

激変星 KIC9406652 の Lasso 法による降着円盤の研究

Study of the accretion disk in KIC9406652 with Lasso

X線天文学研究室 BP16050 鈴木 拓海

指導教員：久保田 あや 准教授

1 背景と目的

激変星は白色矮星と普通の恒星からなる連星系である [1]。白色矮星の周りには伴星から流れ込むガスによって降着円盤が形成される。ガスがぶつかる点はホットスポットと呼ばれ明るく輝いている。その周期は常に一定の値ではなく、時間と共に変動している。その理由について、様々な説が唱えられてきたが、伴星からの質量輸送の増減によるものとする説が有力視されてきた。しかし、近年の観測・解析技術の向上によって、降着円盤の傾斜が原因であることが明らかにされた [2]。

従来、光度曲線に対する周期推定にはフーリエ変換による解析が行われてきた。しかし、フーリエ変換では欠損がある（スプース）データに対する解析をうまく行うことができない。このようなデータに対して有効な手法が Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) である。従来方法では近接した周期の分離を行うことは困難であった。しかし、Lasso を用いることでエイリアスに強い周期推定が可能となり、2 つ以上の周期の分離も期待できる。Uemura & Kato の研究 [3] では Lasso による変光星の周期変動の解析を行い、その有効性を示している。本研究の目的は、Lasso を用いて激変星の周期解析を行い、降着円盤の歳差運動のメカニズムを明らかにすることである。

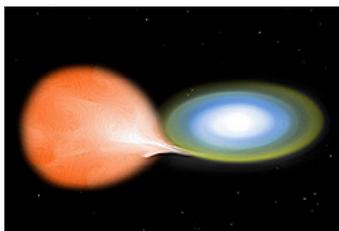


図 1: 激変星の想像図 [5]。左が低温星で右が白色矮星である。低温星の表面のガスが白色矮星に流れ込む際に降着円盤を形成している。

2 激変星の周期変動

激変星では軌道周期よりもやや短い negative superhump と呼ばれる周期的な変動が観測されることがある。その原因について様々な説が唱えられてきたが、Smak の EMT model が有力視されていた [7]。降着円盤の歳差運動によるホットスポットからのフラックスの変動によって negative superhump が引き起こされるという説である。しかし、Osaki & Kato が Kepler データに negative superhump を発見し、negative superhump が静穏時にも superoutburst 中にも見えること、さらに positive superhump と共存することを示した。EMT model ではこれらに対する説明ができ

ない。また、negative superhump の周波数は outburst の位相に従って規則的に変化することが明らかにされた [2]。negative superhump の周期の増加は円盤半径の増加として解釈することができる。そのため、円盤半径は outburst 時に増大し、その後の減少するという一連の周期を繰り返す。TTI model によれば、outburst の開始に伴う円盤半径の増加は角運動量の保存と粘性の増加に伴って生じる現象である [6]。Osaki の TTI model が四半世紀ぶりに検証され、negative superhump は disk tilt が原因で引き起こされることが明らかにされた。

3 激変星 KIC9406652

KIC9406652 は非常に速い振動と outburst の両方を示す激変星である [9]。6.018 時間の軌道周期と 5.753 時間の negative superhump が見られる。緩やかに明るさを増していき、急激に減光するという一連の周期を繰り返している様子が図 3 上のライトカーブに見られる。しかし、BJD 2455190 日付近は例外であり爆発前に強い低下が発生している。さらに、その後の BJD 2455240 日付近の爆発は持続時間が長いという点において例外的である。その後、negative superhump が見られ、降着円盤の歳差運動の始まりを示している。Knigge [8] らによる軌道周期との準経験的に得られた関係に基づけば、主星である白色矮星の質量は太陽質量の約 0.9 倍であると推定される。また、伴星の質量は太陽質量の約 0.75 倍であり、半径は太陽半径の約 0.72 倍であると推定される。

4 データ解析と結果

今回の解析には Kepler の観測によって得られた 2009 年 5 月 13 日から 2013 年 5 月 11 日までのデータを用いた。Lasso の実行には京都大学木邑、加藤両氏によって提供していただいた R 言語のプログラムを改訂して用いた。

図 3 上は観測全体の光度曲線である。このライトカーブに対して LOWESSFIT による平滑化を行い、長期変動の効果を差し引いて Lasso 解析をした。図 2 上は解析によって得られた power spectral density (PSD) である。複数の周期が検出されており、最も power の大きな周期は 0.2397 日であり、これは Douglas らの研究 [9] で得られた negative superhump の周期に一致する。右側に見られる小さな起伏は連星の軌道周期 0.2545 日に対応すると考えられる。図 3 下、図 4 は Lasso 解析による周期の時間変動を追った図であり、データを抜き出す窓の広さを 8 日とし、1 日ステップで動かして解析を行った。図 4 は解析を

行う際の周期領域を制限し、negative superhump の変動を拡大したものである。

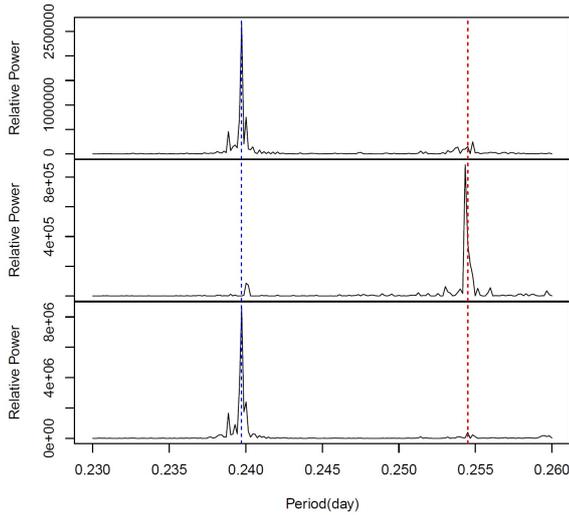


図 2: Lasso 推定によるパワースペクトル。青線が negative superhump、赤線が軌道周期を示している。解析期間はそれぞれ、上段:BJD 2454960-2456430、中段:BJD 2454960-2455240、下段:BJD 2455240-2456430 である。

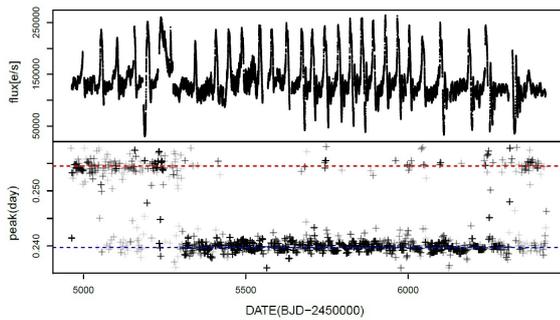


図 3: 上図はライトカーブ。縦軸はフラックスの強度。横軸は時間で BJD (Barycentric Julian Date) を単位とする。下図は軌道周期 (赤点線) と negative superhump (青点線) 付近の周期の変動を示した図で、パワーの強さをグレースケールで表している。データを抜き出す窓の広さを 8 日とし、1 日ステップで動かして Lasso 解析を行った。軌道周期と negative superhump が同時に確認できる。

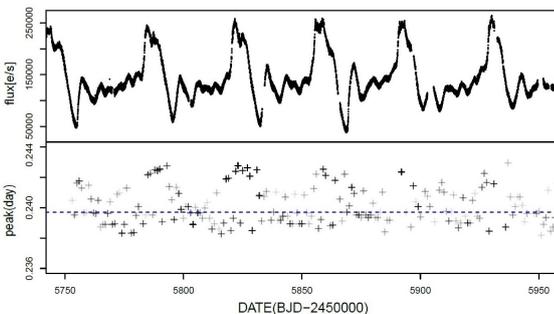


図 4: 周期領域を negative superhump の付近に絞った場合の解析結果。outburst が近づくにつれて周期が長くなり、急激な減光と共に元の周期に戻ることを繰り返している様子が見られる。

5 考察

図 3 に示されるように、観測全体の周期解析の結果、初めは軌道周期が顕著に現れていたが、BJD 2455190 日付近の例外的な outburst の終了と共に、negative superhump の変動が強く見られることが確認された。この境目となる時刻の以前と以後の期間のライトカーブを Lasso 解析して得られたパワースペクトルがそれぞれ図 2 の中段と下段であり、図 3 の結果と対応していることが分かる。

また、図 4 に示されるように、negative superhump がライトカーブの outburst 位相に従って体系的に変動している様子が確認された。類似している天体である V1504 Cyg においても同様の変動が観測されている [2]。Osaki & Kato はこの negative superhump の変動から円盤の半径変化が分かることを明らかにした。傾斜円盤の逆行歳差運動のモデルを適用すると、その周波数は次の式で与えられる [11]。

$$\nu_{\text{NSH}} = \nu_{\text{orb}} \left[1 + \frac{3}{7} \frac{q}{\sqrt{1+q}} \cos \theta \left(\frac{R_d}{A} \right)^{3/2} \right] \quad (1)$$

ν_{NSH} と ν_{orb} はそれぞれ negative superhump と連星の軌道周期である。 $q = M_2/M_1 = 0.83$ は連星質量比、 R_d は円盤半径、 A は連星間距離、 θ は円盤の傾斜角度である [9]。図 4 から ν_{NSH} は 4.11~4.20 c/d で変動していることが分かる。これを (1) にはめると $\cos \theta \left(\frac{R_d}{A} \right)^{3/2}$ を導出することができる。 $\theta = 10^\circ$ で一定であると仮定すると、 $\frac{R_d}{A}$ は 0.47~0.61 となる。ただし、傾斜角度 θ が変動している可能性を排除することはできない。

6 まとめ

TTI model の重要な論点はサイクル中の円盤半径の変動に関するものであるが、Kepler によって観測されるまでは検証が困難であった。V1504 Cyg や KIC9406652 のように negative superhump の変動が見られる Kepler データは激変星の降着円盤のメカニズムを解明する重要な鍵となるだろう。

参考文献

- [1] 理科年表オフィシャルサイト 天文部: 激変星とは何か <https://www.rikanenpyo.jp/index.html>
- [2] Osaki, Kato, 2013, PASJ, 65, 50
- [3] 植村誠, 加藤太一, 2018, 天文月報, スパースモデリングによる変光星のパワースペクトル推定
- [4] 天文学辞典激変星 <http://astro-dic.jp/cataclysmic-variable-star/>
- [5] Chanadra X-ray Obesevatory <https://chandra.harvard.edu/photo/2001/v1494aql/>
- [6] Osaki Y. 1989, PASJ, 41, 1005
- [7] Smak J. 2009, Acta Astron., 59, 121
- [8] Knigge, C., Baraffe, I., & Patterson, J. 2011, ApJS, 194, 28
- [9] Douglas R. Gies et al, 2013, AJ, 775, 64
- [10] Wood, M. A. & Burke, C. J. 2007, ApJ, 661, 1042
- [11] Larwood J. 1998, MNRAS, 299, L32