

長いプラトーを持つII P型超新星SN 2023vogの観測的研究

鹿児島大学 理学部理学科 物理・宇宙プログラム 4年 杉山祐羽

概要

長いプラトー期間を持つII P型超新星SN 2023vogの可視光・近赤外線観測および分析を実施したのでこれを報告する。我々は、鹿児島大学1m望遠鏡に搭載されているkSIRIUSで取得された近赤外線データに加えZTFおよびATLASの公開された可視光測光データを分析した。その結果、可視光・近赤外線ともに約130日のプラトーが確認された。これはAnderson et al. (2014)で示された多数のサンプルと比較して非常に長い。特に典型的なII P型に比べると1.3倍程度である。一方、既知の理論式に適用させると、本天体は標準的なII P型超新星に比べて3倍程度の質量を得る。しかしながら本天体は非常に長いプラトーを有するため、モデルの適用範囲であるかどうか検証が必要である。本発表は、SN 2023vogの観測結果と、他のII P型との比較、また物理量の計算からの考察をまとめたものである。

①研究背景

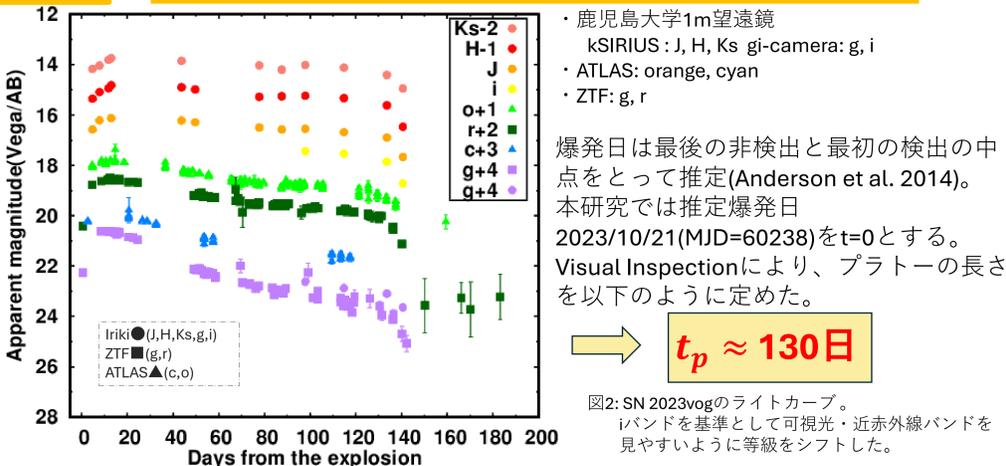
●II P型超新星(Type II P SNe)・水素外層を持つ赤色超巨星(RSG)が重力崩壊⇒爆発
・全ての重力崩壊型超新星の約6割
観測的特徴：
・光度曲線に光度一定のプラトーが現れる
プラトーの長さ≒80~120日間 (Anderson et al. 2014)
・スペクトルやライトカーブは多様性に富む
⇒親星や爆発時のパラメータが反映されている

赤色超巨星問題

●II P型超新星の親星、RSG
・観測的研究⇒概ね8~20 M_☉の範囲に分布する
一方で恒星進化モデルでは10~30 M_☉

本研究では、長いプラトーを持つII P型超新星を観測することができたので、その特徴や、長いプラトーの起源を探る

③結果 SN 2023vogの可視光・近赤外線のライトカーブ



SED(Spectral Energy Distribution)

SEDを作成し、黒体放射の式(1)を用いてフィットした。77日後以降のSEDについて、rバンドが黒体フィット関数から外れて明るい。これはH α 輝線の影響を受けた可能性が高い。それを除くとSEDは概ね単一黒体モデルで再現される。

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

B $_{\lambda}$: 放出エネルギー
h: プランク定数
c: 光速
 λ : 波長
k: ボルツマン定数
T: 絶対温度

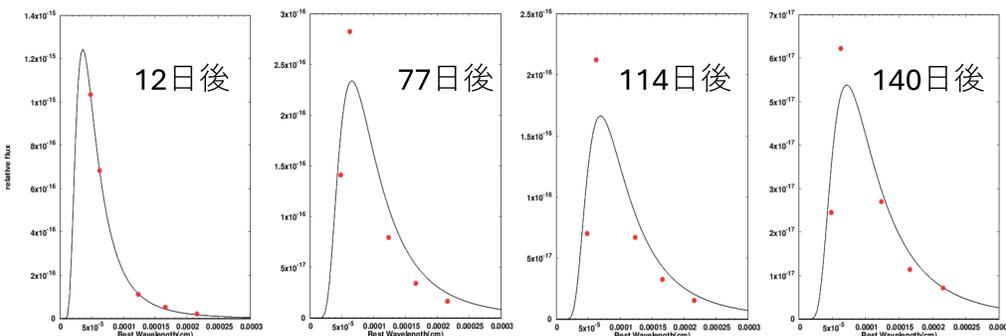


図3: 左から2023/11/2、2024/1/6、2024/2/12、2024/3/9のSED。A_v = 0.279で減光補正。データ点は左からg,r,J,H,Ks。

色進化

g-r、J-Ksの色進化を他のII P型超新星と比較した。SN 2023vogはJ-Ksの色進化は比較天体と似たような傾向を示した。比較天体を含め、40日以降のg-rの進化には多様性が見られた。SN 2023vogのg-rの傾きが比較天体と比べて大きく、赤い。

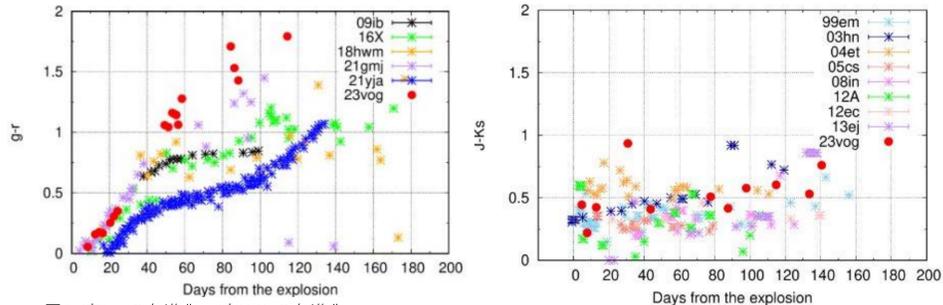


図4: (左)g-rの色進化。(右)J-Ksの色進化。

爆発初期のスペクトル

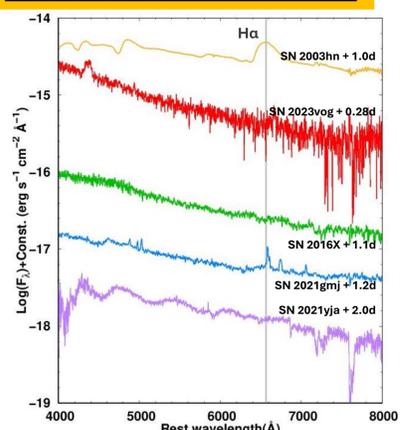


図5: II P型超新星のspectrum比較図。上から推定爆発日から1.0日後のSN 2003hn(橙), 0.28日後のSN 2023vog(赤), 1.1日後のSN 2016X(緑), 1.2日後のSN 2021gmj(青), 2.0日後のSN 2021yja(紫)のスペクトル。

SN 2023vogは推定爆発日から0.28日後のスペクトルによってType II SNに分類されている。

同程度の時期の他のII P型超新星と比較した。比較天体の推定爆発日はそれぞれの文献値を採用した。

SN 2023vogのスペクトルはTransient Name Server(TNS)からダウンロードした。

SN 2003hnは幅の広いP Cyg profileが見られ、SN 2021gmjは母銀河由来のH α 輝線がはっきりと見えているが、SN 2016X, SN 2021yjaは見えておらず、青い連続光が卓越している。SN 2023vogも同様に青い連続光が卓越している。

②観測

観測天体: SN 2023vog
発見日: 2023/10/21
RA/DEC: 09:45:09.630, +68:35:11.72
Redshift=0.014817
Host: NGC2959 Type: II
距離: 64.6 Mpc (距離指数 $\mu=34.05$)



図1: SN 2023vogのkSIRIUS画像(左からJ, H, Ks) 観測日: 2023/10/25 積分時間: 30s × 9dither × 8set

【望遠鏡と装置】

鹿児島大学1m望遠鏡:kSIRIUS J, H, Ks gi-camera g, i
Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System (ATLAS)公開データ orange, cyan
Zwicky Transient Facility (ZTF)公開データ g, r

【解析方法】

・鹿児島1mデータ: 各データ画像に対してIRAF(daophot)を用いてPSF測光
→参照星の等級でキャリブレーション(赤外: 2MASS 可視: PS1)
※等級エラーはIRAFの算出したmerrを採用

近赤外線の絶対等級ライトカーブ(J, H, Ks)

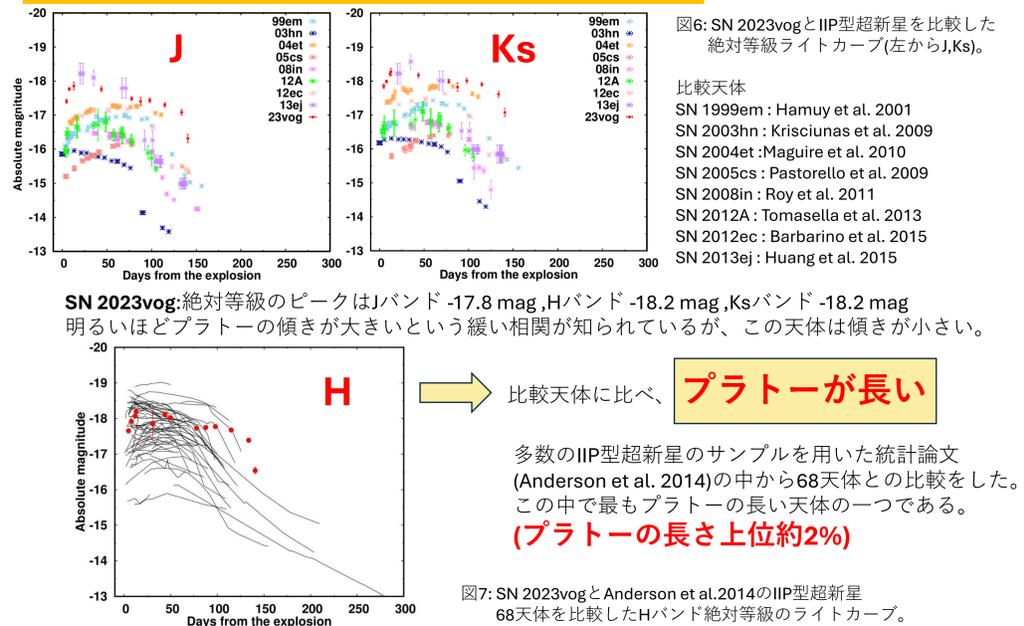
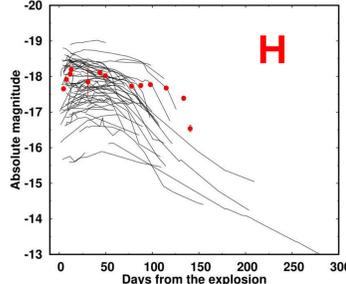


図6: SN 2023vogとII P型超新星と比較した絶対等級ライトカーブ(左からJ, Ks)。

比較天体
SN 1999em: Hamuy et al. 2001
SN 2003hn: Krisciunas et al. 2009
SN 2004et: Maguire et al. 2010
SN 2005cs: Pastorello et al. 2009
SN 2008in: Roy et al. 2011
SN 2012A: Tomasella et al. 2013
SN 2012ec: Barbarino et al. 2015
SN 2013ej: Huang et al. 2015

SN 2023vog: 絶対等級のピークはJバンド -17.8 mag, Hバンド -18.2 mag, Ksバンド -18.2 mag
明るいほどプラトーの傾きが大きいという緩い相関が知られているが、この天体は傾きが小さい。



比較天体に比べ、**プラトーが長い**

多数のII P型超新星のサンプルを用いた統計論文(Anderson et al. 2014)の中から68天体との比較をした。この中で最もプラトーの長い天体の一つである。**(プラトーの長さ上位約2%)**

図7: SN 2023vogとAnderson et al. 2014のII P型超新星68天体と比較したHバンド絶対等級のライトカーブ。

④議論・結論

◎ライトカーブ分析 ⇒ 以下の解析的モデル式(2) (Popov. 1993)に適用

$$\begin{aligned} \log E &= 4.0 \log t_p + 0.4V + 5.0 \log u_{ph} - 4.311, \\ \log M &= 4.0 \log t_p + 0.4V + 3.0 \log u_{ph} - 2.089, \\ \log R_0 &= -2.0 \log t_p - 0.8V - 4.0 \log u_{ph} - 4.278, \end{aligned} \quad (2)$$

E: 爆発エネルギー[erg]
M: エジェクタ質量[M_☉]
R₀: 親星半径[R_☉]
t_p: プラトーの長さ[day]
V: Vバンド絶対等級[mag]
u_{ph}: 水素線の膨張速度[km/s]

典型的なII P型超新星 SN 1999emと比較 (Utrobin et al. 2007)

※速度u_{ph}は同一と仮定(SN 2023vogのスペクトルから速度推定不可能のため)

$$\log \left(\frac{E_{23vog}}{E_{99em}} \right) = \log \left(\frac{M_{23vog}}{M_{99em}} \right) = 0.378 \Rightarrow 23vogのE, Mは99emの2.4倍$$

$$\log \left(\frac{R_{23vog}}{R_{99em}} \right) = -0.078 \Rightarrow 23vogのR_0は99emの0.84倍$$

$$\begin{aligned} E &\approx 3.12 \times 10^{51} [\text{erg}] \\ M &\approx 45.6 [M_{\odot}] \\ R_0 &\approx 420 [R_{\odot}] \end{aligned}$$

E, R₀はII Pの親星と一致

M ≈ 45.6 [M_☉]は異常に大きい
速度同一としたため?

- ・II P型超新星の親星はRSG
- ・観測では10~20 M_☉までしか見つかっていない。

◎t_p = 130日: Popov relationの適用範囲外?

◎M > 30 M_☉
一般的にはLuminous Blue Variable (LBV, II n型超新星の親星候補)
多くのII P型超新星の親星はRSGであることと矛盾。

◎長いプラトーを別の要因で説明 ⇒ 相互作用? (Matsumoto et al. 2024)
・CSMを形成? ⇒ ejecta/CSM相互作用で長いプラトー説明?

◎いずれにせよ、比較的大きな質量を持つ親星と仮定すると、観測的に稀であることと一致。

〈今後〉

- ・SN 2023vogの物理量の不定性を求めるために比較天体を増やす。
- ・スペクトルデータから爆発前の質量損失やCSM相互作用の有無を検証する。

⑤まとめ

- ・II P型超新星のSN 2023vogを爆発初期から約140日まで可視光、近赤外線
- で観測した。
- ・ライトカーブからプラトー期間は130日と決定。比較天体に比べ、プラトーが長い。
- ・ライトカーブから物理量を求めるも算出したエジェクタ質量は非現実的な結果を示した。⇒スペクトルデータが限られており、膨張速度をSN 1999emと同一と仮定しているためであると考えられる。
- ・しかし、質量の大きい親星由来の超新星である可能性が示唆される。
- ・絶対等級ライトカーブの比較より、長いプラトーを示す本天体は観測的にも稀な存在であると示される。特異な光度進化を示すII P型超新星として注目に値する。
- ・今後は比較天体を増加し不定性を求めること、スペクトルデータの分析、プラトーの長さに関する物理過程の検証が必要である。