

## 明らかになってきた激変星進化の最終段階

中田 智香子 (京都大学大学院 理学研究科)

### Abstract

激変星とは、軌道周期が数時間程度の、白色矮星を主星とする連星系である。伴星から主星への質量輸送により、主星の周りには降着円盤が形成されている。標準的な激変星の進化理論では、激変星は軌道周期を短くする方向に進化を進めるが、やがて最小周期を経ると軌道周期は長くなっていく。軌道周期が長くなっていく状態に達した系を”period bouncer”と呼ぶ。理論的には period bouncer は多く存在するはずだが、現在の観測ではほとんど見つかっていない。最小軌道周期周辺の天体は、スーパーアウトバーストと呼ばれるより明るく持続時間の長い増光を示す。スーパーアウトバースト中には、スーパー ハンプという微小な光度変動がみられ、その変動周期は、系の軌道周期よりも数%長いことが分かっている。近年、period bouncer の有力候補とされる 2 天体が発見された。さらに我々は、それぞれ 2011 年と 2013 年に増光が観測された 2 天体もこれら period bouncer 候補と同様の性質を示すことを発見した。period bouncer 候補天体の増光頻度の低さを考慮に入れて、我々はおおまかに period bouncer の密度を推定した。その結果、我々が period bouncer 候補とした天体により、理論と観測の乖離を埋められる可能性がでてきた。

## 1 Introduction

激変星とは、軌道周期が数時間程度の、白色矮星を主星とする連星系である。伴星から主星への質量輸送により、主星の周りには降着円盤が形成されている。激変星の進化段階をみるために、図 1 のように、縦軸に質量比 (伴星の質量/主星の質量)、横軸に軌道周期をとった平面が用いられる。まずは、質量輸送を進めることで質量比が小さくなりながら、角運動量の損失により軌道周期が短くなっていく。その後伴星の縮退がはじまると、伴星の質量・半径関係が逆転し、それ以後は軌道周期が長くなる方向に進化していく。この激変星進化の最終段階にある星を”period bouncer”と呼ぶ。激変星進化のタイムスケールは数十億年であり、現在の宇宙年齢を考えると、多くの系が period bouncer として存在していると考えられる。しかし、現在の観測では period bouncer 候補天体はほとんど見つかっておらず、この理論と観測の乖離は長年の問題となってきた。

現在知られている短周期の天体の多くは、SU UMa 型矮新星とそのサブグループに属する天体である。矮新星とは、アウトバーストという 3 ~ 5 等程度の振幅で数日間続く増光を示す天体である。このうち、SU UMa 型は通常のアウトバーストに加え、スーパー

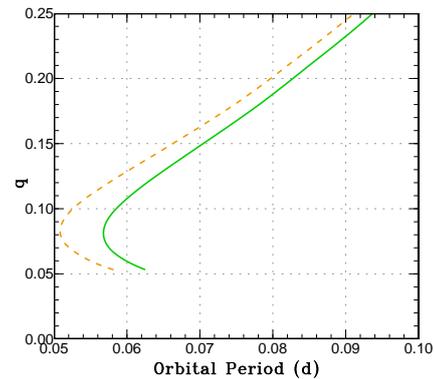


図 1: 激変星進化の質量比 (縦軸、伴星質量/主星質量) と軌道周期 (横軸) の関係。質量輸送が進むことで、質量比は小さくなり続ける。軌道周期はまず短くなる方向に進化するが、伴星が縮退を始めると長くなっていく。

アウトバーストと呼ばれるより明るく持続時間の長い増光を示す。SU UMa 型矮新星の代表的な光度曲線を図 2 に示す。

スーパーアウトバーストの観測は、SU UMa 型矮新星を研究する上で非常に重要である。スーパーアウトバースト中には、スーパーハンプという微小な

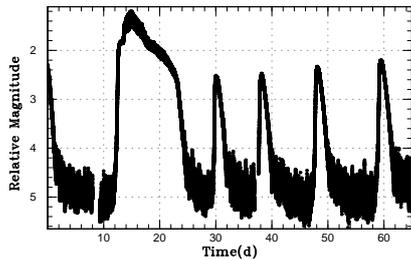


図 2: SU UMa 型矮新星 V1504Cyg のケプラー衛星による光度曲線。12 日目に見られる増光がスーパーアウトバースト。その他の増光はすべてアウトバースト。

光度変動がみられ、それが系の軌道周期や質量比を知るための指標となるためだ。おおまかに、スーパーハンプ光度の変動周期は、系の軌道周期よりも数%長いことが分かっている。図 2 のスーパーアウトバーストの一部を拡大した際にみられるスーパーハンプを図 3 に示す。スーパーハンプは、降着円盤が 3:1 の共鳴半径に達し、降着円盤が楕円形に変形して歳差運動を起こすことで生じると考えられている。スーパーハンプ周期はスーパーアウトバースト中で変化していく。3:1 共鳴が成長していく過程で見られるスーパーハンプは、ステージ A スーパーハンプと呼ばれている。このステージ A スーパーハンプの周期は、軌道周期よりも数%長い周期を示す。この周期が 3:1 共鳴を力学的に反映していることが近年明らかになり、ステージ A スーパーハンプを捉えることは降着円盤の物理を探る上で重要性を増している (Kato, Osaki 2013)。ステージ A はスーパーアウトバーストの初期段階に数日観測される。ステージ A が観測された後はステージ B と呼ばれる段階に移る。ステージ B スーパーハンプはステージ A のものよりも少し周期が短くなっている。これは 3:1 共鳴が成長しきって降着円盤内の圧力効果が効いていくためだと考えられている。また、SU UMa 型矮新星の一部には早期スーパーハンプと呼ばれる変動を示す天体がある。これはスーパーアウトバースト初期に降着円盤が 2:1 の共鳴半径に達して起こるとされており、早期スーパーハンプの周期は軌道周期とほぼ一致する。スーパーハンプ周期は伴星による潮汐効果を反映しているため、激変星進化を探る上で重要に

なる質量比の情報を含んでいる。スーパーハンプの周期を使って質量比を推定する方法は広く用いられてきたが、従来の式は経験的なものであった。しかし、上記のようにスーパーハンプの周期変化の理解が進むことで、力学的に 3:1 共鳴を反映しているステージ A スーパーハンプを用いて理論的に質量比を推定する方法が確立された (Kato, Osaki 2013)。

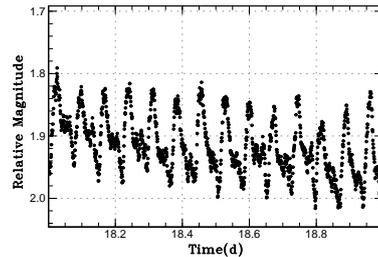


図 3: 図 2 のスーパーアウトバーストのうち 1 日分を拡大した際にみられるスーパーハンプ。

これまでも period bouncer 候補として発表された天体があったが、その根拠となる質量比の値は従来の経験式で観測された全てのスーパーハンプの周期を使って用いられたものである。過去の period bouncer 候補天体に、EG Cnc という星がある。Patterson et al. (1998) によってこの天体の質量比は 0.027 と見積もられ、period bouncer 候補天体とされるに至った。この天体の特徴として、スーパーアウトバーストが終了した直後に数回の再増光 (アウトバーストのような増光が数回繰り返される) が確認されたことが挙げられる。したがって、このような「複数回の再増光」をおこす天体が period bouncer 候補となり得るのではないかと考えられてきた。

近年には新しい質量比の推定法を用いて、新たな period bouncer 候補が見つかった。SSS J122221.7-311523 (以後 J122221) と OT J184228.1+483742 (以後 J184228) では質量比が 0.042-0.045 と見積もられた。これら 2 天体が、ステージ A からの質量比推定法が確立されて以後初めて見つかった period bouncer 候補といえる。これらの天体の共通の性質には、ステージ A スーパーハンプの期間が長い、ステージ AB 間でのスーパーハンプの周期変化が大きい、減光速度が遅い、といったものが挙げられる。

今回紹介する 4 天体は、2 天体が複数回の再増光を示すもの、もう 2 天体が J122221 など近年の period bouncer 候補と似た特徴を持つ天体である。複数回の再増光を示す 2 天体 OT J211258.65+242145.4(以後 J211258) と OT J203749.39+552210.3(以後 J203749) は共に 2012 年にスーパーアウトバーストが観測された。天体 OT J075418.7+381225(以後 J075418) と OT J230425.8+062546 (以後 J230425) はそれぞれ 2013 年と 2011 年にスーパーアウトバーストが捉えられた。J230425 の観測については Kato et al. (2012a) にまとめられているが、ここでは新しい解釈を紹介する。

## 2 Observations and Results

今回紹介する 4 天体は、京都大学を中心とする国際変光星ネットワーク (VSNET) の多くの協力者により観測された。観測ログは Nakata et al. (2013) と Nakata et al. (2014) に掲載されている。

2 天体の光度曲線を図 4~5 に示す。横軸は全て barycentric Julian days(BJDs)-2400000。紙面の都合上、複数回再増光をおこす天体を J211258 に、近年の period bouncer 候補と類似の天体を J075418 に代表させた。

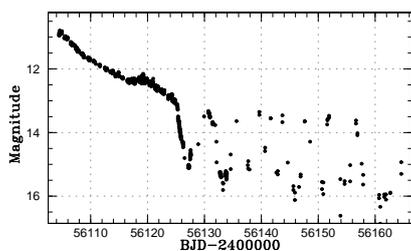


図 4: J211258 の光度曲線。8 回の再増光がみられる。

各天体のスーパーハンプ周期を解析するにあたり、phase dispersion minimization (PDM) という手法 (Stellingwerf 1978) を用いた。周期解析の結果とステージ A を用いた方法による質量比を表 1 に示す。ステージ A を用いた質量比の推定方法を適用するためには、ステージ A スーパーハンプ周期と軌道周期が必要になる。早期スーパーハンプがみられた天体についてはその周期を軌道周期とすることができる。

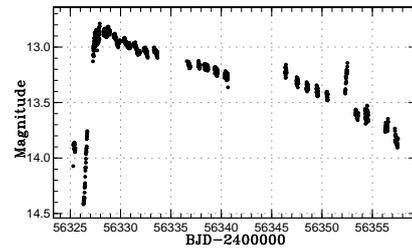


図 5: J075418 の光度曲線。

今回、J075418 と J230425 については早期スーパーハンプを示さなかったため、質量比を推定することができなかった。

## 3 Discussion

### 3.1 再増光と進化段階

複数回の再増光をおこした 2 天体について、ステージ A を用いた新しい手法で質量比を見積もると、その質量比は period bouncer と言える値より大きくなった。縦軸に質量比、横軸に軌道周期をとった激変星進化の図を 6 に示す。J211258 と J203749 は period bouncer の位置にはなく、その他の (period bouncer ではない) 天体と変わらない位置に存在している。複数回の再増光を示す天体は period bouncer であるという考えは、EG Cnc の研究により支持されてきたが、今回はそれを覆す結果となった。

### 3.2 新たな period bouncer 候補天体

近年の period bouncer 候補と同じ特徴を示す J075418 と J230425 については、質量比が求まらないものの、period bouncer 候補であると考えられるだろう。

我々の観測が現在の体制で行われるようになって 5 年が経つ。この間に今回紹介した 4 つの period bouncer 候補天体 (J122221, J184228, J075418, J230425) が発見され、それ以外の SU UMa 型矮新星は 248 天体が観測された。この観測をもとに、period bouncer の数密度を簡単に推測する。まず、ある系でスーパーアウトバーストが起こる間隔 ( $T_s$ ) は質量輸

表 1: 各天体についての周期解析の結果。単位は全て d。

	J211258	J203749	J075418	J230425
早期 sh	0.059732(3)	0.06051(18)	-	-
ステージ Ash	0.06158(5)	0.06271(11)	0.072218(3)	0.067245(17)
ステージ Bsh	0.060221(9)	0.061307(9)	0.070758(6)	0.066351(12)
質量比	0.081(2)	0.097(8)	-	-

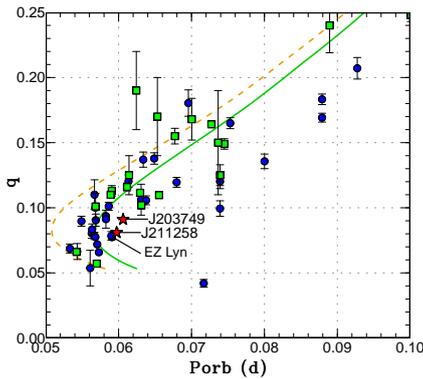


図 6: 標準進化曲線上での J211258 と J203749 の位置 (星)。丸は、ステージ A スーパーハンプから質量比を求めた period bouncer 候補ではない矮新星。四角は、蝕から質量比を求めた period bouncer 候補でない矮新星。

送率に反比例する (Osaki 1995)。これまでの観測から、多くの SU UMa 型矮新星は  $T_s(\text{SU UMa}) \sim 1\text{yr}$  である。period bouncer の質量輸送率は SU UMa 型矮新星の 100 分の 1 とも言われ、このことから、period bouncer で  $T_s(\text{PB}) \sim 100\text{yr}$  と見積もられる。しかしながら  $T_s(\text{PB})$  の不定性は大きいのでここでは  $T_s(\text{PB})$  を  $10\text{--}10^2\text{yr}$  としておく。 $T_s$  と増光を検出する Catalina Real-Time Transient Survey (CRTS) の観測間隔を考えると、SU UMa 型矮新星の多くはこの 5 年で 1 度は増光を捉えられたと考える。しかし、 $T_s$  が長い period bouncer については、CRTS の観測間隔により増光を逃してしまったものもあるだろう。この観測でカバーできた時間の割合を  $f \sim 0.1\text{--}0.5$  とする<sup>1</sup>。これらより、period bouncer 候補天体の、SU

<sup>1</sup>CRTS の観測間隔は典型的には 10 日に 1 回で、太陽の方角にあたる時には seasonal gap が発生する。

UMa 型矮新星に対する数を次のように見積もった。

$$\frac{N(\text{PB})}{N(\text{SUUMa})} \sim \frac{4}{248} \times \frac{1}{f} \times \frac{T_s(\text{PB})}{5} \sim 0.6\text{--}16 \quad (1)$$

Kolb (1993) では激変星の 70% が period bouncer に達しているとは見積もられている。我々が得た値は、このような理論的予測と矛盾しない。今回 period bouncer 候補とした天体の特徴は

- ステージ A スーパーハンプの期間が長い (通常の SU UMa 型矮新星の 4–8 倍)
- ステージ AB 間でのスーパーハンプの周期変化が大きい (通常の SU UMa が 1.0–1.5% の変化であるのに対し 1.5–2.0%)
- 減光速度が遅い (通常の SU UMa で 0.7–0.15 mag/d に対し 0.01–0.05 mag/d)

である。簡単な数密度推定の結果から、これらの特徴をもつ天体によって、長年謎に包まれていた period bouncer の一団を説明できる可能性が出てきた。

## Reference

Kato, T., et al. 2012a, PASJ, 64, 21  
 Kato, T., Monard, B., Hamsch, F.-J., Kiyota, S., & Maehara, H. 2013b, PASJ, 65, L11  
 Kato, T., & Osaki, Y. 2013, PASJ, 65, 115  
 Kolb, U. 1993, A&A, 271, 149  
 Nakata, C., et al. 2013, PASJ, 65, 117  
 Nakata, C., et al. 2014, PASJ, submitted  
 Osaki, Y. 1995, PASJ, 47, 47  
 Patterson, J. 1998, PASP, 110, 1132  
 Patterson, J., et al. 1998, PASP, 110, 1290  
 Stellingwerf, R. F. 1978, ApJ, 224, 953