

古典新星爆発の色等級図 (正確な距離の決定)

蜂巢 泉 (東大総合文化)、加藤 万里子 (慶応大学)

概要

古典新星は白色矮星表面に降着した水素の不安定殻燃焼によって引き起こされる。その光度曲線は時間軸方向にスケールするとほぼ重なり合う。この減衰形を普遍的減光則 (universal decline law) とよぶ。実は、色曲線も同じ時間スケールで短縮あるいは伸長するとほぼ重なり合う。縦軸に普遍的減光則に従う等級をとり、横軸に色指数をとると、この色等級図上で、古典新星爆発の進化はほぼ1本の線で表すことができる。普遍的減光則から導かれる1本の軌跡である。これをもとに、任意の古典新星の色等級図をこの軌跡 (track) と重ねることで、横軸から色超過 $E(B-V)$ が、縦軸から距離指数 $(m-M)_V$ が求まり、それを使うと、古典新星までの正確な距離 d を求めることができる。今回、70におよぶ古典新星について、この方法で正確な距離を求めることができた。

古典新星のスピードクラス

新星の光度曲線の減衰の速さから、新星のスピードクラスが決められ、減衰の速いもの (fast novae) は、白色矮星質量が大きく、遅いもの (slow novae) は質量が小さい。減衰期の新星の光度曲線は主に光学的に薄い外層のプラズマからの自由-自由遷移光によって決まることなどについては、今までの「連星・変光星・低温度星研究会」で報告してきた。その物理的過程をまとめると以下ようになる。

光球輻射と自由-自由遷移光

その様子を、正確さは犠牲にして、概念的に示すと、図1のようになる。膨張初期には、膨張する外層の密度が濃いので、光球が直接見えるとしてよい。いわゆる、“火の玉”モデルである。このような場合、新星のスペクトルは超巨星 (supergiant) に似たものとなる。よく言われるように、F型超巨星のスペクトルで近似される。しかし、その後、膨張につれて外層は次第に薄くなっていき、光学的に薄いプラズマからの自由-自由遷移放射光 (free-free emission) が主体となる。ここでは、このスペクトルの様子を図2に表示した。

古典新星の絶対光度と光度曲線の減衰率

新星の光度曲線が自由-自由遷移光で表せる場合、光度曲線は白色矮星の質量や元素組成にほとんどよらない相似形である (Hachisu & Kato, 2006, ApJS, 167, 59)。つまり、普遍的な光度曲線の形が存在する。その例を図3に示した。実際のタイムスケールは、白色矮星の質量などによるが、それは、あるひとつのパラメータ (stretching factor f_s) により表せる。ここでは、古典新星 LV Vul の時間スケールを単位とし、その時間スケールの何倍かを f_s で表す。この時間スケール f_s を決めれば、自由-自由遷移光の光度曲線の時間尺度も白色矮星の質量もほぼ決まる。図3では、色補正をした後の $(B-V)_0$ と $(U-B)_0$ の色曲線が、できるだけ重なるようにして、各々の古典新星の f_s を決めた。その値は図中に表示してある。二つの古典新星の相対的な光度は、時間尺度のスケール則によってきまり、 $m_V = m'_V + 2.5 \log f_s$ のように決まる (Hachisu & Kato, 2010, ApJ, 709, 680)。ここでは、等級 m'_V は対比する LV Vul の等級である。10倍タイムスケールが短いと、2.5等明るい、という関係である。もちろん、LV Vul の絶対等級 (あるいは距離指数 $(m-M)_V$) が分かれば、当該の古典新星の絶対等級を求めることができる。例えば、V等級の減光のタイムスケールを観測と合わせて、絶対等級や白色矮星の質量を決めることができるが、図のよう

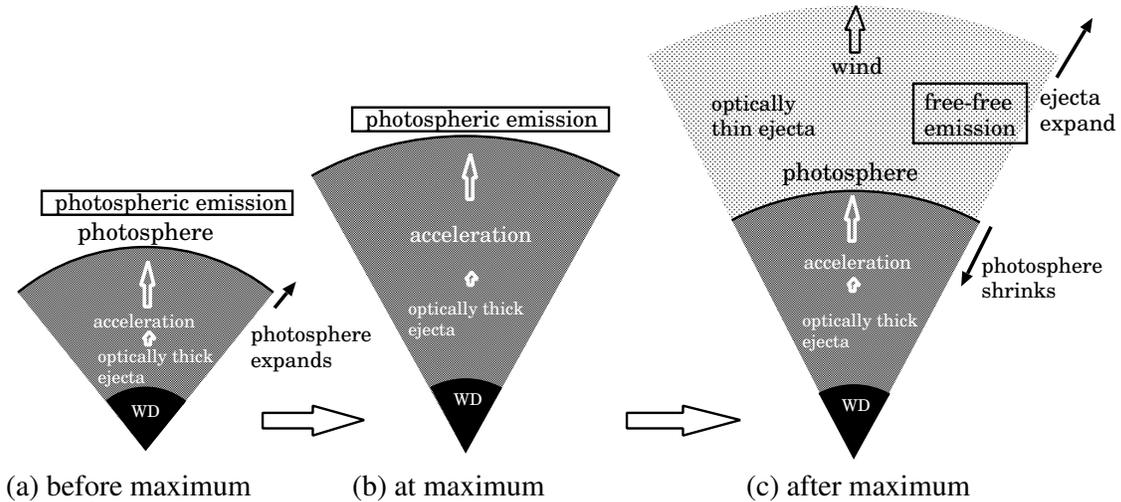


図 1: 古典新星の光球付近からの輻射の様子: (a) 新星の爆発する外層の密度が比較的高い場合は、光球が直接見える (いわゆる fire-ball “火の玉” 状態)。 (b) それが光度最大まで続く。このように光球が直接見える場合は、F 型超巨星のスペクトルを示すと言われる。 (c) その後は膨張に伴い、外層密度が薄くなり、光学的に薄いプラズマからの free-free emission が主体となる。

に紫外線 (UV 1455Å) や X 線 (X-ray) などの観測があると、決定精度が非常に良くなる。例えば、図 3 左の例では、V1668 Cyg の白色矮星質量が $0.98 M_{\odot}$ であり、右の例では、V1974 Cyg の白色矮星質量が $1.0 M_{\odot}$ であることを示している。仮定した元素組成も図中にある。

2 色図中の古典新星の進化経路

古典新星が $(B - V) - (U - B)$ の 2 色図中でどのように進化するかということは、古くから色々な研究者によって議論されてきた。しかし、その進化経路が複雑なこともあり、最近まで、理論的に理解され、確立されたとは言えなかった。しかし、図 3 をみても分かるように、古典新星爆発の前半は、 $(B - V)_0$ 色曲線も、 $(U - B)_0$ 色曲線も良く揃っている。ともに 1 本の線に近い。私たちは、これを $(B - V)_0 - (U - B)_0$ の 2 色図中に描き、どの新星も 1 本の線の近くを進むことを示した。このようにして、多くの古典新星がたどる一般的な進化経路を 2 色図中に見付けることができた (Hachisu & Kato 2014, ApJ, 785, 97)。

この一般的な進化経路 (general track) と当該の古典新星の経路を 2 色図中で合わせることで、その古典新星の色超過 $E(B - V)$ を決定することができる。これについてはすでに、「連星系・変光星・低温度星研究会」で発表している。詳細は、Hachisu & Kato (2014, ApJ, 785, 97) を参照されたい。

色等級図中の古典新星の進化経路

ここまで来ると、色等級図上でも一般的な進化経路があるのではないかと期待される。しかし、各々の古典新星の絶対等級はまちまちで、とても、揃っているとはいえない。2014 年の発表では、一般的な進化経路はあきらめて、いくつかのパターンを提示するにとどまった (Hachisu & Kato 2016, ApJS, 223, 21)。要するに、失敗したのである。今回、図 3 で見るように、普遍的減光則 (の等級) と色進化曲線はともに 1 本の線で表されることに基づき、この線を基にして、色等級図を描くことにした。そうすると、図 4 に示すように、1 本のほぼ一般的な線をたどることを示すことができた。色等級図の縦軸の絶対等級 M_V の代わりに、スケール則の光度 $M_V + 2.5 \log f_s$ を採用するのである。このことにより、ほぼすべての古典

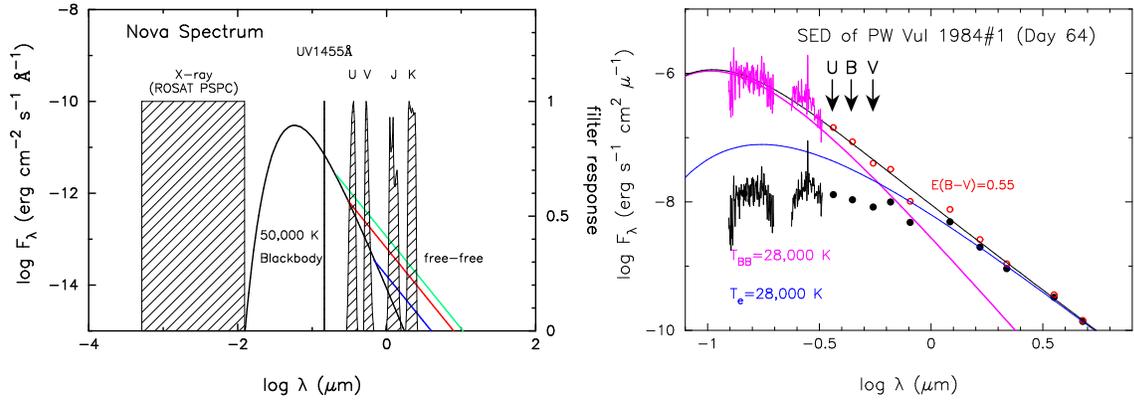


図 2: **Left:** 古典新星のスペクトルモデルと各フィルターのレスポンス。可視光領域より長い波長では free-free emission の寄与がある。緑線、赤線、青線の順に白色矮星からの質量放出率 (\dot{M}_{wind}) が小さくなるので、free-free emission の flux のレベルが下がる。**Right:** 遅い古典新星 PW Vul 1984#1 の爆発後 64 日のスペクトル。黒(下)は赤化補正前、紫(上)は星間赤化 ($E(B-V) = 0.55$) の補正後のもの。補正後のモデルフィッティング。黒体輻射(紫色)と free-free emission (青色)の合成(黒色の線)で良く近似できる。

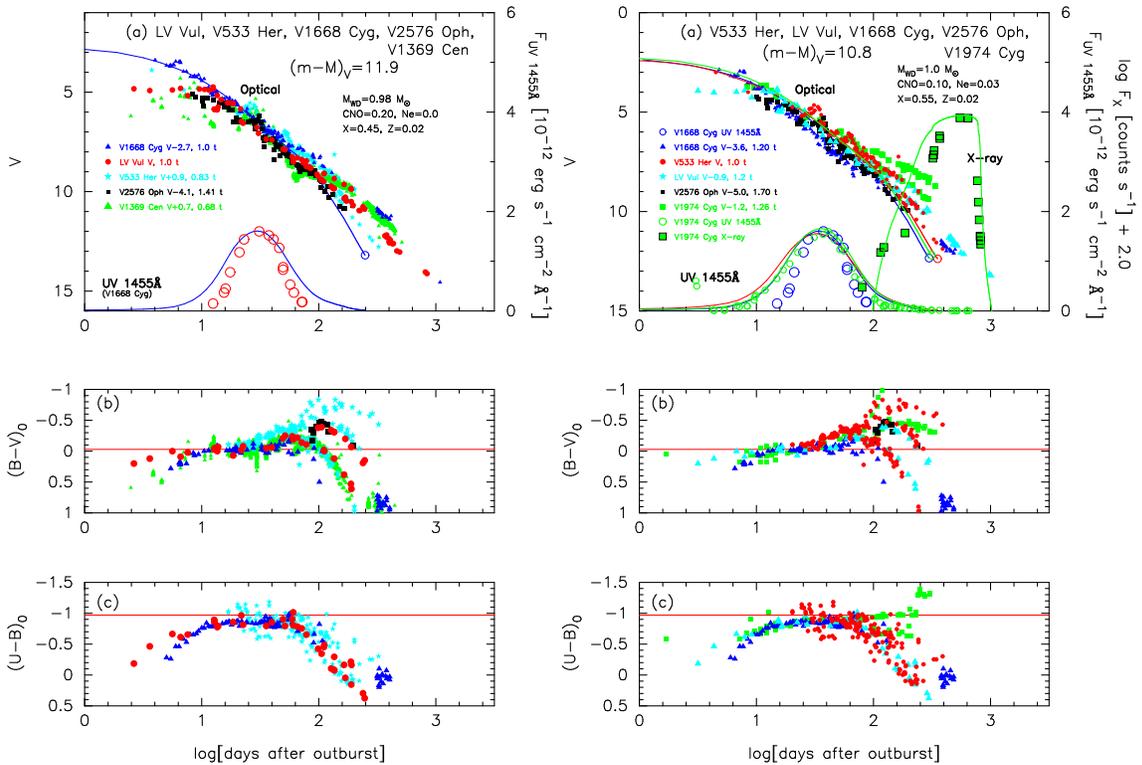


図 3: **Left:** 5 個の古典新星の光度曲線を重ねたもの。V1668 Cyg については理論的に求めた $0.98 M_{\odot}$ 白色矮星の光度曲線(青色実線)を表示。絶対等級。元素組成は $X = 0.45, Y = 0.18, Z = 0.02, C + O = 0.35$ を仮定。**Right:** 左の図の V1369 Cen の代わりに V1974 Cyg を入れたもの。理論光度曲線は、 $1.0 M_{\odot}$ WD で、元素組成は $X = 0.55, Y = 0.23, Z = 0.02, C + O = 0.20$ を仮定。

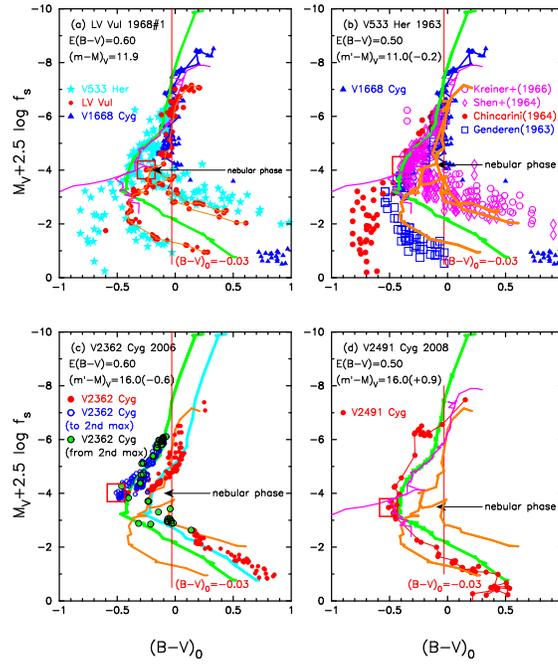


図 4: (a) LV Vul 1968#1、(b) V533 Her 1963、(c) V2362 Cyg 2006、および (d) V2481 Cyg 2008 の色等級図上の進化。図中の黄緑線は V1500 Cyg、オレンジ (黄土) 色は LV Vul、青色は V1668 Cyg、マゼンダ (赤紫) 色は V1974 Cyg の爆発中の進化。

新星は、ほぼ同じ進化経路を色等級図中でたどることになった。

良く調べてみると、この 1 本は、実は 1 本ではなく、図 4 では緑色の実線で表された V1500 Cyg タイプと、オレンジ (黄土) 色の実線で表された LV Vul タイプとに 2 分される。多くの新星は、このどちらかをたどることになるが、V2362 Cyg という 2 次極大を持つ新星は、最初の減衰は、LV Vul の軌跡の近くを通り、2 次極大の時は、V1500 Cyg の軌跡をたどる。要するに、二股をかけているものもある。

このどちらかの軌跡と当該の新星の軌跡を合わせることにより、横軸からは、色超過 $E(B-V)$ がもとなり、縦軸からは、 $M_V + 2.5 \log f_s$ 値が求まるので、図 3 のような、universal decline law に合わせることで、 f_s が求まるので、結局、 M_V すなわち $(m-M)_V$ が求まる。これより、 $(m-M)_V = R_V E(B-V) + 5 \log(d/10 \text{ pc})$ を使えば、距離 d が求まるのである。ここでは、 $R_V = 3.1$ とした。このようにして、約 70 個の古典新星について、その距離をもとめることができた。