

LASSO 法を用いた Z Cam 型矮新星 V523Lyrae の時間変動解析

Timing analyses of Z Cam type cataclysmic variable V523 Lyrae with LASSO

X 線天文学研究室 P16055 関 亮輔

指導教員：久保田 あや 准教授

1 研究の背景と目的

2009 年 3 月に NASA によって惑星探査機 Kepler が打ち上げられ、その後約 3 年半の測光観測を行なった。観測データのうち V523Lyr の測光データを用いて、Mason ら [2] による周期解析が行われた、V523Lyr が Z Cam 型矮新星であり、一部で negative superhump と見られる周期を確認した。negative superhump は矮新星の降着円盤の状態を知る上で重要な要素であるため、本研究では特徴量選択が可能な Lasso による時間変動解析を行うことで、V523Lyr の降着円盤の変動を明らかにすることを目的とする。なお Lasso はプログラミング言語 R のパッケージ LARS を使用する。本研究では文献 [1] のプログラムを参考にし、京都大学木邑、加藤両氏に提供いただいたプログラムを改定して解析を行っている。

2 Kepler による V523Lyr の測光観測

Kepler は地球型の太陽系外惑星を探索することを目的に、2009 年 5 月から 2013 年 8 月まで主観測ミッションを行なった。観測対象は主に白鳥座方向の惑星で、約 3 年半の間に 10 万個以上の恒星を観測した。Kepler はそれまでの観測と比べて比較的時間分解能の良い測光を長期間に渡って行い、わずかな明るさの変化も検出できたため、そのデータは激変星の理解を大幅に進めた [2]。V523Lyr は Long Cadence(積分時間 30 分)と Short Cadence(積分時間 1 分)の両方で、約 3 年間(2010 年 6 月～2013 年 4 月)観察され、そのデータは STScl によって MAST にて公開されている。今回は Long Cadence データを使用して解析を行う。

3 Z Cam 型矮新星 V523Lyr について

3.1 矮新星 (文献 [3] 参照)

矮新星とは光度が大きく変化する天体、激変星の一種で白色矮星と晩期型主系列星(低温星)からなる連星系を成している。白色矮星は恒星の最終形態の一つで強い重力を示すため、恒星の一つである低温星のガスを引きつけ、白色矮星の周囲を周回する降着円盤を形成する(図 1)。降着円盤に流入したガスから位置エネルギーが解放されることで、ガスが円盤にぶつかる点はホットスポットとして明るく輝く。可視光では白色矮星、低温星、降着円盤、ホットスポットが同程度の明るさとして観測される。矮新星は激変星の中でも小規模な爆発現象(outbursts)を数日から数百日間隔で繰り返すという特徴を持つ。矮新星は SS Cyg 型、Z Cam 型、SU UMa 型に分類され、Z Cam 型矮新星は通常の光度と outbursts の中間の明るさを一定期間継続する stand still が存在する。また、今回注目する negative superhump は主に SU UMa 型矮新星に存在が確認されている、軌道周期より数%短い周期である。この周期は降着円盤の半径が変化することで、ホットスポットの位置が変化し、明るさが変動することにより発生する [4]。

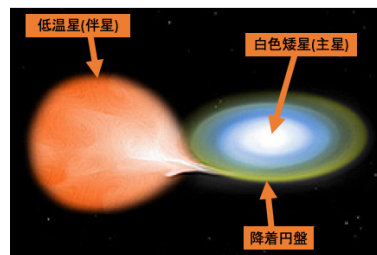


図 1: 矮新星の想像図 [9]

3.2 V523Lyr

V523Lyr は太陽から約 4.2kpc(約 13.7 光年)離れた位置に存在する NGC6791 散開星団に存在する低光度の矮新星である。Mason らの研究 [2] では、V523Lyr は Z Cam 型矮新星であり、有意と判断できる周期は outbursts の再起周期[最小 22 日, 最大 54 日]、連星の共通重心を公転する軌道周期[0.15845048 日(3.8 時間)]、negative superhump[0.151 日(3.6 時間)]の 3 つが存在するとされている。

4 Lasso について

Lasso とは Least absolute shrinkage and selection operator の略であり、正則化の手法の一つである。通常、測光データ(光度曲線)から周期を読み取るとき、時間の関数である測光データをフーリエ変換することで周波数の関数に変換する。その後、関数に誤差項を加えて最小二乗法を用いることで周期の推定解を得る。しかし、データ数が足りず解が一意に決まらない場合(スパース問題)や、誤差が大きく適切ではない解が得られる場合がある。そこで、Lasso を用いることで明瞭な解を推定する。Lasso はフーリエ変換で得られた推定解に罰則項を加え、罰則項の係数を変化させることで明瞭な解を推定することができる。Lasso を用いることで、目的変数に影響を与える説明変数のみを選択できるため、スパース問題を解決することができる [5]。

5 Lasso による時間変動解析

5.1 データ処理

本研究では、Kepler による測光観測で得られた 2010 年 6 月～2013 年 4 月の約 3 年分の光度曲線を用いて周期解析を行う。今回注目する周期は negative superhump であるため、近似して存在する軌道周期以外の周期の影響をなるべく小さなものにしたい。そのため、Lasso によるパワースペクトル推定を行う前処理として平滑化を行う。図 2 上は Kepler によって観測された 605～621 日の光度曲線である。青線は平滑化曲線であり、この線に沿って平滑化を行なった光度曲線が図 2 下である。元の光度曲線に存在していた outbursts の減少が、平滑化した光度曲線では目立たなくなっているため、Lasso を行なった際に outbursts の周期による影響を少なくすることができる。

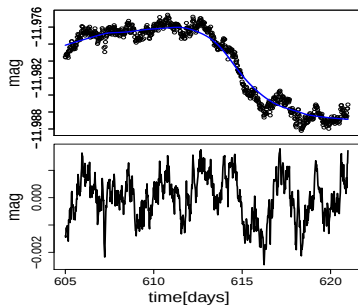


図 2: 上: Kepler 宇宙望遠鏡による測光観測で得られた光度曲線 (605~621 日), 青線: 平滑化曲線, 下: 605~621 日のデータに対して平滑化を行なった光度曲線

5.2 V523Lyr の周期解析

平滑化を行なったデータに対して Lasso を用いた周期解析を行う。初めに今回研究の主な対象とする、軌道周期と negative superhump が存在していることを確認する。図 3 は 2 つの周期が存在すると考えられる 0.145~0.165 日の周期を目的変数とし、積分範囲を全データとした際に Lasso により得られたパワースペクトルである。

次に積分範囲を狭くすることで時間に対する周期の変化を確認する。全データに対して積分範囲を 16 日とし、1 日ごとずらしながら Lasso を実行した結果が図 4 である。それぞれ目的変数の周期範囲を上は 0.145~0.165 日に、中は 0.155~0.163 日に、下は 0.148~0.154 日に設定した図である。図 3, 図 4 から 0.1584 日の周期は全観測期間に渡って安定して存在しており、変動も大きくは現れていない。このことから、0.1584 日は軌道周期であると考えられる。一方 0.1509 日の周期は 1300~1480 日でのみ強く現れていて、それ以外では有意な周期として確認することができない。0.1584 日が軌道周期であるとする、軌道周期よりも数%短い周期である 0.1509 日は negative superhump であると考えられる。

最後に 0.1509 日の周期が一部でのみ強く現れていることが確認できたため、その期間でのみ改めて Lasso を行なった。1280~1500 日までの測光データを用いて、積分範囲を 16 日とし、0.5 日ごとずらしながら Lasso を実行した結果が図 5 である。光度曲線と並べると、outbursts の発生と negative superhump の変動に相関があることが確認できた。これは尾崎らによる研究 [4] で、SU UMa 型矮新星 V1509Cyg に確認された光度曲線と negative superhump の相関と類似している。

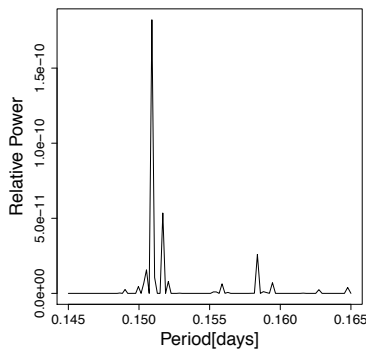


図 3: 全データに対して Lasso による推定を行なったパワー [10] スペクトル

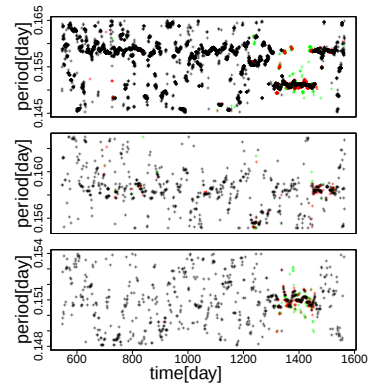


図 4: 全データに対して Lasso による推定を行なった周期の時間変化, 周期範囲はそれぞれ上:0.145~0.165 日, 中:0.155~0.163 日, 下:0.148~0.154 日

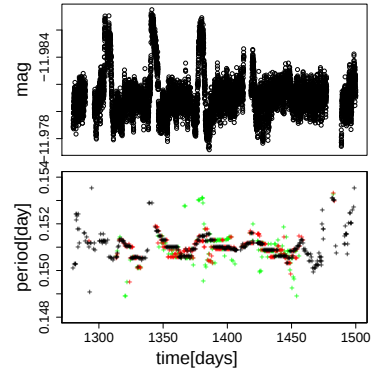


図 5: 上: 1280~1500 日の光度曲線, 下: 1280~1500 日の観測データに対して Lasso による推定を行なった周期の時間変化

6 まとめと考察

Kepler の測光データに対して Lasso を用いた周期の時間変動解析を行なった。その結果、軌道周期と negative superhump の時間変動を確認した。また、negative superhump が光度曲線と明らかな相関を示していることを確認した。この結果は尾崎らの研究 [4] で確認された SU UMa 型矮新星 V1509Cyg の明るさと negative superhump の相関と一致している。そのため Z Cam 型矮新星 V523Lyr の negative superhump の変動は SU UMa 型と同様、円盤半径が広がることで周期が小さくなると考えられる。

References

- [1] 植村誠, 加藤太一, 2012, PASJ, 64, 9
- [2] Mason E, Howell S B, 2016, Astronomy & Astrophysics, 589, 11
- [3] 岡村定矩, 2012, 天文学辞典, 現代天文学 別巻
- [4] 尾崎洋二, 加藤太一, 2013, PASJ, 65, 22
- [5] 植村誠, 加藤太一, 2018, 天文月報, 111, 528
- [6] 大島誠人 博士論文 (京都大学) 2014 年度 「矮新星おおくま座 E R のネガティブスーパーハンプの測光観測を通じての物理的構造の解明」
- [7] 野本憲一ら, 2012, 恒星, シリーズ現代天文学 7
- [8] NASA's Kepler Mission Official Summary
- [9] Wiki commons,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Making_a_Nova.jpg
- [10] 天文屋のための How to スパースモデリング
https://home.hiroshima-u.ac.jp/uemuram/?page_id=234