光度曲線であり、10～25 日の時間スケールで明るさが大きく変化している事がわかる。横軸は観測開始 (2009 年 6 月 20 日) からの日数で、縦軸は単位時間当たりのカウントレートである (e: ケプラー電子カウント)。この光度曲線は、Space Telescope Science Institute が管理するデータアーカイブ Mikulski Archive for Space Telescopes[4] にて一般公開されている。本研究で使用するデータセットは積分時間が約 1 分の Short Cadence データ

で、観測期間を 48 個に分割した形で公開されている。このデータセットのうち補正された光度曲線である PDCSap Flux を用いた。また、図 1(右) は図 1(左) の 450～451 日を拡大したものであり、周期 0.07 日 (=1.68 時間) 程度の短時間の光度変動が存在する事がわかる。この短時間変動は、連星の公転運動による変動と、傾いた円盤の歳差運動と公転運動の差による変動 (negative superhump[3]) の重ね合わせと考えられる。Gies らは KIC 9406652 の観測データから super-orbital signals の周波数 f_{sup} と negative superhump の周波数 f_{NSH} 、および軌道周波数 f_{orb} の間に

$$f_{sup} = f_{NSH} - f_{orb} \quad (1)$$

の関係があることを示した [3]。

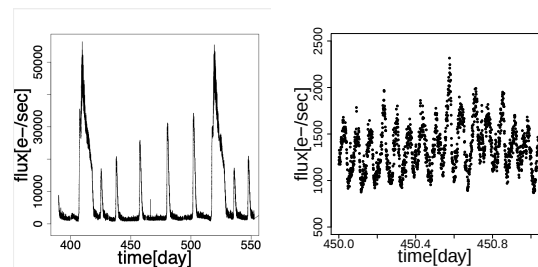


図 1: V1504 Cyg の光度曲線、(左) 観測開始から 390～560 日、(右) 観測開始から 450～451 日

3 データ解析

3.1 解析の準備

本研究で注目する変動は連星の公転運動と negative superhump、及び super-orbital signals によるもので、数時間、及び数日の時間スケールを示す。しかし、これらはアウトバーストによる数日以上でのグローバルな長期変動との足し合わせとなっている。長期成分を差し引くために、まず平滑化を行った。平滑化とは注目する変動の時間スケールよりも長い時間変化を均す事であり、今回は、重み付き線形最小二乗回帰による locally weighted scatter plot smooth(lowess)[5] の手法を用いた。解析には R プログラムを使用した。lowess は R にパッケージとして用意されている。lowess の実行における入力パラメータは一回の回帰を行う範囲 (平滑幅) であり、図 2(左) は図 1(右) を 10 日ごとに平滑幅 0.01 (すなわち 0.1 日) の条件で平滑化したものである。ただし、406.5～419、517.1～529.5 日の巨大なアウトバーストは同じパラメータでは平滑化できず、今後の解析から除くものとして表示していない。図 2(右) は 450～451 日の拡大である。

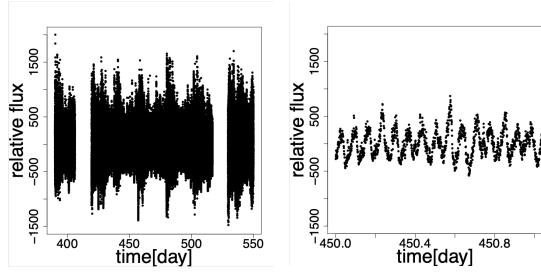


図 2: V1504 Cyg の光度曲線を平滑化したもの、(左) 観測開始から 390~560 日、(右) 観測開始から 450~451 日

3.2 negative superhump の検出

Phase Dispersion Minimization(PDM)[6] を用いて周期解析を行い、傾いた円盤が引き起こす現象の一つである negative superhump の周期の変動を定量化した。PDM は光度曲線のある周期で折り畳み、位相ごとの分散を計算する手法で、標準偏差の 2 乗を分散の 2 乗で割った統計量が小さいところが真の周期となる。平滑化したデータを用いて、軌道周期 1.669 時間 (周波数では 14.378/日)[7] より数%長い周波数 14.55~15/日の範囲を解析した。図 3(左) は、390~560 日の間で 8 日ごとに PDM を行い、統計量 0.95 以下の周波数を時系列で示したグラフである。ずらし幅は 0.5 日である。14.6~14.8/日に周波数が存在し、アウトバーストと同期して増光時に周波数が大きくなり、減光時に周波数が小さくなる事が分かる。この結果は先行研究 [7] と一致している。

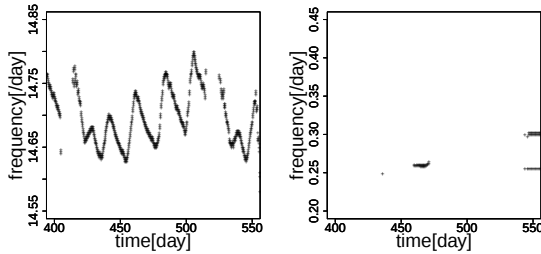


図 3: PDM による時系列周期解析結果、(左) 解析範囲 14.55~15/日 (negative superhump)、(右) 解析範囲 0.2~0.45/日 (super-orbital signals)

3.3 super-orbital signals の検証

3.2 の結果と式 (1) から super-orbital signals の周波数は 0.22~0.42/日と予想できる。図 3(右) は、周波数 0.2~0.45/日の範囲で、60 日ごとに PDM を行い、統計量 0.95 以下の周波数を時系列で示したグラフである。ずらし幅は 1 日である。図 3 より、この周波数範囲に有意な周期変動を確認できなかった。これは、衛星の軌道傾斜角が低い [8] 事が原因と考えられる。そこで、歳差運動による super-orbital signals は直接検出に代わり、歳差運動の位相の違いによって、光学主星からの円盤の照り返しの位相が変化する現象が見られるか検討した。この位相変化は木邑らによって KIC 9406652 で観測されている [9]。まず、

観測の時刻 t における negative superhump の周波数 $f_{NSH}(t)$ と軌道運動の周波数 $f_{orb}(t)$ /日に基づいて、式 (1) を用いてその時刻の super-orbital signals の周波数 $f_{sup}(t)$ を推定した。微小時間 dt の間に歳差運動の位相は $d\phi = \omega(t)dt$ ($\omega(t) = 2\pi f_{sup}(t)$) 変化するので、得られた $f_{sup}(t)$ を積分する事で時刻 t における位相を計算する事ができる。時刻 423 日を位相 0 の基準点として、super-orbital signals の位相を求め、降着円盤の位相を求めた。図 4(左) は算出した降着円盤の瞬間の位相から光度曲線を位相 0.0~0.25、0.25~0.5、0.5~0.75、0.75~1.0 の 4 グループに抽出した結果である。その後、4 分割した光度曲線それぞれに対して軌道周期で畳み込みを行った (図 4(右))。その結果、降着円盤の位相変化と共にピーク位相が 0.25 ずつスライドしていく様子を確認する事ができた。これは降着円盤の位相 0~0.25 の時、降着円盤からの放射光によって伴星の上部が最も明るく照らされる伴星の位相が 0~0.25 の時であるという描像で説明できる。

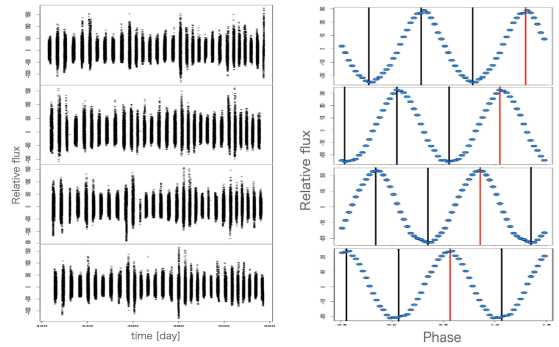


図 4: (左)V1504 Cyg の光度曲線を降着円盤の位相ごとに 4 分割したもの、(右) 左図それぞれを軌道周期で畳み込んだ結果

4 まとめ

V1504 Cyg の光度曲線から、傾いた降着円盤が引き起こす現象である negative superhump の周期変化を PDM を用いる事で確認した。また、もう一つの現象である super-orbital signals の周期の検出を PDM を用いて試みたが、検出する事ができなかった。そこで、negative superhump の周期からそれぞれの時間での降着円盤の位相を計算し、降着円盤の位相に応じて光度曲線を 4 分割し、軌道周期で畳み込んだ結果、ピーク位相が変化していく様子を確認した。この結果は、V1504 Cyg の降着円盤が傾いている期間がある事を示している。

References

- [1] 天文学辞典, <https://astro-dic.jp/>
- [2] NASA's Kepler Mission Official Summary, https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html
- [3] Gies, D. R., et al. 2013, ApJ, 775, 64
- [4] MAST, <http://archive.stsci.edu/index.html>
- [5] MathWorks, <https://jp.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-data.html>
- [6] R. F. Stellingwerf, 1978, ApJ, 224, 953
- [7] Osaki, Y., Kato, T., 2013, PASJ, 65, 22
- [8] Kato, T., et al. 2009, PASJ, 61, 395
- [9] Kimura, M., et al. 2020, PASJ, 72, 94