

ヘリウム激変星の進化経路の検証

磯貝 桂介 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

激変星は白色矮星を主星に持つ近接連星系であり、軌道周期は数時間と非常に短い。その 1 つ AM CVn 型の特徴は、水素スペクトル線の欠乏と、普通の激変星よりも更に短い 1 時間未満の軌道周期である。この 2 つの特徴から、伴星は水素が少なく半径の小さいヘリウム白色矮星であると予測されている。激変星では伴星から主星へと質量輸送が行われており、主星の周りには降着円盤と呼ばれる円盤状のガスが形成されている。降着円盤から主星への質量降着が原因で、激変星は outburst と呼ばれる突発的な可視の発光現象を示す。大規模なものは superoutburst と呼ばれ、このとき、同時に superhump という現象を起こす。典型的に、superoutburst が最大で数等級の増光をして 1~2 週間続くのに対し、superhump は軌道周期 (数時間程度) よりも数% 長い周期で 0.3~0.5 等の小さな光度変動である。superhump は連星の潮汐力が降着円盤に作用して引き起こす現象だと考えられている。そのため、superhump の周期は連星の質量比の関数となっている。これまでも superhump の周期から質量比を求める方法はあったが経験式で、精度に問題があった。しかし、近年 superhump の中でも周期の変動があることが分かり、比較的周期の長い、成長過程の superhump を使うことで、質量比を理論的に求める方法が確立された (Kato and Osaki. 2013)。今回、激変星 CR Boo の観測を通じて、AM CVn 型としては初めて成長過程の superhump を観測することに成功した。その結果、得られた質量比は、伴星がヘリウム白色矮星であるという予測の範囲に収まる結果となった。

1 Introduction

激変星とは白色矮星を主星に持つ近接連星系である。典型的に、連星の距離は太陽半径ほどと非常に近く、軌道周期は数時間程度となっている。伴星から主星へは質量輸送が行われており、主星の周りには降着円盤と呼ばれる円盤状のガスが形成されている。(図 1)

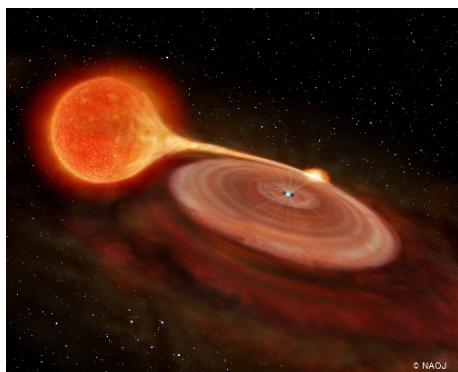


図 1: 激変星のイメージ

今回扱う AM CVn 型激変星の特徴は 2 つある。1 つ目は、H スペクトルが欠乏しており、かつ He スペクトルが豊富という特徴である。このことから、伴星は水素があまり残っていない星だと考えられる。2 つ目は、軌道周期が 5 分~65 分という超短周期であるという特徴である。(図 2) この場合、連星の距離も非常に近くなることから、伴星はコンパクトな天体である必要がある。以上のことから、伴星はヘリウム白色矮星と予測される。

激変星の中には、数日間、可視で数等級の増光を示す outburst と呼ばれる現象を行うものがある。outburst は、降着円盤から主星への質量降着によって円盤が発光する現象である。大規模なものは superoutburst と呼ばれ、このとき、同時に superhump という現象を起こす。(図 3、図 4) 典型的に、superoutburst が最大で数等級の増光をして 1~2 週間続くのに対し、superhump は軌道周期 (数時間程度) よりも数% 長い周期で 0.3~0.5 等の小さな光度変動である。superhump は伴星からの潮汐力によって円盤が歪む現象である。そのため、superhump の周期から

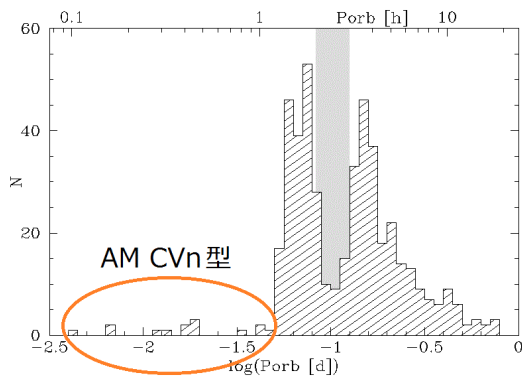


図 2: 軌道周期に対する激変星の分布 (Ritter and Kolb (2003))

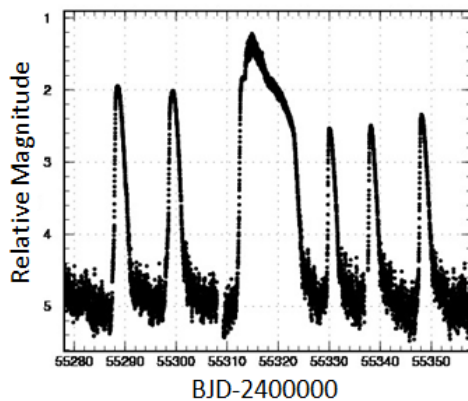


図 3: outburst と superoutburst の光度曲線の例。Kepler 衛星、V1504 Cyg のデータより。

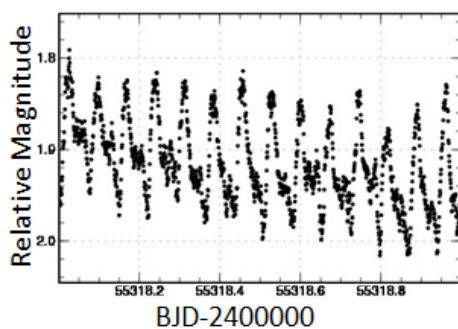


図 4: superhump の光度曲線の例。Kepler 衛星、V1504Cyg のデータより。

質量比の情報を取り出すことができる。

superhump と質量比に関係があることはこれまで

も知られていたが、質量比のわかっている水素に富んだ通常の激変星から求められた次のような経験式であった。

$$\frac{P_{sh} - P_{orb}}{P_{orb}} = 0.12q \quad (1)$$

ここで、 P_{sh} は superhump 周期、 P_{orb} は軌道周期、 q は質量比 (Roelofs 2007)。この場合、 q の誤差は最大で 50% にまでなる。

今回、superhump を用いた純粋な力学的な q の推定法が提案された (Kato and Osaki 2013)。superhump の中でも周期変動が存在することが分かり、潮汐力により円盤の歪みが大きくなっていく “成長過程の superhump” の周期を使うことで、理論式、

$$\epsilon^* \equiv \frac{P_{sh} - P_{orb}}{P_{sh}}$$

$$r_{3:1} = 3^{(- 2/3)(1 + q)^{ - 1/3}} \quad (2)$$

が得られる。ここで、 $r_{3:1}$ は伴星と円盤の軌道周期が 3 : 1 になる、3 : 1 共鳴半径。

これを使って AM CVn 型の q を高精度で求め、伴星がヘリウム白色矮星であることを確認したい。また、AM CVn 型は連星間距離が非常に短いことから重力波放射の有力ソースと考えられている天体である。重力波検出においても、AM CVn 型の q を精度よく求めることは意義がある。さらに、AM CVn 型はある種の Ia 型超新星の progenitor として期待されている天体でもある。たくさんの AM CVn 型の q が得られれば、Ia 型超新星の進化経路を辿ることにもつながる。

2 Methods

ここでは、成長過程の superhump の周期を求める方法について解説する。

superhump は、伴星と円盤の軌道周期が 3:1 になり、共鳴を起こすことで生じる現象である。伴星が周期的に潮汐力を及ぼすことで円盤が歪み、光度変動として現れる。3:1 共鳴が起きていて、円盤の歪みが増幅されていくフェーズだけを取り出すことが出来れば、純粋に力学的に q を求めることが出来る。

そこで、 $O-C$ diagram というものを導入する。 O は Observation、 C は Calculation を表し、(E 周期

目の観測時間) $- E \times$ (期待される *superhump* 周期) を意味する。“期待される *superhump* 周期”は基本的に *superhump* 初期の周期を使う。 $O-C$ diagram とは要するに、傾きが *superhump* 周期を表す図で、直線なら周期一定、下に凸なら周期は増加、上に凸なら周期は減少傾向にあることを意味する。 $O-C$ diagram を使えば全体の周期変化をよりの確にとることができる。

SW UMa の *superoutburst* について $O-C$ diagram を描いたのが図 5 である。 $O-C$ diagram が 3 つのフェーズに分かれていることが見て取れる。図中に A と書いてあるフェーズが、今回求めたい“成長過程の *superhump*” (stage A *superhump*) である。stage A では、グラフ中段に示した *superhump* の振幅が増加傾向にあり、円盤の歪みが増幅されていることが読み取れる。3:1 共鳴が成長すると、円盤の歪みが 3:1 共鳴半径の内側にも広がり、円盤内の圧力効果によってより内側の半径における歳差運動の影響を受けて *superhump* 周期は減少し、図中の B と書いてあるフェーズ (stage B *superhump*) に移行する。

$O-C$ diagram を描いたのち、stage A の部分だけを取り出して周期解析をしてやれば、今回求めたい成長過程の *superhump* 周期が得ることが出来る。

3 Observations

観測は京都大学屋上の 40cm 望遠鏡+CCD(no filter)で行った。期間は 2014 年 4 月 7 日~4 月 28 日、観測対象は CR Boo である。さらに、京大を中心とした変光星観測のネットワーク、VSNET (国際変光星ネットワーク) の協力により多くのデータを得ることが出来た。その結果、得られた光度曲線が図 6 である。

4 Results and Discussion

CR Boo の *superhump* で $O-C$ diagram を描くと図 7 のようになった。 $O-C$ diagram は途中で折れ曲がっており、周期の変化が明らかである。図 7 から明らかになった stage A の区間だけを使って改め

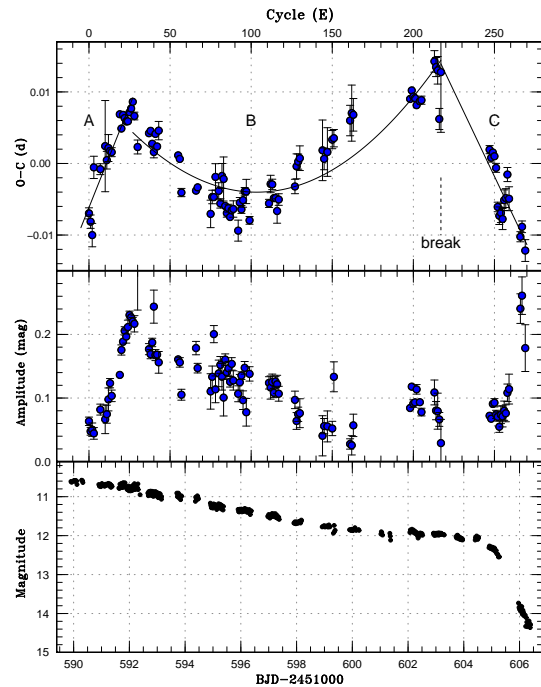


図 5: SW UMa の *superoutburst* の光度曲線 (下)、*superhump* の振幅 (中)、 $O-C$ diagram (上) (Kato et al. 2009)

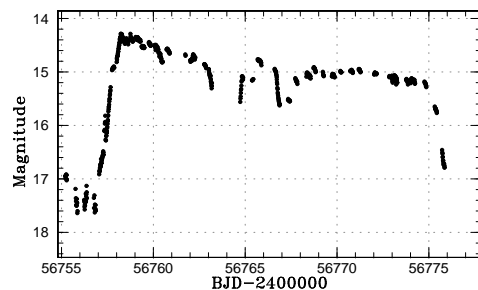


図 6: CR Boo の光度曲線

て周期を求めてやると、成長過程の *superhump* 周期 $P_{sh} = 25.056 \pm 0.029$ 分が得られる。

これを (2) 式の理論式に適用すると、質量比

$$q = 0.059 \pm 0.006$$

が得られる。対して、従来の経験式では

$$q = 0.085 \pm 0.045$$

と求められている。(Roelofs et al. 2007) 理論式では誤差はるかに小さくなっていることがわかる。

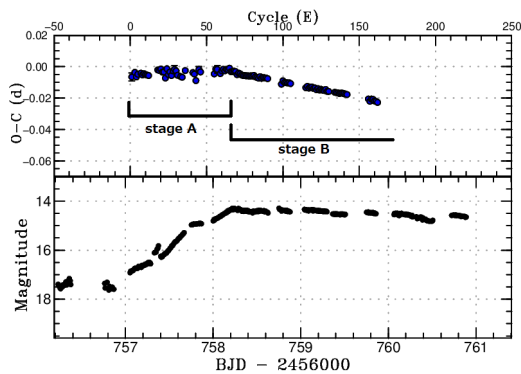


図 7: CR Boo の $O - C$ diagram

ここで、CR Boo の伴星が本当にヘリウム白色矮星かどうか確認する。伴星が縮退している激変星は、図 8 の分布の左下の領域に存在する (Armstrong, E. et al. 2012)。赤線は完全縮退、緑線は半縮退の境界を表し、主星質量 $M_1 = 0.60, 0.75, 1.00M_{\odot}$ の 3 つの値を仮定して計算した。図 8 により、今回推定した CR Boo の q は半縮退が許される領域に収まった。

AM CVn 型の進化モデルは、図 9 のようなものが考えられている (Nelemans. 2010)。各線は、主星と伴星の質量を仮定したときの進化経路を表す。縦軸の伴星質量は質量輸送により単調減少するので、進化が進むにつれ激変星は右下へ移動していく。黒い縦線は、従来の推定方法による AM CVn 型の分布を表す。今回の研究による推定結果は、 $M_1 = 0.75, 1.00M_{\odot}$ の 2 つを仮定し、それぞれ赤線、緑線で示した。従来の値と比べると、伴星は少し軽いことが示唆される。今後、多くの AM CVn 型に対して、今回行った推定法を適用させれば、図 9 上に AM CVn 型の分布を載せ、進化モデルの検証を行うことができるはずである。

5 Conclusion

成長過程の superhump を使うことで質量比を理論的に求める方法が確立されたことを受け、AM CVn 型としては初めて、新たな推定法を適用した。その結果、今回観測した CR Boo は、伴星がヘリウム白色矮星であるという予想から推定される質量比の範囲内に収まったが、従来の推定値よりも伴星が軽いこと

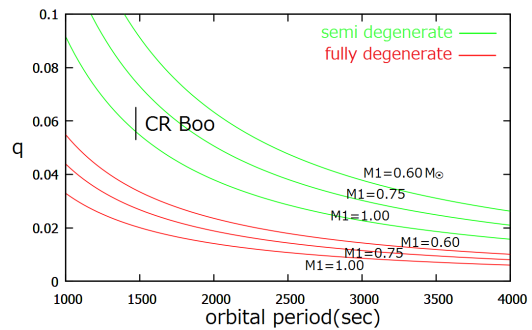


図 8: 伴星が縮退する領域 (Armstrong et al. 2012)

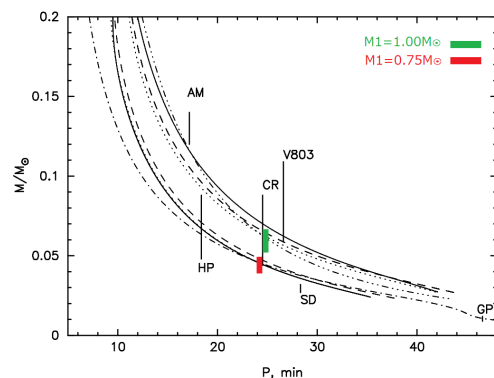


図 9: AM CVn 型の進化経路。縦軸は伴星質量、横軸は軌道周期。(Nelemans. 2010)

が示唆された。今後、この推定法により AM CVn 型の進化モデルの検証が推進されることが期待される。

Reference

Ritter, H., & Kolb, U. 2003, A&A, 404, 301
 Kato, T., & Osaki, Y. 2013, PASJ, 65, 115
 Hirose, M., & Osaki, Y. 1990, PASJ, 42, 135
 Nelemans, G, et al. 2010, MNRAS, 401, 1347
 Roelofs, G.H.A., et al. 2007, ApJ, 666, 1174
 Tsugawa, M., & Osaki, Y. 1997, PASJ, 49, 75
 Warner, B. 1995, Baltic Astron, 4, 363
 Kato, T., et al. 2009, PASJ, 61, 395
 Armstrong, E., Patterson, J., Kemp, J. 2012, MNRAS, 421, 2310