

# Ib 型超新星 SN 2012au – GRB 付随型超新星とのリンク

高木 勝俊 (広島大学大学院 理学研究科)

## Abstract

我々は Ib 型超新星 SN 2012au を極大 6 日前から約 150 日後までの測光分光観測を行った。極大での総輻射光度  $6.7 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$  は他の Ib 型超新星よりも明るく、GRB が付随した SN 1998bw に迫る値である。また、極大での He 外層の膨張速度  $\sim 15,000 \text{ km s}^{-1}$  から、総エジェクタ質量  $5\text{--}7 M_{\odot}$  と爆発エネルギー  $(6\text{--}14) \times 10^{51} \text{ erg}$  を見積もった。我々は、Ib 型超新星の極大での R バンドの絶対等級と He I の線速度の間に正の相関があることを提案する。光度曲線のモデルフィッティングを行うことで、内側に密度の高い領域が存在し、SN 1998bw とよく似た密度構造をもつことが分かった。これらの結果から SN 2012au は、GRB が付随しない Ib 型超新星と GRB が付随する Ic 型超新星を結ぶ重要なリンクであることを示唆する。

## 1 Introduction

初期質量が  $8M_{\odot}$  より重い星は、その一生の最期に中心核が重力崩壊して超新星爆発を起こすことが知られている。Ib 型超新星とは親星の水素の外層が、Ic 型超新星とは水素外層に加えてヘリウム外層が、それぞれ剥がされた状態で爆発したと考えられている (Filippenko 1997)。Ib 型と Ic 型は観測的な特徴が近いことからよく比較されるが、それぞれの超新星の爆発機構の詳細はまだ分かっていない。また、Ic 型超新星の一部にはガンマ線バースト (GRB) に付随して現れたものが数例確認されているが、超新星と GRB の関連についてもよく分かっていない。これらの解明に迫るためには、発見直後からの可視光を主とした継続的な測光分光観測が必要とされる。

## 2 Observation

SN 2012au は 2012 年 3 月 14 日に NGC 4790 ( $\mu = 31.87 \pm 0.05$ ,  $d = 23.6 \text{ Mpc}$ ) に発見され、その直後のフォローアップ観測によって Ib 型と判定された。私は 3 月 15 日から、東広島天文台の 1.5m かなた望遠鏡に取り付けられた HOWPol (Kawabata et al. 2008) を用いて可能な限り測光分光観測してきた。測光観測に用いたのは  $B$ ,  $V$ ,  $Rc$ ,  $Ic$ ,  $z'$  バンドで、分光観測の分解能は  $R \sim 400$  である。

## 3 Results

### 3.1 Light Curves

$B$ ,  $V$ ,  $Rc$ ,  $Ic$ ,  $z'$  バンドの光度曲線を図 1 に示す。SN 2012au は極大時 ( $t = 0 \text{ d}$  と定義) に  $R_{\text{max}} = 13.1 \pm 0.1 \text{ mag}$ 、絶対等級に直すと  $M_{R, \text{max}} = -18.7 \pm 0.2 \text{ mag}$  まで明るくなった。これは、LOSS (Lick Observatory Supernova Search) が報告した Ib/Ic 型の平均的な明るさ  $\langle M_{R, \text{max}} \rangle = -16.1 \pm 1.2 \text{ mag}$  (Li et al. 2011) や、Drout et al. (2011) で報告されている Ib 型の平均的な明るさ  $\langle M_{R, \text{max}} \rangle = -17.9 \pm 0.9 \text{ mag}$  に比べて有意に明るい。

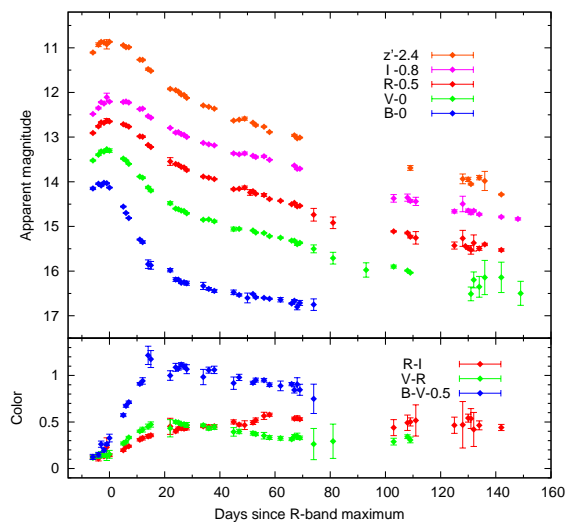


図 1: SN 2012au の光度曲線と色。

図 2 に他の超新星との光度曲線の比較を示す。極大付近では SN 1998bw や LOSS AVERAGE とよく似た進化を、SN 1993J や SN 2008ax よりもやや遅めの進化を示したが、テール成分が顕著となってくる  $t \geq 30$  d 以降では SN 2009jf を除いてそれよりも遅い進化を示した。これは  $\gamma$  線光子のエジェクタへの吸収効率が大きいことを示唆する (詳細は §4.1)。

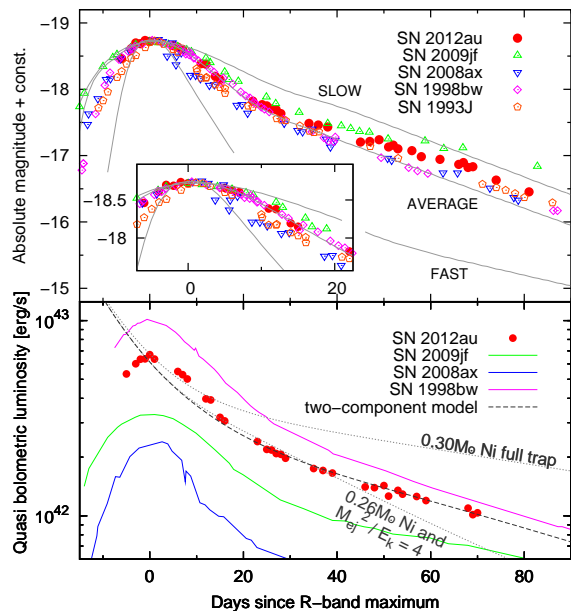


図 2: 上: SN 2012au の R バンド光度曲線の、SN 2009jf (Ib; Sahu et al. 2011)、SN 2008ax (Ib/I Ib; Taubenberger et al. 2011; Tsvetkov et al. 2009)、SN 1998bw (Ic; Patat et al. 2001)、SN 1993J (I Ib; Richmond et al. 1996)、LOSS sample との比較。下: 総輻射光度の比較とモデルフィッティング。

### 3.2 Spectra

SN 2012au のスペクトル進化を図 3 に示す。極大付近では He I  $\lambda 5876$  の吸収が特徴的であり、他に He I  $\lambda \lambda 6678, 7065$ 、Fe II  $\lambda 5169$  や Ca II IR triplet の吸収が見られる。 $t = 110$  d 以降のスペクトルでは、[O I]  $\lambda \lambda 6300, 6364$  や [Ca II]  $\lambda \lambda 7291, 7323$  などの後期によく見られる輝線が特徴的となってきた。

スペクトルの比較を図 3 の下のパネルに示す。全体的な特徴は似ているが、注目すべき点は特に He I

$\lambda 5876$  の青方偏移が大きいことである。これは外層の膨張速度が大きいことを示唆する (詳細は §4.2)。

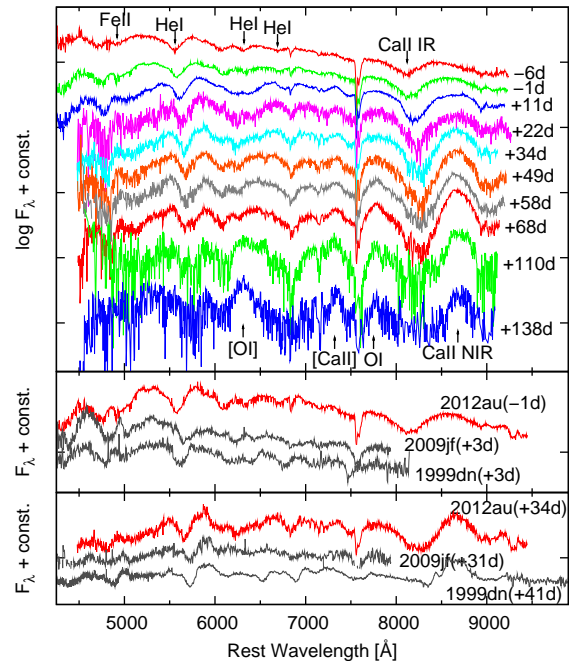


図 3: 上: SN 2012au のスペクトル。下: スペクトルの SN 2009jf (Ib; our unpublished data)、SN 1999dn (Ib; Matheson et al. 2001) との比較。

## 4 Discussion

### 4.1 Bolometric luminosity and $^{56}\text{Ni}$ mass

まず、BVRI バンドの測光結果から総輻射光度を計算する。極大での光度は  $(6.7 \pm 1.3) \times 10^{42}$  erg  $\text{s}^{-1}$  であった (光度曲線は図 2 の下のパネル)。これは SN 2009jf の  $3.2 \times 10^{42}$  erg  $\text{s}^{-1}$  や SN 2008ax の  $2.4 \times 10^{42}$  erg  $\text{s}^{-1}$  よりも有意に大きく、さらに GRB が付随した SN 1998bw の  $1.0 \times 10^{43}$  erg  $\text{s}^{-1}$  に迫る値である。

Ib/Ic 型超新星における極大での総輻射光度  $L_{\text{max}}$  は、 $^{56}\text{Ni}$  質量  $M(^{56}\text{Ni})$  と爆発してから極大に到達す

るまでの日数  $t_r$  (Stritzinger et al. 2006) を用いて、

$$L_{\max} = \left( 6.45 \times e^{-\frac{t_r}{8.8}} + 1.45 \times e^{-\frac{t_r}{111.3}} \right) \times \left( \frac{M(^{56}\text{Ni})}{M_{\odot}} \right) \times 10^{43} \text{erg s}^{-1}, \quad (1)$$

と表せる。ここに  $t_r = 16.5 \pm 1.0$  d (Milisavljevic et al. 2013) と  $L_{\max} = 6.7 \times 10^{42} \text{erg s}^{-1}$  を代入すれば、 $M(^{56}\text{Ni}) = 0.30 M_{\odot}$  を得る。

続いて、光度曲線のテール成分 ( $t = 30\text{--}70$  d) からも  $M(^{56}\text{Ni})$  に制限をつける。まず、密度構造が一樣であるような単純な場合を考える (Maeda et al. 2003)。 $\gamma$  線が完全にエジェクタに吸収されるモデルからは  $M(^{56}\text{Ni}) = 0.30 M_{\odot}$  が得られる (これは式 1 と同じ)。 $\gamma$  線が一部だけエジェクタに吸収されるモデルでは、総放射光度はエジェクタの光学的厚さ  $\tau$  を用いて、

$$L = M(^{56}\text{Ni})e^{(-t_d/113\text{d})} [\epsilon_{\gamma}(1 - e^{-\tau}) + \epsilon_{e+}], \quad (2)$$

$$\tau = 1000 \times \frac{(M_{\text{ej}}/M_{\odot})^2}{E_{51}} t_d^{-2}, \quad (3)$$

と表すことができる。ここで  $t_d$  は爆発してからの日数 ( $\equiv t_r + t$ )、 $\epsilon_{\gamma} = 6.8 \times 10^9 \text{erg s}^{-1} \text{g}^{-1}$  と  $\epsilon_{e+} = 2.4 \times 10^8 \text{erg s}^{-1} \text{g}^{-1}$  はそれぞれ  $\gamma$  線と陽電子のエネルギーのデポジット量であり、 $(M_{\text{ej}}/M_{\odot})$  はエジェクタ質量である。しかしこれらのパラメータを変えても (例えば  $M(^{56}\text{Ni}) = 0.26 M_{\odot}$ ,  $[(M_{\text{ej}}/M_{\odot})^2/E_{51}] = 4$  のときのプロットを図 2 に示した)、観測データをよく再現することはできない。

そこで、中心部と外側で密度の違う 2 成分モデルを考える (Maeda et al. 2003)。内側と外側それぞれに対して、 $M(^{56}\text{Ni})$  と  $[(M_{\text{ej}}/M_{\odot})^2/E_{51}]$  が観測点に合うような値を探す。フィット結果を表 1 に示す。

	SN 2012au	SN 1998bw
$M_{\text{in}}(^{56}\text{Ni})$	0.14	0.11
$[(M_{\text{ej}}/M_{\odot})^2/E_{51}]_{\text{in}}$	20	26
$M_{\text{out}}(^{56}\text{Ni})$	0.12	0.44
$[(M_{\text{ej}}/M_{\odot})^2/E_{51}]_{\text{out}}$	2	1

表 1: SN 2012au と SN 1998bw の総放射光度の 2 成分モデルでのフィッティングパラメータの比較。

このように、SN 2012au は中心部に非常に密度の高い領域が存在する、SN 1998bw と似た構造を示した。2 成分モデルから求めた  $M(^{56}\text{Ni})$  の合計  $0.26 M_{\odot}$  は極大から求めた  $0.30 M_{\odot}$  とはやや違うが、便宜上、本研究での結論は  $0.30 M_{\odot}$  とする。

## 4.2 Line Velocity and Explosion Parameters

He I  $\lambda$  5876、Ca II IR  $\lambda$  8571、Fe II  $\lambda$  5169 から求めた SN 2012au の線速度と他の Ib 型超新星との比較を図 4 に示す。Fe II の速度進化は他の Ib 型超新星と似ている一方、He I や Ca II の速度は他のものよりも十分に早い。

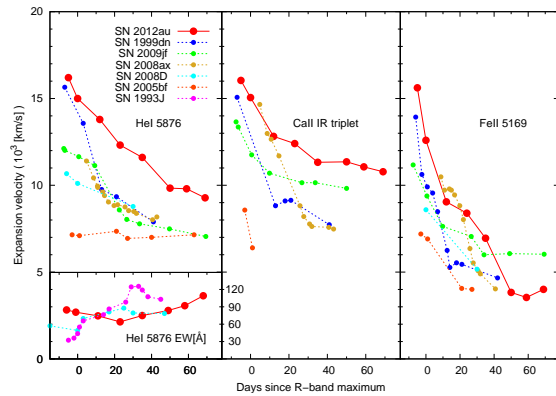


図 4: 線速度の SN 1999dn (Ib; Benetti et al. 2011)、SN 2009jf (Ib; Sahu et al. 2009)、SN 2008ax (Ib/I Ib; Taubenberger et al. 2011)、SN 2008D (Ib; Modjaz et al. 2009)、SN 2005bf (peculiar Ib; Folatelli et al. 2006)、SN 1993J (I Ib; Barbon et al. 1995) との比較。

エジェクタ質量  $M_{\text{ej}}$  と爆発エネルギー  $E_k$  は、

$$t_r \propto \kappa^{1/2} M_{\text{ej}}^{3/4} E_k^{-1/4}, \quad (4)$$

$$v \propto E_k^{1/2} M_{\text{ej}}^{-1/2}, \quad (5)$$

という関係式を用いて導出する。 $\kappa$  は吸収係数で、 $v$  は典型的な膨張速度である (Arnett 1982)。SN 2008D (Ib) で求められたパラメータと比較し、SN 2012au では  $M_{\text{ej}} = 5\text{--}7 M_{\odot}$ 、 $E_k = (6\text{--}14) \times 10^{51} \text{erg}$  を得た。

$M_{R, \max}$  vs. 極大での He I  $\lambda$  5876 の線速度  $v_{\text{He}}$ 、 $M(^{56}\text{Ni})$  vs.  $E_k$  を他の超新星との比較を図 5 に示す。両図において正の相関がありそうである。右のパネルでの相関はこれまで指摘されてきたが、左のパネルでの相関は SN 2012au を加えることで見えてきた相関である。

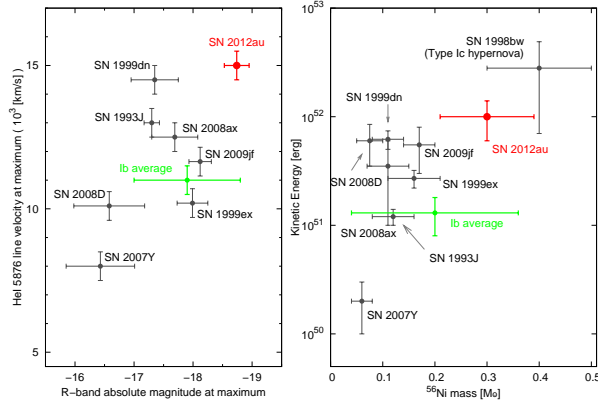


図 5: SN 1993J (Iib; Young et al. 1995)、SN 1999dn (Ib; Benetti et al. 2011)、SN 1999ex (Ib; Stritzinger et al. 2009)、SN 2008D (Ib; Tanaka et al. 2009)、SN 2008ax (Ib/Iib; Taubenberger et al. 2011)、SN 2009jf (Ib; Sahu et al. 2011)、Ib 型の平均 (Branch et al. 2002; Drout et al. 2011)、SN 1998bw (Ic; Nakamura et al. 2001) との諸パラメータ比較。

## 5 Conclusions

本研究により、(i) SN 2012au は Ib 型超新星の中では明るく、極大での総輻射光度は  $\sim 6.7 \times 10^{42}$  erg  $s^{-1}$  に達し、(ii) He I の線速度は他の Ib 型よりも大きく、(iii)  $M_{R, \max}$  と  $v_{\text{He}}$  の間に正の相関がありそうである、ということが分かった。

SN 2012au はその初期のスペクトルから Ib 型だと分類されたが、その総輻射光度が SN 1998bw に近いこと、光度曲線をモデルフィットすると SN 1998bw に似た密度構造をしていたこと、爆発エネルギーが他の Ib 型よりも大きいことから、SN 2012au は GRB が付随しない Ib/Ic 型超新星と GRB が付随する Ic 型超新星とを結びリンクであることを示唆する<sup>1</sup>。

<sup>1</sup>同様の結論が、主に後期データを議論している Milisavljevic et al. (2013) で報告されている。

## Reference

Arnett, W. D. 1982, APJ, 253, 785

Barbon, R., Benetti, S., Cappellaro, E., Patat, F., Turatto, M., & Iijima, T. 1995, A&AS, 110, 513

Benetti, S., et al. 2011, MNRAS, 411, 2726

Branch, D., et al. 2002, APJ, 566, 1005

Drout, M. R., et al. 2011, APJ, 741, 97

Filippenko, A. V. 1997, ARA&A, 35, 309

Folatelli, G., et al. 2006, APJ, 641, 1039

Kawabata, K. S., et al. 2008, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 7014, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series

Maeda, K., Mazzali, P. A., Deng, J., Nomoto, K., Yoshii, Y., Tomita, H., & Kobayashi, Y. 2003, APJ, 593, 931

Matheson, T., Filippenko, A. V., Li, W., Leonard, D. C., & Shields, J. C. 2001, AJ, 121, 1648

Milisavljevic, D., et al. 2013, ArXiv e-prints

Modjaz, M., et al. 2009, APJ, 702, 226

Li, W., et al. 2011, MNRAS, 412, 1441

Patat, F., et al. 2001, APJ, 555, 900

Richmond, M. W., Treffers, R. R., Filippenko, A. V., & Paik, Y. 1996, AJ, 112, 732

Sahu, D. K., Gurugubelli, U. K., Anupama, G. C., & Nomoto, K. 2011, in Astronomical Society of India Conference Series, Vol. 3, Astronomical Society of India Conference Series, 126

Stritzinger, M., Mazzali, P. A., Sollerman, J., & Benetti, S. 2006, A&A, 460, 793

—. 2009, APJ, 696, 713

Tanaka, M., et al. 2009, APJ, 692, 1131

Taubenberger, S., et al. 2011, MNRAS, 413, 2140

Tsvetkov, D. Y., Volkov, I. M., Baklanov, P., Blinnikov, S., & Tuchin, O. 2009, Peremennyye Zvezdy, 29, 2

Young, T. R., Baron, E., & Branch, D. 1995, APJ, 449, L51