

コン  
09c

# 光度曲線計算から迫る 極めて明るい Ia 型超新星

神谷 保臣 (東京大学 @ IPMU );  
[yasuomi.kamiya@ipmu.jp](mailto:yasuomi.kamiya@ipmu.jp)

共同研究者:

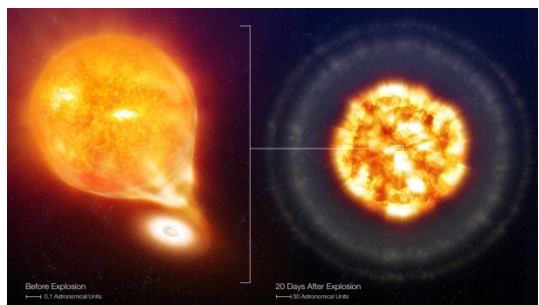
田中 雅臣、野本 憲一 (東京大学 / IPMU)、  
Sergei I. Blinnikov、Elena I. Sorokina (ITEP)

# 1. はじめに

## ➤ Ia 型超新星(SN Ia) = 白色矮星の核爆発

近接連星系にある炭素と酸素 (C+O) から成る白色矮星 (WD) が、伴星からの質量降着により質量 ( $M_{WD}$ ) を増し、Chandrasekhar 質量 ( $M_{Ch}$ ;  $\approx 1.4 M_{\odot}$ ) に非常に近付いたときに起きる(図1)。そのため、どの SN Ia も同じような性質を示すと考えられており、宇宙論では(補正可能な)標準光源として使われている [1] (cf. 宇宙の加速膨張 [2])。

ところが、観測された SNe Ia の中には極めて明るいものがあり、光源の  $^{56}\text{Ni}$  の質量 ( $M_{^{56}\text{Ni}}$ ) はどれも  $\geq 1.2 M_{\odot}$  と推定されている。 $M_{Ch}$  のWDの核爆発で  $^{56}\text{Ni}$  が  $< M_{\odot}$  作られるとする理論予測 [e.g. 3] を超えている(表1)。つまり、通常シナリオ ( $M_{Ch}$  のWDの核爆発) では説明が出来ない\*1。そのため、 $M_{Ch}$  よりも重い親星\*2 を考えて大量の  $^{56}\text{Ni}$  を説明しようとする、「super-Chandrasekhar (sup-Ch) モデル」というものが唱えられている。



SN 2006X, before and after the Type Ia Supernova Explosion (Artist Impression)

ESO Press Photo 31b/07 (12 July 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.

図1: SN Ia の爆発前(左)と爆発後(右)の想像図 (<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2007/phot-31-07.html>)。

表1: 極めて明るい SNe Ia。

超新星名	絶対 $V$ 等級の 最大値 [mag]	$M_{^{56}\text{Ni}}$ [ $M_{\odot}$ ]	C II の 吸収線	引用元
SN 2003fg	-19.9	1.3	不明	[t1]
SN 2006gz	-19.7	1.2	検出	[t2]
SN 2007if	-20.4	1.6	検出	[t3]
SN 2009dc	-20.2	1.2	検出	[t4]
典型的なSN Ia	-19.3	0.6	極めて稀	

# II. sup-Ch モデルの光度曲線

これまでに行われた sup-Ch モデルの光度曲線に関する研究はある [4] もの、輻射等級についてのみ調べている (図 2)。そこで、本研究では **UBVRI** の各バンドについても調べることで、SN 2009dc の観測 [t4] との比較を行う。

光度曲線の計算には、多波長輻射輸送計算コード STELLA [e.g. 5] を用いた。

モデルは [4] と殆ど同様の手法を用いて構築した (図 3)。但し、SN 2009dc の観測 [t4] から、今回は  $M_{56\text{Ni}} = 1.2 M_{\odot}$  とした。モデルは  $M_{\text{WD}}$ 、鉄族元素 (ECES; Fe, Co,  $^{58}\text{Ni}$ )・ $^{56}\text{Ni}$ ・中間質量元素 (IMES; Si, S, Ca)・C+O の  $M_{\text{WD}}$  に対する各質量比で記述される。モデルの作り方は、

- 1)  $M_{\text{WD}}/M_{\odot} = 1.8, 2, \dots, 2.6$  と、各質量比を設定
- 2) WD の結合エネルギー ( $E_{\text{bin}}$ )\*<sup>3</sup>、核燃焼で得られるエネルギー ( $E_{\text{nuc}}$ )\*<sup>4</sup>、白色矮星の運動エネルギー ( $E_{\text{kin}}$ )\*<sup>5</sup> を計算
- 3) 密度 ( $\rho$ ) と速度 ( $v$ ) について W7 モデル [6] をスケーリング\*<sup>6</sup> である。また、観測された Si II の吸収線や近赤外の光度曲線の形から、 $^{56}\text{Ni}$  と IMES をある程度混ぜてある\*<sup>7</sup>。

図 3: sup-Ch モデル作成のイメージ。  $M_{\text{Ch}}$  の WD モデル (W7) をスケーリングしている

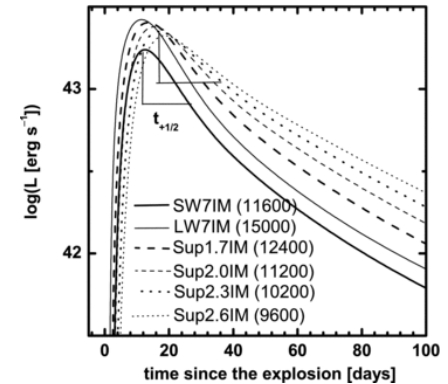
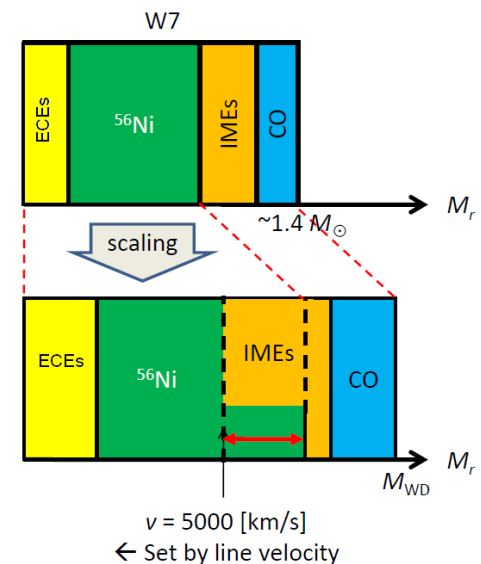


図 2: 先行研究の光度曲線の例 [4]。

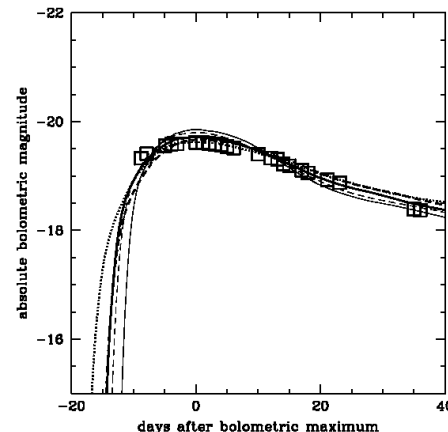


# III. SN 2009dc との比較

## ◆ 輻射等級の光度曲線

[4]でも示唆されていた通り、重いWDほど光度曲線が広がる。SN 2009dcは幅広な光度曲線なので $1.8M_{\odot}$ 等のモデルは厳しい(図4)。また、殆どのモデルは光球速度が速過ぎるため、SN 2009dcのモデルとしては好ましくない。光球速度は $E_{kin}/M_{WD}$ に影響を受けるため、同じ質量のWDでも、最外層のC+Oが多いものが有利。

図4: 輻射等級の光度曲線。 $M_{WD}/M_{\odot} = 1.8$  (細実線)、2 (細鎖線)、2.2 (太実線)、2.4 (太鎖線)、2.6 (太点線)。但し、他のパラメータは同じ。正方形はSN 2009dcの観測 [t4]。



## ◆ では最適なモデルは？

図5は best-fitted なモデル。観測から推定されている $M_{56Ni}$ で明るさは再現可能。各バンドの光度曲線も、光球速度も観測と良く合っている。

つまり、SN 2009dcの親星が sup-Ch であると考えた場合、その質量は $2.4M_{\odot}$ であって、比較的厚めのC+O層を持つ、というモデルが最も好ましい。勿論、 $2M_{\odot}$ や $2.2M_{\odot}$ でも光度曲線はまあまあ合うモデルはあるが、やはり光球速度が大きくなってしまふ。逆に、もっと重い( $2.6M_{\odot}$ )場合は、光球速度は良くても、光度曲線の幅が広すぎてしまふモデルが多い。

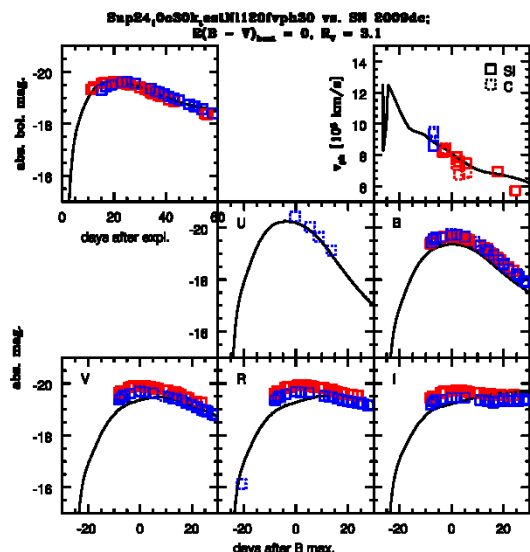


図5: best-fitted なモデルについての輻射等級、UBVRiの各バンド等級、及び光球速度の時間変化。パラメータは、 $M_{WD} = 2.4M_{\odot}$ 、ECEsが10%、C+Oが30%。赤は[t4]の観測、青は[c5]の観測。

# V. まとめ

- 極めて明るい Ia 型超新星のうち、今回は SN 2009dc について、光度曲線を計算することで、親星の WD 質量等に迫った。
- その結果、SN 2009dc を良く説明するモデルとして、質量は  $2.4M_{\odot}$  であって、厚めの C+O 層を持つ sup-Ch モデルを得た。
- こうした sup-Ch WD がどうやって作られたか、本当に球対称な核爆発になるのか、といった問題は依然残っている。

※ sup-Ch モデルと SN 2009dc との比較に関して、詳細は

Kamiya, Y., et al. 2010, in prep.

を参照されたい。

# 参考文献

- [1] Perlmutter, S., et al. 1998, Nat, 391, 51
- [2] Riess, A. G., et al. 1998, AJ, 116, 1009
- [3] Iwamoto, K., et al. 1999, ApJS, 125, 439
- [4] Maeda, K., Iwamoto K. 2009, MNRAS, 394, 239
- [5] Blinnikov, S.I., Bartunov O.S. 1993, A&A, 237, 106
- [6] Nomoto, K., et al. 1984, ApJ, 286, 644
- [c1] Hillebrandt, W., et al. 2007, A&A, 465, L17
- [c2] Tanaka, M., et al., 2010, ApJ, 714, 1209
- [c3] Yoon, S.-C., Langer N., 2005, A&A, 435, 967
- [c4] Kasen, D. 2006, ApJ, 649, 939
- [c5] Silverman, J. M., et al. 2010, MNRAS, submitted (arXiv:1003.2417v3)
- [t1] Howel, D. A., et al. 2006, Nat, 443, 308
- [t2] Hicken, M., et al. 2007, ApJ, 669, L17
- [t3] Scalzo, R. A., et al. 2010, ApJ, 713, 1073
- [t4] Yamanaka, M., et al. 2009, ApJ, 707, L118

# 脚注

- \*<sup>1</sup>  $M_{\text{Ch}}$  の WD の非球対称な核爆発でも説明可能 [c1] だが、そのようなことを示唆する偏光観測はまだない (cf. SN 2009dc の偏光観測 [c2])。
- \*<sup>2</sup> そのような重い WD は、高速度の回転や WD 同士の合体によって作られると考えられている。
- \*<sup>3</sup>  $M_{\text{WD}}$  と  $\rho_c$  に依存する [c3]。
- \*<sup>4</sup>  $E_{\text{nuc}}/(10^{51} \text{ erg}) = (1.74 f_{\text{ECE}} + 1.56 f_{^{56}\text{Ni}} + 1.24 f_{\text{IME}}) \times (M_{\text{WD}}/M_{\odot})$ 。但し、 $f$  は各質量比。
- \*<sup>5</sup>  $E_{\text{kin}} = E_{\text{nuc}} - E_{\text{bin}}$ 。
- \*<sup>6</sup>  $\rho^2 \propto E_{\text{kin}}^{-3} M_{\text{WD}}^5$ 、 $v^2 \propto E_{\text{kin}} M_{\text{WD}}^{-1}$ 。
- \*<sup>7</sup> Si II の速度が遅いため IMEs が比較的内側にあることが予想される。また、( $^{56}\text{Ni}$  を含む) 鉄族元素が外側に広がっていると近赤外の光度曲線が single-peak になることが分かっている [c4]。