

可視・近赤外で探る赤色巨星の LSP 現象

高山正輝[†] (兵庫県立大学)

[†] E-mail: takayama@nhao.jp

Abstract

赤色巨星で見つまっている超長周期の変光現象、Long Secondary Period(以下 LSP)、の起源について研究した。LSP の変光の起源について、これまでに様々な仮説が提案されてきたが観測結果を上手く説明出来たモデルはなく、よくわかっていない。最近では Saio et al. (2015) が星の g mode 脈動による変光の可能性を提案した。本研究では LSP に対応する変光が顕著に見られる小マゼラン星雲の赤色巨星について、OGLE の可視 VI バンド、IRSF/SIRIUS camera による JHK_s バンドでの光度曲線と、MCPS の UB バンド、Spitzer の [3.6][4.5][5.8][8.0] バンドでの測光データを組み合わせ、星の bolometric luminosity の変動の振幅 $\Delta L/L$ と effective temperature の振幅 $\Delta T_{\text{eff}}/T_{\text{eff}}$ の間には $(\Delta L/L)/(\Delta T_{\text{eff}}/T_{\text{eff}}) \sim 4$ という結果を得た。これは Saio et al. の脈動モデルと無矛盾である。続いて、星の非動径脈動の dipole mode を仮定し、モデルと観測の比較を行った。その結果、星のスペクトルを黒体放射と仮定したモデルは炭素星の光度振幅を上手く説明出来た。一方、MARCS の M 型星のスペクトルを仮定したモデルは M 型星の光度振幅を上手く説明出来た。以上から LSP の変光は星の脈動と考えると上手く説明が出来る。

Key words: 星: 赤色巨星 - 星: 変光星 - 星: 脈動 - マゼラン星雲

1, Introduction

赤色巨星変光星の中には、LSP と呼ばれる非常に長い周期の変光を見せるものが多数見つまっている (e.g. Wood et al. 1999; Soszynski et al. 2009, 2011)。LSP の長さは 400 日~1500 日程度である。この長い周期の変光の最中に数日程度の周期の短い、振幅の小さな変光も同時に起きている。この短い周期(primary period)の変光の原因は赤色巨星の脈動である (Wood et al. 1999)。

LSP の変光の起源についてこれまで多様な仮説が提案されてきた。しかし上手く観測結果を説明出来たモデルはなく、未だによくわかっていない。動径脈動による変光は直ちに否定される。赤色巨星の動径脈動の基本振動に対応する Mira 型変光星の長い周期よりも LSP は長いためである。連星の食仮説は視線速度曲線の形状がどの LSP 星でも類似していることから否定された (Hinkle et al. 2002)。一部の LSP 星では中間赤外の超過が見つかったため、ダストの雲による減光が提案された (Wood & Nicholls 2009)。しかし可視・近赤外での color の時間変化はダストによる減光では説明出来なかった (Takayama et al. 2015)。また LSP による変光の可視での光度曲線は、その形状が自転する星の黒点による変光の光度曲線に似ていた (Soszynski & Udalski 2014)。しかしダストの時と同様に、可視・近赤外での color の時間変化は黒点による減光では説明出来なかった (Takayama et al. 2015)。

最も新しい仮説は Saio et al. (2015) によって提案された星の非動径脈動である。彼らは、非常に明

るい赤色巨星のような星ではガスの非断熱の効果が強くなり、g mode が励起される可能性があることを理論的に示した。また非動径脈動の dipole mode の周期が LSP の周期光度関係におおよそ一致していた。

本研究では OGLE と IRSF/SIRIUS camera による可視・近赤外での長期モニタリング測光観測のデータと、MCPS の可視光測光データおよび Spitzer の中間赤外線測光データを組み合わせることで、LSP 現象の変光原因の解明を目指した。また星の非動径脈動の dipole mode を仮定し、モデルスペクトルを用いて可視・近赤外波長域での光度振幅を数値計算し、OGLE と SIRIUS の観測データとの比較を行った。

2, Data

本研究では小マゼラン星雲の赤色巨星をサンプルに選んだ。OGLE のデータベースより Soszynski et al. (2009)と同様の手法で LSP 星を選び、V, I バンドの time series を得た。また J, H, K_s バンドの time series は IRSF/SIRIUS camera の観測データ(Ita in prep)から得た。I, J, K_s バンドの time series に対して 1 次の Fourier series を用いたフィットを行い、それぞれのバンドでの変光周期 P_I, P_J, P_K を得た。OGLE の I バンドの time series は 1997~2009 年までの間に 700~1000 epoch のデータ点があり、最もデータ密度が高い。そこで、どの波長のライトカーブにも顕著に LSP の変光が見える天体をサンプルとするために、P_J, P_K がどちらも P_I の ±5% 以内に収まる LSP 星だけを取り出した。その結果 36 個の M 型星の LSP 星と、25 個の炭素星の LSP 星を得た。加えて MCPS のデータベース(Zaritsky et al. 2002)、Spitzer SAGE SMC IRAC のデータベース(Gordon et al. 2011)から前述の 61 個の星の U, B バンド、[3.6][4.5][5.8][8.0] バンドのデータを得た。

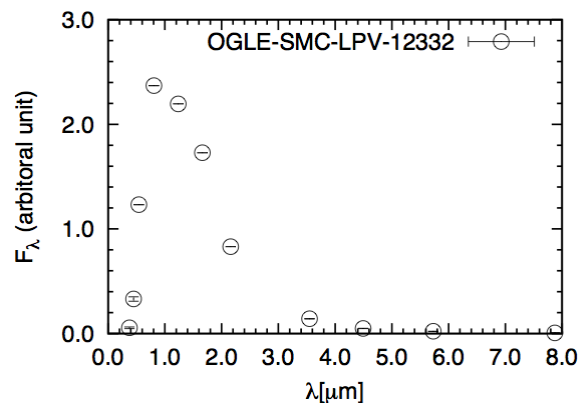


Figure 1 VIJHK バンドの等級から見積もった、ある時刻でのサンプル天体の可視~赤外域での SED。UB バンド、[3.6][4.5][5.8][8.0] バンドのフラックスは MCPS, Spitzer で得られた等級(single epoch)から見積もった。

Figure 1 はある時刻での各バンドの等級の値からフラックスの値を見積もって得た、サンプル天体 (OGLE-SMC-LPV-12332) の SED である。同様にして VIJHK バンドの time series データを用いて、星の bolometric luminosity の time series を見積もった。UB、[3.6][4.5][5.8][8.0] バンドのデータは single epoch であるため time series は存在しない。しかしトータルフラックスに対し、

これらの波長の寄与は十分小さいのでその時間変動は無視した。

続いて様々なバンドを使って得た color の time series から、星の effective temperature の time series を見積もった。今回は M 型星と炭素星に対して Houdashelt et al. (2000) と Bessell et al. (1983) の color- T_{eff} relation をそれぞれ適用した。またこの時 $E(B-V)=0.12$ mag (Keller & Wood 2006)、 $R_V=3.2$ (Cardelli et al. 1989) を適用した。

3, Results

半径 R の星の光球から発せられるスペクトルを黒体放射とみなすと、bolometric luminosity L と effective temperature T_{eff} の間には、

$$\frac{\Delta L}{L} = 2 \frac{\Delta R}{R} + 4 \frac{\Delta T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}}}$$

の関係を得る。L、 T_{eff} の time series に対して single sin カーブをフィットし、 ΔL 、 ΔT_{eff} の値をそれぞれ見積もった。この時フィットする sin カーブの周期として P_1 を適用した。

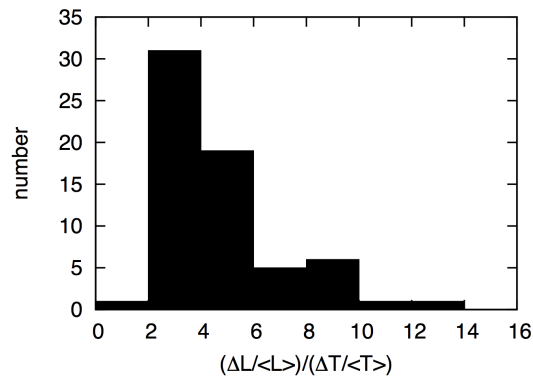


Figure 2 61 個のサンプル天体を用いた、光度振幅と有効温度の振幅の比の値の度数分布。

Figure 2 は 61 個のサンプル天体の光度振幅と有効温度の振幅の比の値の度数分布である。振幅の比 $(\Delta L/L)/(\Delta T_{\text{eff}}/T_{\text{eff}})$ は $(\Delta L/L)/(\Delta T_{\text{eff}}/T_{\text{eff}}) \sim 4$ の周りに多く分布している。このことは LSP の 1 周期の間に、星の半径の変動がほとんどないことを示唆している。これは線形非動径脈動の双極子モードの振動の理論的結果によく一致している。すなわち LSP 現象が星の双極子モードの振動であると主張した Saio et al. (2015) の結論と無矛盾である。

4, Pulsation model

Section 3 の結果から、LSP 現象の正体を星の非動径脈動の双極子モードの振動であると仮定した。非動径脈動では星の光球で有効温度に勾配が生じる。そこで星のトータルフラックスは、それぞれの地点の有効温度に対応した放射の観測者方向への総和と仮定した。また Neilson & Lester (2013) の linear limb darkening law を適用した。ある温度の光球面から放射されるスペクトルとして、黒体放射と MARCS code (Gustafsson et al. 2008) の M 型星のスペクトルモデルの 2 つをモデルスペクトルとして試した。今回は平衡状態での温度として $T_{\text{eff},0}=3400\text{K}$ を仮定した。ある有効温度の振幅を与えると、pulsation axis の inclination によって光度振幅の大きさは異なる。そこで

inclination angle について 0° , 30° , 60° , 90° の場合の SED を計算した。

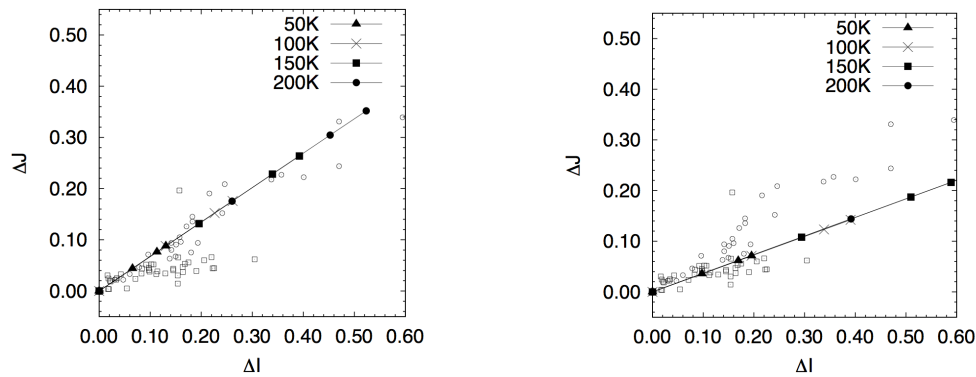


Figure 3 I バンドと J バンドでの光度振幅の関係。□は M 型星の LSP 星。一方○は炭素星の LSP 星。左図のモデル線は星のスペクトルとして黒体放射を仮定した場合。右図は M 型星のスペクトルを仮定した場合。

Figure 3 は I バンドと J バンドの光度振幅について、モデルと観測結果を比較したもの。モデルのシンボルは図の右上の有効温度の振幅に対応している。また原点(ΔI , ΔJ)=(0, 0)は inclination angle が 90° に対応し、inclination angle の減少と共に振幅は大きくなる。この図から、光度振幅が増加するときの傾きは有効温度の振幅に依らずモデルスペクトルに依存することがわかる。また黒体放射と M 型星スペクトルに対応するモデルラインが、炭素星の LSP 星と M 型星の LSP 星の光度振幅の分布を上手く説明出来ることがわかった。

5, Conclusions

61 個の LSP 星を調べ、bolometric luminosity と effective temperature の振幅の比が 4 程度であることがわかった。このことは LSP の変光が星の有効温度の変動に起因すること、また星の半径がほとんど変動しないことを示唆している。これは星の非動径脈動の双極子モードに一致する。加えて双極子モードを仮定すると、異なる波長で観測した光度振幅の値を上手く説明出来ることがわかった。以上のことから、LSP の変光の原因は星の脈動で上手く説明が出来る。

References

- | | |
|---|---|
| Bessell et al., 1983, MNRAS, 202, 59 | Soszynski I., Udalski A., 2014, ApJ, 788, 13 |
| Cardelli et al., 1989, ApJ, 345, 245 | Soszynski et al., 2009, AcA, 59, 239 |
| Gordon et al., 2011, AJ, 142, 102 | Soszynski et al., 2011, AcA, 61, 217 |
| Gustafsson et al., 2008, A&A, 486, 951 | Takayama et al., 2015, MNRAS, 448, 464 |
| Hinkle et al., 2002, AJ, 123, 1002 | Wood et al., 1999, IAU Symp., 191, 151 |
| Houdashelt et al., 2000, AJ, 119, 1424 | Wood P. R., Nicholls C. P., 2009, ApJ, 707, 573 |
| Keller S. C., Wood P. R., 2006, ApJ, 642, 834 | Zaritsky et al., 2002, AJ, 123, 855 |
| Neilson H. R., Lester J. B., 2013, A&A, 554, 98 | |
| Saio et al., 2015, MNRAS, 452, 3863 | |