

“遅い新星”の光度曲線とその絶対等級

蜂巢 泉 (東大総合文化)、加藤 万里子 (慶応大学)

概要

極大期を過ぎた“速い新星”(fast novae)の光度曲線は、光学的に薄いプラズマからの自由-自由遷移光 (free-free emission) の寄与が主である。これに対して、“遅い新星”(slow novae)は、質量放出率が小さく、そのために自由-自由遷移光の寄与は、光球面輻射からの寄与と同程度か、むしろ小さくなる。両方の寄与を考慮した理論的光度曲線を作成し、比較的遅い新星に適用し、絶対等級や白色矮星質量が他の方法から求めたものと一致することを示した。

1. はじめに

古典新星は、白色矮星表面にある水素外層の水素核燃焼の暴走によって起こる爆発現象である。明るいものでは、極大時に絶対等級で -10 等にも達する。したがって、古典新星の極大光度(絶対等級)を簡単に求めることができれば、古典新星はセファイドのように、標準光源となる。それを狙って経験則として提案されたのが、極大等級-減光率関係 (Maximum Magnitude versus Rate of Decline relation)、略して MMRD 関係である。しかし、これは統計的な関係であり、個々の新星に適用すると大きな誤差を生むことが多い。また、比較的初期に提案された Schmidt (1957, Z. Astrophys. 41, 181) の MMRD 関係は、“遅い”新星 (slow novae) については系統的にずれが大きくなると言われている。ここでは、遅い新星の光度曲線がどのような物理で決まるのか、また、なぜ、MMRD 関係から系統的なずれが起こるのかなど、遅い新星の光度曲線の特徴を理論的に明らかにする。

古典新星の減衰曲線 (光度曲線) の減衰の速さ (減衰率) と極大光度は、主に二つの要因で決

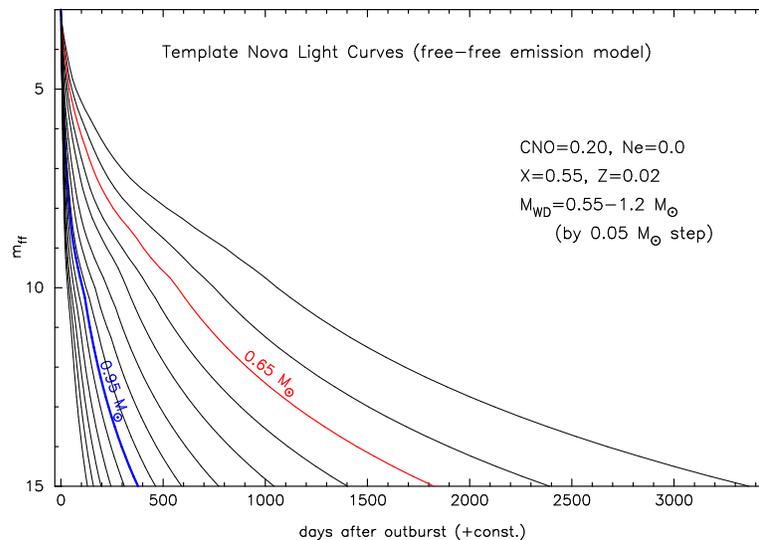


図 1: 縦軸は等級、横軸は時間 (爆発後の日数) である。縦軸の等級は図に入るように、適当にずらしてある。一番右側の $0.55 M_{\odot}$ から、一番左側の $1.2 M_{\odot}$ まで、 $0.05 M_{\odot}$ 間隔で自由-自由遷移光から計算したモデルの光度曲線を示している。赤線は $0.65 M_{\odot}$ 、青線は $0.95 M_{\odot}$ 白色矮星のモデル。

まる。白色矮星の質量 ($= M_{WD}$) と爆発する時の水素外層の質量 ($M_{ig} = \text{ignition mass}$) である。

極大後の古典新星の明るさは、主に自由-自由遷移光 (free-free emission) により決まり、白色矮星質量を決めれば、その減衰曲線はほぼ一通りに決まる (Hachisu & Kato 2006, ApJS, **167**, 59; Hachisu & Kato 2010, ApJ, **709**, 680; Hachisu & Kato 2015, ApJ, **798**, 76)。 (元素組成や磁場などの副次的な効果は考えないとする。) その一例を図1に示す。白色矮星質量が重いほど、光度曲線の減光率が大きい、すなわち、減光が速いことが分かる。

爆発後、新星風 (mass-loss) により、水素外層の質量が時間が経つにつれて減少する。外層質量の減少とともに、新星はこの光度曲線に沿って次第に暗くなる。爆発初期の水素外層質量は、この光度曲線上のどの位置から新星が始まるかを定める。爆発時の水素外層の質量が大きければ、より左側から出発するので、極大光度が明るく、また逆に、小さければ、暗い。

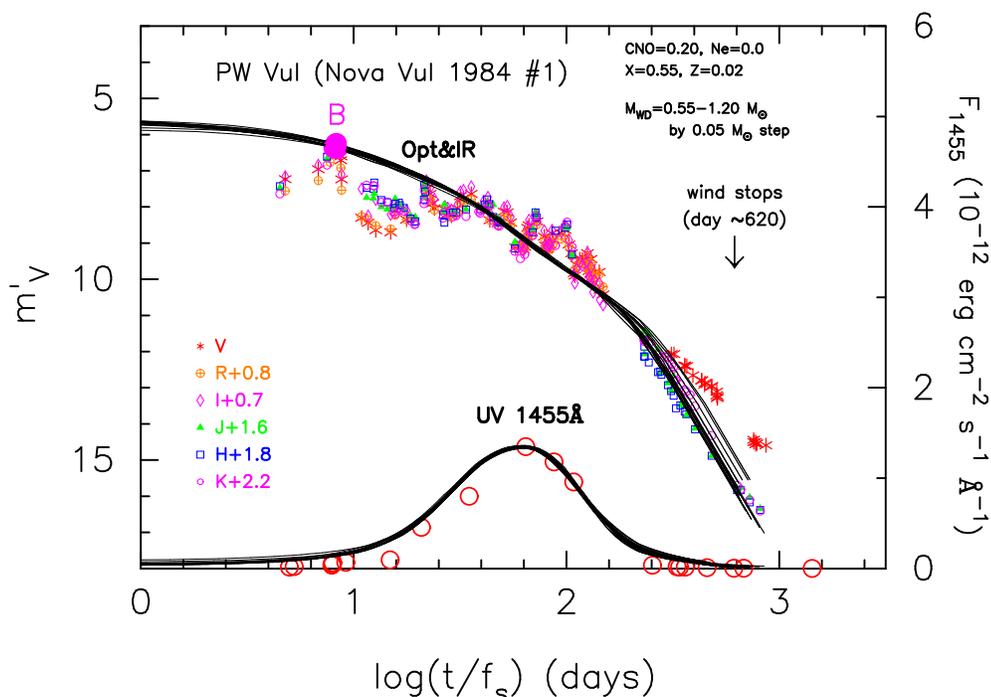


図 2: 図 1 の光度曲線を時間軸方向に伸長・圧縮 (factor f_s) すると、すべての光度曲線が重なり合う。ただし、横軸は対数 (時間) になっている。これを普遍的減光則 (universal decline law) とよぶ。図では、PW Vul の観測値に合わせた。紫外域の UV 1455Å のバンドに対応する光度曲線も表示してある。こちらは、光球面の黒体輻射近似より、計算した。

2. 普遍的減光則と絶対光度

自由-自由遷移光から計算される光度曲線は、時間軸方向に圧縮、あるいは伸長することで、図 2 に示したように、1 本の光度曲線に重ね合わせることができる。この性質を普遍的減光則 (Universal Decline Law, Hachisu & Kato 2006, ApJS, **167**, 59) という。この時に使う時間軸の圧縮のスケールを f_s とすると、 $t' = t/f_s$ が重ね合わせた光度曲線での時間となる。この時、重ね合わせた光度曲線の等級と、重ね合わせる前の元の光度曲線の等級との間には、 $m'_V = m_V - 2.5 \log f_s$ の関係 (Hachisu & Kato 2010, ApJ, **709**, 680) があるので、ある質量の白色矮星の絶対等級が分かれば、この関係を使って、他の質量の白色矮星の光度曲線の絶対等級が分かる。今回は、遅い新星の PW Vul を使って、自由-自由遷移光の光度曲線の絶対等級を決めた。その一例を図 3 に示す。

PW Vul の距離 ($d = 1.8$ kpc) と星間吸収 ($E(B - V) = 0.55$) が分かっているので、V 等

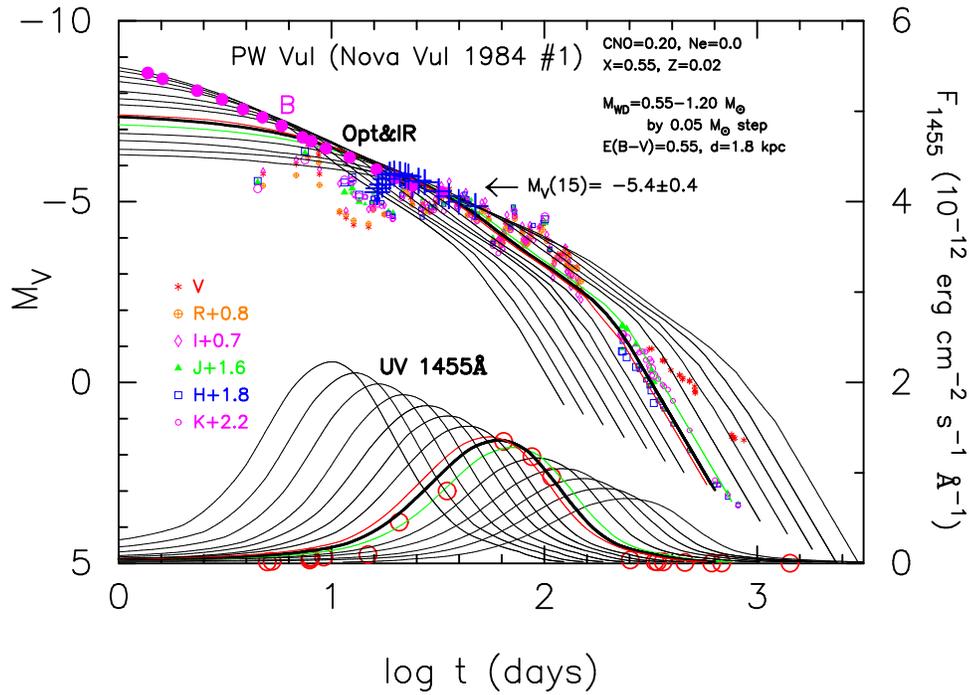


図 3: 縦軸は絶対等級、横軸は実際の時間 (爆発後の日数) である。なお、図中の B 点 (大きい紫色の●印) の位置は、図 2 の点 B に対応している。

級の距離指数 (distance modulus) が $(m - M)_V = 5 \log(d/10 \text{ pc}) + 3.1 \times E(B - V) = 13.0$ となるので、これから $0.83 M_\odot$ の白色矮星の光度曲線の絶対等級が分かる。これを元にして、 $m'_V = m_V - 2.5 \log f_s$ の関係を使い、他の白色矮星質量に対する絶対等級を計算することができる。

3. 光球面輻射の寄与

PW Vul のような遅い新星では、速い新星と比べると、質量放出率 (mass-loss rate) が小さい。自由-自由遷移光の光度は質量放出率に大きく依存するので、遅い新星の free-free emission の光度曲線の絶対光度はあまり大きくならない。そのため相対的に光球面からの輻射が大きくなる。図 4 に爆発後 64 日のスペクトルを近似的に自由-自由遷移光と黒体輻射に分解したものを示す。これを見ると、V バンド近傍では両方の寄与が同じくらいあると分かる。したがって遅い新星では、free-free emission のみで光度曲線を計算したのでは不十分である。両方の寄与を計算してはじめて光度曲線フィッティングを正しく行うことができる。その具体例を図 4 の右側の図で行った。この図において緑色の線は、光球面からの黒体輻射 (BB と表示) を表し、黒色の線は free-free emission (FF と表示) からの寄与、赤色の線がその合計 (TOTAL と表示) である。合計の線が V バンドと良くあっていること、および、光球面からの黒体輻射近似で計算した UV 1455 Å バンドも良くあっていることが分かる。両方同時に同じモデルで、良くあっていることが重要である。

4. いろいろな新星の光度曲線フィット

さて、このようにして、遅い新星では光度曲線フィットをするとき、両方の寄与を計算することが求められる。ここでは、いくつかの実例を紹介する。

V705 Cas は、図 5 の左に示したように、ダストによる black-out がある。白色矮星質量は

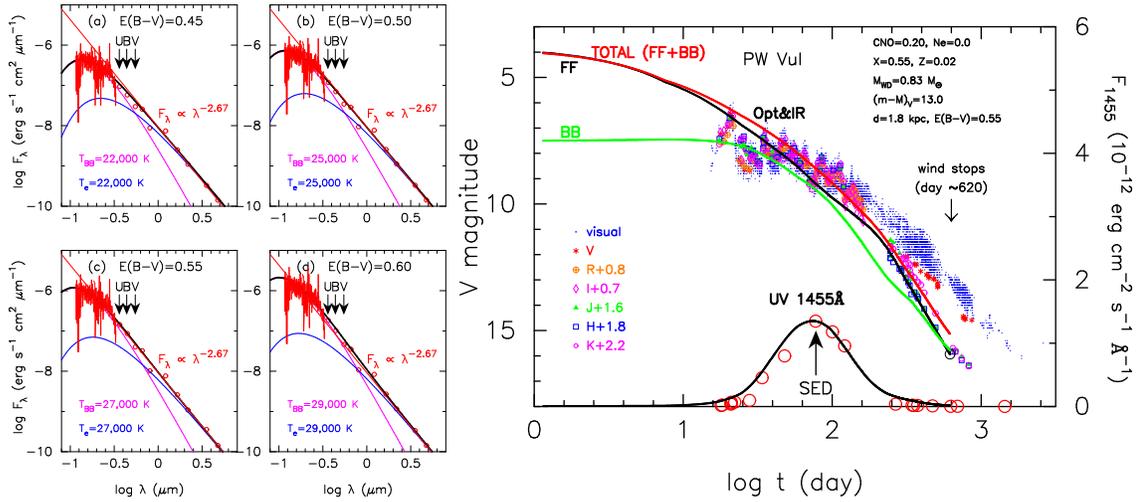


図 4: 左図: PW Vul の爆発後 64 日目のスペクトルを光学的に厚い自由-自由遷移光スペクトル (青い線) と黒体輻射近似スペクトル (紫色の線) に分解。二つのスペクトルの合計が黒い太線である。新星のスペクトルは、IUE 紫外衛星 (赤い細実線)、他は光帯域バンド ($U, B, V, R, I, J, H, K, L, M, N$) の等級。 T_e は自由-自由遷移光の電子温度。 T_{BB} は黒体輻射スペクトルの温度。4つの図は、色星間吸収量が違う。(a) $E(B-V) = 0.45$, (b) $E(B-V) = 0.50$, (c) $E(B-V) = 0.55$, (d) $E(B-V) = 0.60$ 。ここでは、(c) の $E(B-V) = 0.55$ を採用した。 V バンド近傍では、両方の寄与が同じくらいある。右図: 実際に光球面からの黒体輻射による光度曲線 (緑色の線で BB と表示) と free-free emission による光度曲線 (黒色の線で FF と表示)、その両方の寄与を計算したもの (赤色の線で TOTAL と表示) を示した。 SED と表示されている矢印のところで左図のスペクトルを撮った。

$M_{WD} = 0.78 M_{\odot}$ で、 V バンド、 $UV\ 1455\text{\AA}$ 共に、良く再現できる。この新星の場合、比較的初期では、 free-free emission の寄与が大きく、 black-out の真中あたりで、二つの寄与が同じ程度になる。このため、残念ながら、比較的初期においてのみ、再現できたことになる。絶対等級や距離など、すべて整合性のあるモデルが構築できた。

次は、速い新星 (fast nova) に分類される、 GQ Mus である。これは、超軟 X 線も受かっていて、白色矮星質量は、 $M_{WD} = 0.65 M_{\odot}$ で良く再現できる。このように白色矮星質量が小さいと、 free-free emission (図 5 の右側の図で青色の線) よりも、光球面からの輻射 (赤色の線) の寄与が大きい。

最後の 4 つは、非常に遅い新星で、 multiple-peak と呼ばれる、極大付近のいくつかのピークが特徴である。このような非常に減衰の遅い古典新星の multiple-peak の起源として、 Kato & Hachisu (2009, ApJ, 699, 1293) は static な envelope solution から wind solution へ、白色矮星表面の水素外層の構造が爆発初期で変化することを提唱した。はじめは、ゆっくりと水素外層が膨張するので、わりと flat な時期 (premaximum halt ともいう) を経て、 wind solution に移行するので、大きな構造変化の緩和現象として、振動が現れるというものである。いくつかのピークはその緩和の際の振動を示していると解釈する。

さて、そのように考えると、緩和が終わった後には、通常の古典新星と同じように、激しい質量放出が起こるので、 free-free emission が寄与してくる。ただし、光球面からの輻射も大きく寄与するので、その合計が光度曲線となる。そこで緩和が終わった後から、光度曲線をフィットすることにした。いつ wind への移行が終わるかわからないので、ここでは最初のピークから出発した場合と、後のピークから出発した場合のモデルを構築した。

RR Pic は最初の立上りが観測されていない。このため、どのピークが最初のピークか判断がつかないが、観測された最初のピークにあわせて、光度曲線のモデルを作成した。白色矮星質量

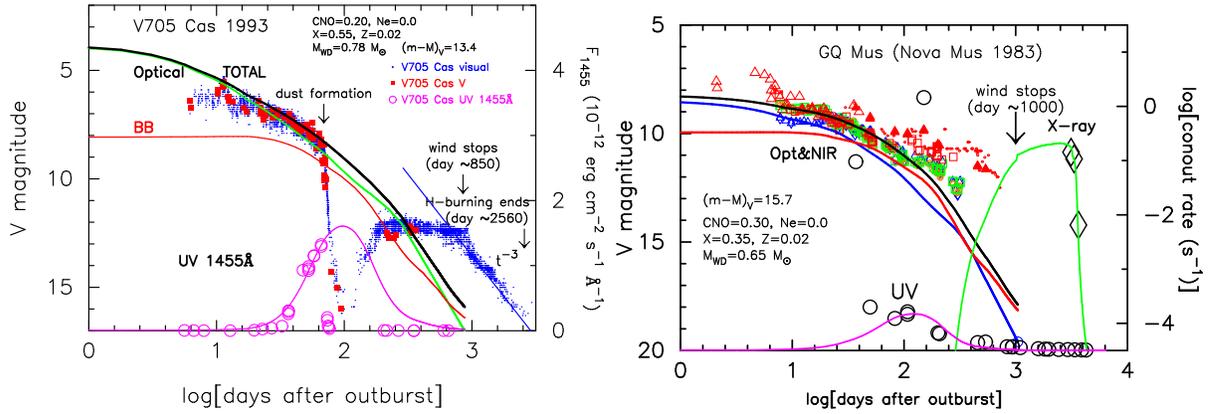


図 5: 左図 : V705 Cas の光度曲線フィット。右図 : GQ Mus の光度曲線フィット

は、 $M_{\text{WD}} = 0.6 M_{\odot}$ 程度で割と良く再現できる。ただし、UV 1455Å のデータがないので、このフィッティングはおおまかなものでもある。赤色の線が光球面からの黒体輻射近似の光度曲線、青色の線が free-free emission の寄与、そして、黒色の線が、それらの合計を表している。この RR Pic は距離が HST の年周視差観測 (Harrison et al. 2013, ApJ, **767**, 7) により正確に求まっているので、図中の距離指数は誤差が少ない。初期の光度曲線は私たちのモデルの絶対等級と良く合っている。このことは、われわれのモデルの確からしさを補強してくれている。私たちのモデルとのずれがあらわれる時期から、この新星は星雲期 (nebular phase) に入る。星雲期に入ると、非常に強い輝線 ([O]III の禁性線) が V バンド (あるいは visual magnitude) に寄与してくる。われわれのモデルには、emission lines の寄与は入っていないので、このずれは再現できない。

V5558 Sgr は、非常にきれいな multiple-peak を示す。白色矮星質量は、 $M_{\text{WD}} = 0.55 M_{\odot}$ 程度で、光度曲線を良く再現できる。図 7 の右図の中で、黒色の線が光球面からの黒体輻射 (BB)、緑色線が free-free emission (FF)、青色線がそれらの合計 (TOTAL) である。

HR Del は、不明瞭な multiple-peak を示す。白色矮星質量は、 $M_{\text{WD}} = 0.51 M_{\odot}$ 程度だろうと思われる。図 7 の左図の中で、緑色の線が光球面からの黒体輻射 (BB)、青色線が free-free emission (FF)、赤色線がそれらの合計 (TOTAL) である。

V723 Cas は、比較的大きな multiple-peak を示す。この新星は、取り上げた中では、もっとも遅い時間進化を示す新星である。このため、白色矮星質量は、最も小さいであろうと思われる。私たちのモデルでは、強い新星風が吹くのは、 $M_{\text{WD}} = 0.51 M_{\odot}$ が最小質量なので、このモデルをつかう。このモデルで、光度曲線を良く再現できる。この新星は、UV 1455Å だけではなく、超軟 X 線も受かっている。図 7 の右図の中で、水色の線が光球面からの黒体輻射 (BB)、青色線が free-free emission (FF)、黒色線がそれらの合計 (TOTAL) である。これらのは 4 つの新星は、光度曲線上でパルスのあるところでは、free-free emission が大きく寄与するが、それ以外では、光球面からの輻射の方が大きい。このため、 t_3 時間は、free-free emission だけの場合より、2 倍から 3 倍長くなる。

5. いろいろな古典新星の MMRD 関係

私たちの free-free emission モデルに基づいた光度曲線の絶対等級は、図 3 に示した。ここで、紫色の点 B は PW Vul の極大光度に対応し、このモデル光度曲線に沿って、 t_3 時間を測れば、このモデルに基づいた MMRD 関係が求まる。それを表示したものが、図 8 の左図である。この図中には、V1668 Cyg に基づいた、モデル光度曲線の MMRD 関係も黒の破線で表示してある。

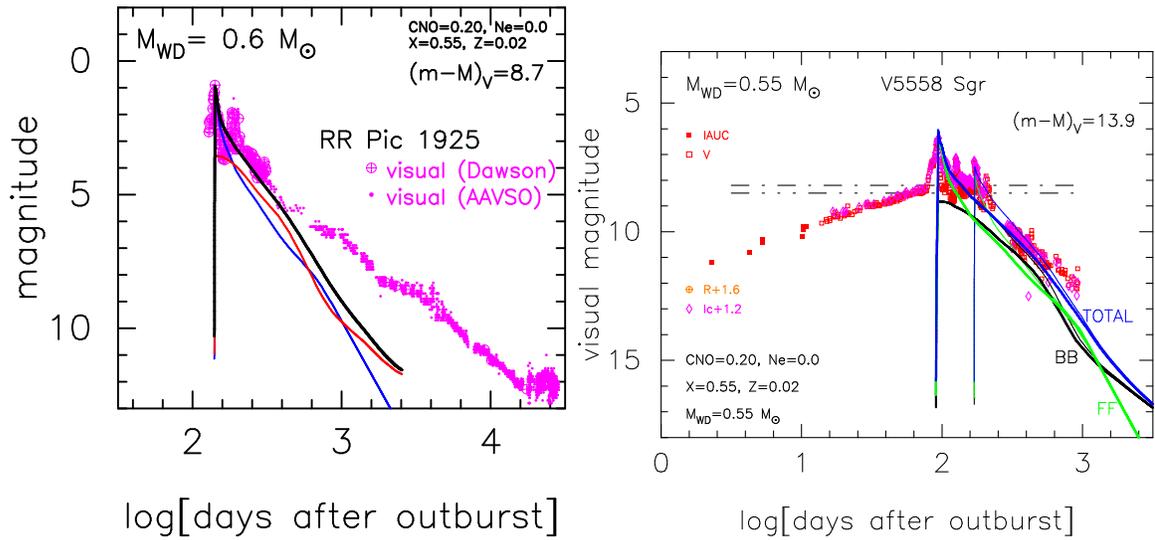


図 6: 左図 : RR Pic の光度曲線フィット。右図 : V5558 Sgr の光度曲線フィット。

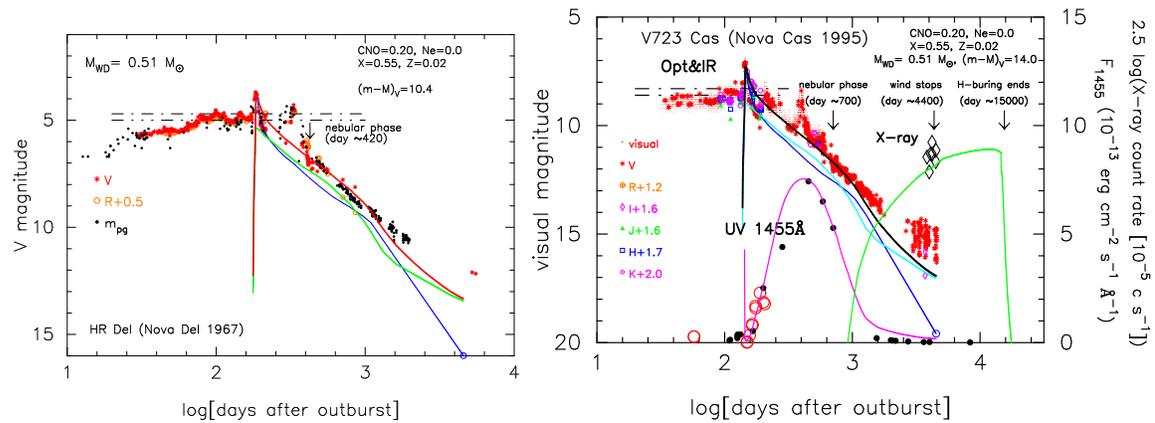


図 7: 左図 : HR Del の光度曲線フィット。右図 : V723 Cas の光度曲線フィット。

PW Vul および V1668 Cyg のどちらに基づいた MMRD 関係でも、Schmidt (1957) の MMRD1 関係とよく似ている。このことから、普遍的減光則 (universal decline law) に従う、自由-自由遷移光の光度曲線は、この種の MMRD 関係に従うことが分かる。

しかし、遅い新星は、光球面からの輻射が大きく寄与してくる。このため、前に見たように、 t_3 時間が free-free emission にのみ基づいた光度曲線に比べて、2倍から3倍長くなる。この効果は、見かけ上、 $2.5 \log 2 \sim 0.8$ 等、あるいは、 $2.5 \log 3 \sim 1.2$ 等程度、極大光度が実際より明るく見えることに対応する。これが、遅い新星の MMRD 関係が Schmidt の MMRD1 (青色の線) より、長い t_3 においてずれてくることをうまく説明する。これが、della Valle & Livio (1995) の MMRD2 (紫色の線) で近似できることの背景にある。

6. まとめ

以上みてきたように、古典新星の光度曲線は free-free emission で説明でき、遅い新星では、これに光球面の寄与を加えたもので説明できることがわかった。MMRD 関係は2つの主要要因

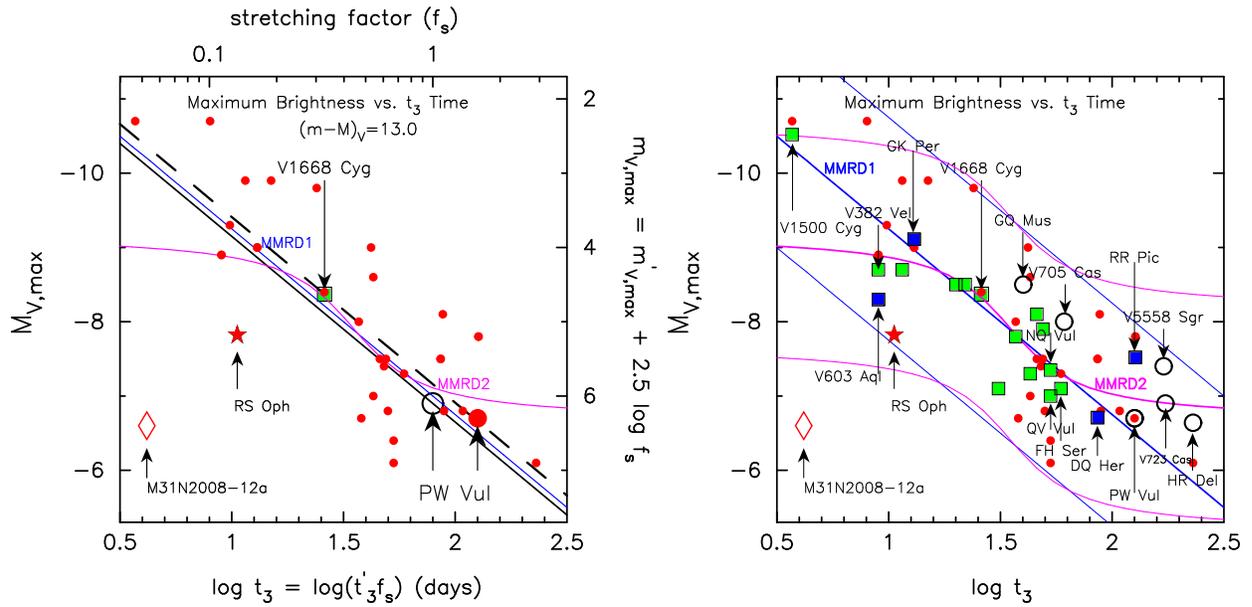


図 8: 左図 : PW Vul モデルから求めた MMRD 関係。図 3 の紫色の点が極大光度、それから 3 等下がる時間が t_3 時間である。この関係を連ねた線が、黒の実線である。図 3 の理論的な光度曲線に沿って、 t_3 時間を測るので、実際の光度曲線から求めた t_3 時間 (赤●で PW Vul と矢印で示してあるもの) とは異なる (黒○で PW Vul と矢印で示してある)。小さい赤●印は、Downes & Duerbeck (2000, AJ, **120**, 2007) が主に新星残骸の膨張より求めた距離指数を使って求めた $M_{max} - t_3$ 関係より抜粋。右図 : いろいろな古典新星の MMRD 関係。今回求めた遅い新星 6 個に関しては、黒○印で表示してある。Schmidt の MMRD 関係 (青色の線、MMRD1 と表示) より、右側に大きくずれていることが分かる。これが、”はじめに” で述べた、系統的なずれでもある。della Valle & Livio (1995, ApJ, **452**, 704) の MMRD 関係 (紫色の線、MMRD2 と表示) では、比較的良くあっている。左右の両図共に、詳細は Hachisu & Kato (2015, ApJ, **798**,76) を参照。

で決まり、第一は白色矮星の質量である。これが最も基本的な新星のスピードクラスを決める。Schmidt の MMRD 関係も基本的にはこの要因から説明できる。この基本的な関係の周りに、多くの新星はあるバラツキをもって分布する。この分布は第二のパラメータによるもので、これは新星が爆発するときの、白色矮星の水素外層の質量である。この水素外層の質量は、伴星から白色矮星への質量降着率によって決まる。質量降着率が大きいと、着火質量は小さくなり、逆に質量降着率が小さいと、大きくなる。遅い新星において重要になる光球からの輻射の効果は、第三の要素となるのであるが、それは、free-free emission だけで決まる t_3 よりも、見かけ上、長い t_3 をつくる。このため、 t_3 の長い方でのみ、極大光度が Schmidt の MMRD 関係より 1 等程度明るくなるずれを生み出す。このようにして、新星の光度曲線のおおまかな性質をすべて説明することができる。なお、ここでの結果は、Hachisu & Kato (2015, ApJ, **798**,76) より要約である。詳しい内容はこの論文を見てください。