

# 低光度 IIP に属する超新星 SN2016bkv の 測光分光観測に基づいた解析

中岡 竜也<sup>1</sup>, 川端 弘治<sup>1</sup>, 高木 勝俊<sup>1</sup>, 川端 美穂<sup>1</sup>, 河原 直貴<sup>1</sup>  
山中 雅之<sup>2</sup>, かなた観測チーム

<sup>1</sup> 広島大学, <sup>2</sup> 甲南大学

*E-mail*(中岡 竜也): [nakaoka@hep01.hepl.hiroshima-u.ac.jp](mailto:nakaoka@hep01.hepl.hiroshima-u.ac.jp)

## アブストラクト

広島大学所有かなた望遠鏡は、国内で超新星のモニター観測を行っている望遠鏡の1つである。超新星の観測は、多くの場合、まず超新星候補として報告があった天体に対し型同定が行われ、その後は必要に応じて追観測を行う。我々は2014年3月21日に板垣公一氏が発見した IIP 型超新星 SN 2016bkv について、広島大学が所有するかなた望遠鏡を用いてモニター観測を行い、現在も継続している。この超新星は、当初、水素の輝線が見える II<sub>n</sub> 型超新星と分類されていたが、我々の追観測の結果、SN 1997D-like な低光度 IIP 型超新星の1つであることが分かった。低光度 IIP 型超新星の親星モデルは、軽い親星と重い親星のどちらが爆発したものが現在でも決着はついていないが、SN 2016bkv の測光・分光観測からは、重い親星が爆発したモデルを支持する結果が得られた。

## 1 イントロ

重力崩壊型超新星爆発とは、初期質量が太陽の約 10 倍以上の星が、一生の最期に中心核が重力崩壊を引き起こし爆発する現象のことである。しかしその爆発の詳細については、観測技術が発達した現代においても分かっていない。超新星からの極大光度前後の放射の大部分は可視光域で発せられるため、型同定を含めた超新星の観測においては可視光の観測が有利である。その中でも IIP 型超新星は、爆発後数十日間は可視-近赤外線での光度がほぼ一定となり殆ど変化しない期間(プラトー)を持つことが特徴的な型である。近傍銀河で発見される超新星の半分程度は IIP 型超新星であり、統計的な議論がなされてきたが (Li et al., 2011)、宇宙の加速膨張の証拠として用いられた Ia 型超新星と比べて個性が強く、IIP 型超新星の親星と爆発の性質の関係性等、未だ十分な解明には至らない。その中でも極めて個性的な観測例を示すサブグループに、SN 1997D-like な低光度 IIP 型超新星がある。このグループに属する超新星は、(i) 典型的な IIP 型超新星に比べて、プラトーの明るさが  $1/2-1/10$  (ii) スペクトルに現れる吸収線速度が、一般的な IIP 型超新星と比べて半分以下等の特徴を持つ。低光度 IIP 型超新星は、これまでに 10 天体ほど分類されているが、爆発初期から後期まで一貫した観測が行われた例はなく、爆発現象や親星等の理解が進んでいない。親星のモデルは表 1 にあるように、軽い親星が爆発したと考えられるものと重い親星が爆発したと考えられるものの正反対のモデルが提唱されており、このことから研究が進んでいないことが伺える。軽い親星が爆発したと考えられるモデルは、超新星爆発すると思われる質量の下限程度であり、その最も下限の場合、鉄コアの光分解が起こる温度に到達しない。そのため、電子捕反応のみで重力崩壊を起こすと思われる。過去、ハッブル宇宙望遠鏡で親星が直接検出された低光度 IIP があり、色と明るさの相関から軽い親星と考えられていることが後押ししている。プラトーの長さは、軽い親星起源と思われるため、40-60 日と短いと推定される (Chugai & Utrobin, 2009)。しかし電子捕獲反応のみで重力崩壊を起こすことは容易ではなく、エネルギーが不十分であると思われる。重い親星のモデルは、太陽質量の 20 倍以上と考えられている。通常このような星は、進化の過程で水素外層を吹き飛ばし、ウォルフ=ライエ星となることが知られているが、元素の組成比によっては水素外層を吹き飛ばさないことも可能である。しかし、そのまま爆発すると高い運動エネルギーを持ち、低光度 IIP 型超新星に特徴的な低速度の吸収線ではなくなってしまう (Dessert et al., 2010)。そこで、爆発に失敗し、放出される質量が中心星に再び落ちる、フォールバックモデルが提唱されている (Zampieri, Shapiro & Colpi, 1998)。これにより放出物質を少なくすることができ、低光度、低速度が実現される。しかし、直接検出の事実と反することが問題として挙げられる。大質量星の爆発のため、プラトーの期間は 100 日以上と

表 1: LL IIP の親星モデルとその比較

	軽い親星モデル	重い親星モデル
想定される親星の質量 [ $M_{\odot}$ ]	8-13 (直接検出の報告あり)	15-25
爆発モデル	重力崩壊 (電子捕獲)	重力崩壊 (フォールバック)
プラトーの長さ [days]	40-60	100-
問題点	爆発モデルに合わない	直接検出に矛盾

推定されている。これらのモデルは、このグループで最も近傍で発見された SN 1997D を元に考えられているが、この天体の爆発日の不定性が大きいことから、多数のモデルが試案されていると推測される。つまり、爆発初期から後期まで一貫したデータが存在すれば、モデルの制限を行うことができ、低光度 IIP 型超新星の理解が進むと考えられる。

本研究で述べる低光度 IIP 型超新星 SN 2016bkv は、2016 年 3 月 21.5 日に、NGC 3184 に板垣公一氏が発見した。広島大学かなた望遠鏡では同 24 日から可視-近赤外撮像・分光観測を開始した。爆発初期から現在に至るまで観測は継続できているため、この天体の素性を調べることにより、低光度 IIP 型超新星の新たな情報を得ることができると考えられる。

§2.1 では、本研究で対象とした天体 ~SN 2016bkv~ の情報、§2.2 では測光観測と、その考察を述べる。§2.3 では分光観測と、その考察を述べ、§2.4 では親星に関する考察を述べる。また、以下のセクションでは SN 1997D-like な低光度 IIP 型のことを LL IIP (Low-Luminosity IIP) と記述することにする。

## 2 LL IIP SN 2016bkv

### 2.1 観測天体、観測機器

SN 2014cx は、2016 年 3 月 21.5 日に、NGC 3184 に板垣公一氏が発見した超新星で、その後の分光観測により II<sub>n</sub> 型超新星であると同定された。また同年 3 月 19.2 日には超新星サーベイグループ KAIT により爆発前の観測が行われており、爆発後間もない超新星であることが分かった。これらの報告を受けて、広島大学かなた望遠鏡で 3 月 24 日よりモニター観測を開始した。本研究で SN 2016bkv を LL IIP と分類しているのは我々の長期分光モニターの結果から得られたものであり、§2.3 で詳述する。超新星が発生した位置が良かったため、140 日以上継続して近赤外-可視測光分光観測を行うことができた。これほど長期間連続して観測できた LL IIP 型超新星は他になく、貴重な観測データを持つ天体であると言える。

### 2.2 測光観測

図 1 は、SN 2016bkv の測光観測の結果から得られたライトカーブである。これまでの LL IIP は爆発初期からデータが得られたものが 2 天体しかなく、この天体が 3 例目となる。しかし爆発初期から近赤外線のあるものは初で、爆発初期の光球の様子をより正確に捉えることができたと言える。また爆発初期から後期までデータが取得できた天体としても初めてのため、包括的な議論ができる LL IIP として期待できる。

図 2 は、SN 2016bkv と他の LL IIP (Pastorello et al., 2004, Spiro et al., 2014)、及び典型的な IIP である SN 2012aw (Bose et al., 2014) の R バンドのライトカーブを比較したものである。この図において SN 2016bkv のプラトー時の等級は典型的な IIP である SN 2012aw より約 3 等暗く、一般的に言われている LL IIP の等級に近い。このことは、SN 2016bkv が LL IIP であると考えの一因である。

SN 2016bkv のプラトーの長さは 140 日以上と長く、表 1 のモデル比較から重い親星が爆発したと推測できる。また、ライトカーブの初期に約 1 等の増光が見られ、その後減光していくが、これは爆発初期に SN 2016bkv の衝撃波が星周物質と相互作用を起こして光っていると考えられる。このことは §2.3 でも述べる。

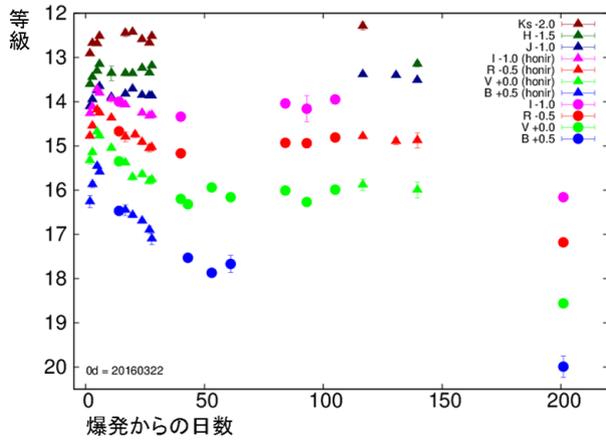


図 1: SN 2016bkv のライトカーブ

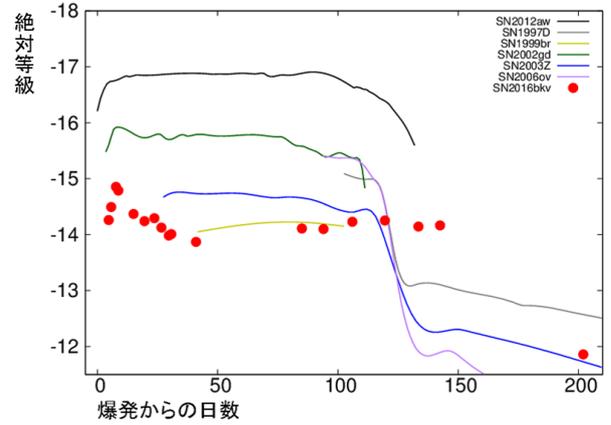


図 2: SN 2016bkv 及び他の LL IIP と一般的な IIP の R バンドライトカーブ比較

## 2.3 分光観測

図 3 は、SN 2016bkv の分光観測の結果から得られたスペクトルの一部である。爆発初期のスペクトルは、青くのつぺりとした形状に水素の輝線が見られる。これは初期の II<sub>n</sub> 型超新星に見られる特徴に近く、初期の SN 2016bkv の型同定で II<sub>n</sub> 型と言われたことにも頷ける。II<sub>n</sub> 型超新星は、濃い星周物質のある領域で爆発し、超新星本体の放出物と星周物質が相互作用して光っていると考えられており、SN 2016bkv もそのような領域で爆発したと考えられる。星周物質が存在する原因は多数あるが、親星が単独星の場合、重い恒星が進化の最期に不安定となり、自身の外層を吹き飛ばした際のガスが星周空間に広がっていると考えるのが自然である。そのため、分光観測の結果からも SN 2016bkv の親星は重いと考えられる。

プラトー中期から後期になるにつれ、LL IIP の特徴である、速度の遅い吸収線が多数見られるようになった。図 4 は、SN 2016bkv と他の LL IIP (Pastorello et al., 2004, Spiro et al., 2014)、及び典型的な IIP 型超新星 SN 1999em の H $\alpha$  吸収線の速度 (Leonard et al., 2002) を比較したものである。SN 2016bkv は、どのフェーズも典型的 IIP よりも半分以上吸収線速度が遅く、LL IIP の特徴を持っている。また、SN 2016bkv は爆発後 30 日を境に傾きが異なっているが、爆発 30 日後までは星周物質と相互作用している部分の速度が見え、それ以降は超新星本体の速度が見えているものと推測される。爆発 30 日後は図 1 のプラトー等級となっている時期と一致することから、ライトカーブに見られる初期の増光は、星周物質との相互作用と考えられる。

## 2.4 親星のパラメータ

IIP 型超新星のライトカーブからは、爆発前の超新星 (親星) の情報を得ることができる。次式は親星のパラメータである爆発エネルギー  $E$ 、水素外層の質量  $M$ 、親星の半径  $R$  を得るものであり、それぞれ観測量であるプラトートの長さ  $t$ 、V バンドの絶対等級  $V$ 、超新星の膨張速度  $u$  から求めることができる (Popov 1993)。

$$\begin{aligned}\log E &= 4.0 \log t + 0.4V + 5.0 \log u - 4.311 \\ \log M &= 4.0 \log t + 0.4V + 3.0 \log u - 2.089 \\ \log R &= -2.0 \log t - 0.8V - 4.0 \log u - 4.278\end{aligned}$$

表 2 は、SN 2016bkv のライトカーブ・スペクトルから得た情報により親星のパラメータを算出したものであり、典型的 IIP である SN 2012aw (Bose et al., 2014)、SN 1999em (Leonard et al., 2002) と比較を行っている。SN 2016bkv は全てのパラメータで典型的 IIP とは違ったふるまいを示している。まず爆発エネルギーは典型的 IIP の約 1/10 となっているが、これは光度が約 1/10 となっていることの説明となっており、また他の LL IIP の結果とほぼ一致する。水素外層の質量は  $25 \pm 5$  と典型的 IIP と比較して重く、この結果からも重い親星が爆発したと考えられる。しかし上式は典型的な IIP 型超新星に適用する式であり、LL IIP にも適用できるか分からないため、注意が必要である。

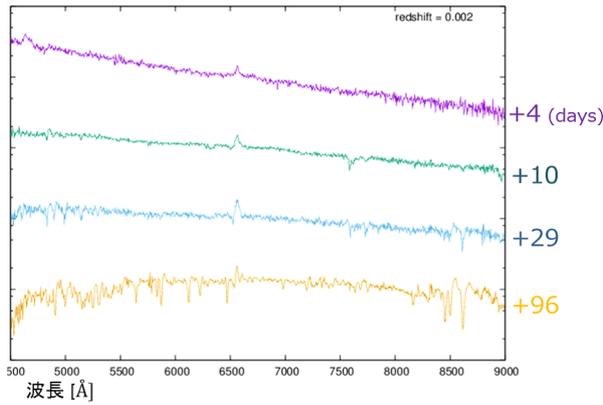


図 3: SN 2016bkv のスペクトル (一部)

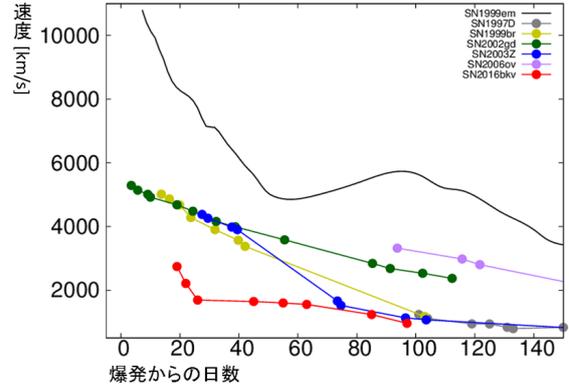


図 4: SN 2016bkv 及び他の LL IIP と一般的な IIP の  $H\alpha$  の吸収線速度比較

表 2: SN 2016bkv の親星パラメータ

超新星	爆発エネルギー [ $\times 10^{51}$ erg]	水素外層の質量 [ $M_{\odot}$ ]	親星の半径 [ $R_{\odot}$ ]
SN 2016bkv	$0.22 \pm 0.05$	$25 \pm 5$	$85 \pm 10$
SN 2012aw	1.2	13.0	370
SN 1999em	0.8	10.0	490

### 3 まとめと今後

かなた望遠鏡では近傍超新星のモニター観測をしており、SN 2016bkv もその 1 つである。この超新星は爆発後の分光観測では IIn 型と分類されたが、我々の追観測の結果、IIP 型のサブクラスである LL IIP であることが分かった。測光・分光観測の結果からは、いずれも重い親星が爆発したという結論を得ることができたが、全ての結果はいくつかの仮定 (cf. 親星は単独星) の元での結果である。今後は後期観測から得られる  $^{56}\text{Ni}$  質量等のパラメータを用い、より精度の高い結論を得ることが必要である。

### References

- Bose et al., 2014, proceedings of IAUS 2014, 296, 334
- Dessart L. et al., 2008, ApJ, 675, 644
- Filippenko, 1997, A&A, 35, 309
- Leonard et al., 2002, AJ, 124, 2490
- Li et al., 2011, MNRAS, 412, 1473
- Popov, 1993, AJ, 414, 712
- Utrobin V. P., Chugai N. N., 2009, A&A, 506, 829
- Zampieri L., Shapiro S. L., Colpi M., 1998, ApJ, 502, L149