

IIP型超新星の観測的性質と相関関係について

大阪教育大学 増本一成

山中雅之（甲南大学）、前田啓一（京都大学・IPMU）、松本桂（大阪教育大学）
川端弘治・高木勝俊（広島大学）、他広島大学及びNAOJ観測チーム

1. 概要

我々は、IIP型超新星SN 2013buの測光分光観測を長期にわたって行った。我々の解析の結果、plateau期のSN 2013buは典型的なIIP型と同じような明るさを持つが、そのplateau期の長さは約91日と非常に短いことが分かった。また、tail期の明るさは暗いクラスのIIP型に似た明るさを持つことが判明した。スペクトルも、subluminousなIIP型超新星と似たような特徴を示した。我々の計算した結果、SN 2013buの ^{56}Ni 質量は $0.006 M_{\odot}$ 、ejectaの質量は $4\sim 10 M_{\odot}$ となり、SN 2013buはlow-mass endからの超新星である可能性を示した。これは、似通った親星から全く異なる観測的多様性を生むかもしれない、ということを示唆するものとなった。本発表は、SN 2013buの観測結果と、他のIIP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。

2. IIP型超新星に関する現状の問題点

重力崩壊型超新星は、太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星の爆発が起源とされており、その多くがII型超新星である。IIP型超新星はその中でも、光度曲線に80~120日の光度一定の期間(plateau)が見られ、また初期スペクトルからも水素による強い吸収線が見られることから、豊富な水素外層を持つことが知られている。

IIP型超新星には、親星の質量や観測的特徴、物理量に多様性があることが分かっている。しかし、超新星の爆発前の画像から得られる親星の質量には、禁止領域($> 17 M_{\odot}$)が存在しており、これは光度曲線からの推定は総じて多く見積もれている。特に最も暗いクラスの超新星では、最低質量の親星すら提案されており、これは重力崩壊型超新星の理論限界にさしかかっている。また近年、近傍でのIIP型超新星の発券数の増加に伴い、その相関関係が様々に調べられてきた(Anderson et al. 2014; Faran et al. 2014等)。しかし、特に暗いクラスの超新星の観測数が不足しており、光度曲線とスペクトルから爆発特性を推定することは極めて重要である。

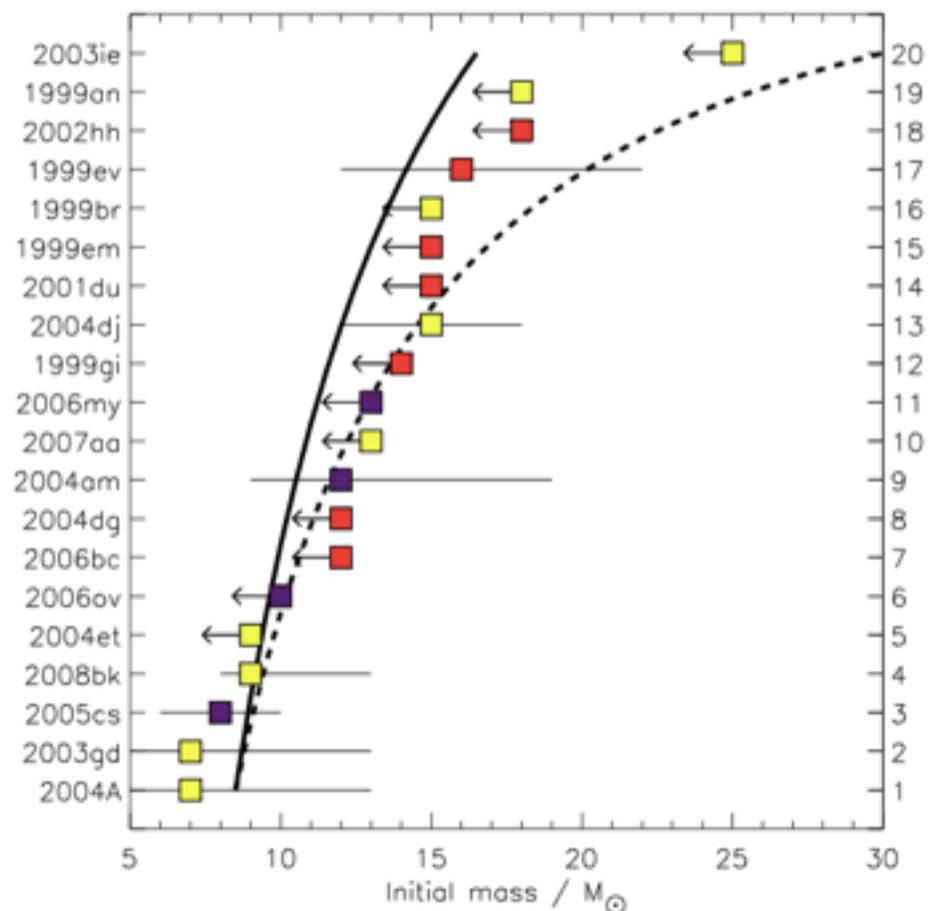


図1. IIP型超新星の初期質量と理論的境界値 (Smartt 2009)

3. SN 2013bu

(1) 基本情報

- ・ 発見日…2013/04/21.7(UT)
- ・ 発見者…板垣公一氏
- ・ 発見銀河…NGC 7331(～14.5Mpc)
- ・ 観測開始日…2013/04/23.1(JST)
- ・ 観測望遠鏡…大阪教育大学51cm望遠鏡(測光)、
広島大学1.5mかなた望遠鏡(測光・分光)、
すばる望遠鏡FOCAS(分光)

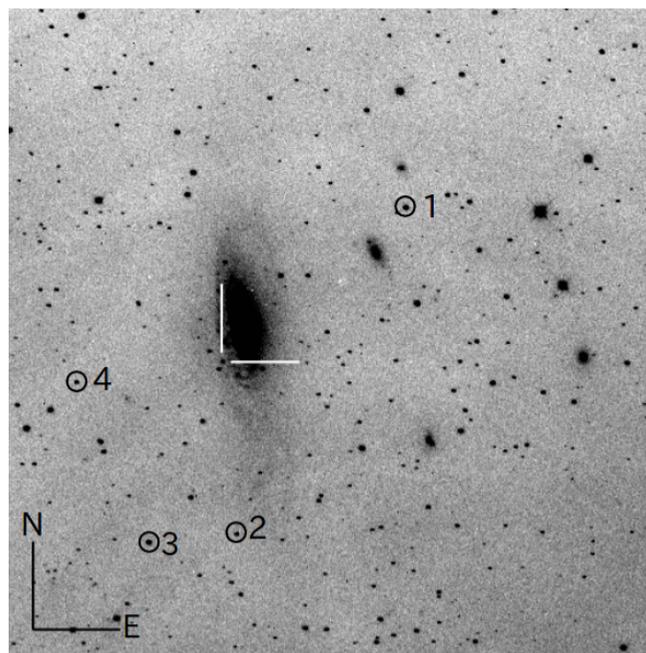


図2. SN 2013buとNGC 7331

(2) 観測結果

① Light Curve

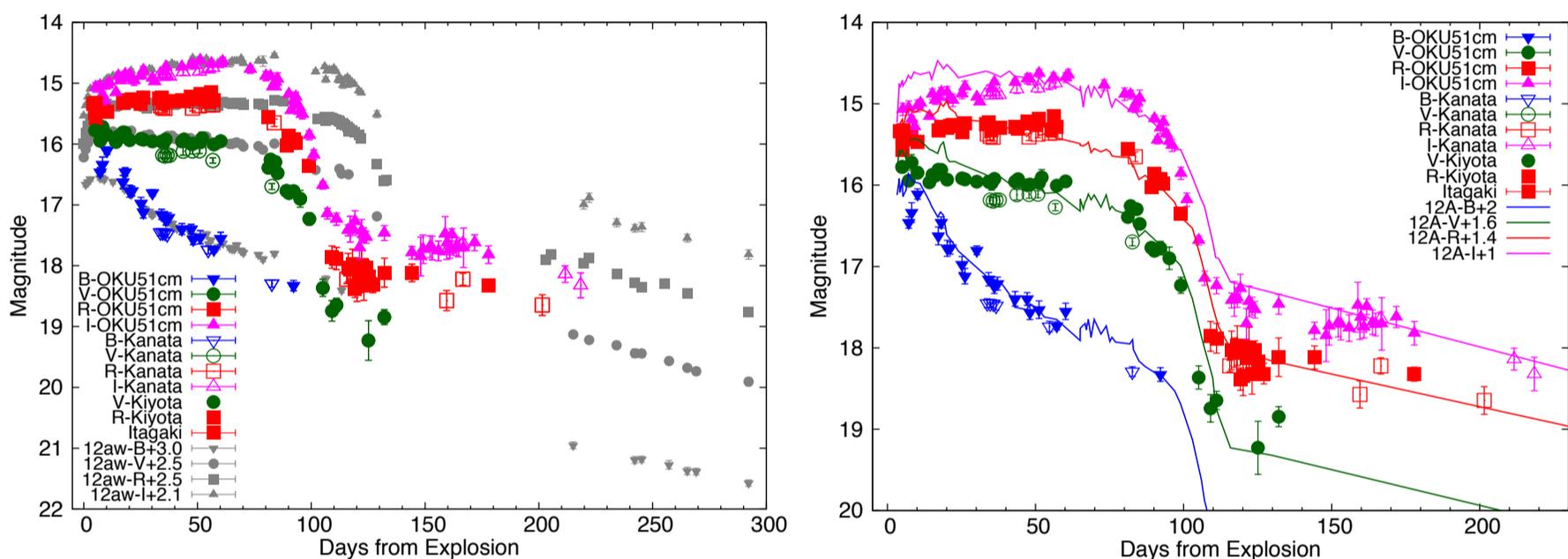


図3. SN 2013buのlight curve
(左)SN 2012aw、(右)SN 2012A との比較

図3の左側は、典型的なIIP型であるSN 2012awと比較したSN 2013buの光度曲線である。SN 2012awと比べると、SN 2013buのplateau期の長さは短く、またtail期への減光率も大きい。これらから、SN 2013buは典型的なIIP型超新星ではないことが分かる。また図3の右側は、光度曲線が短い特徴を持つSN 2012Aとの比較である。SN 2013buのplateau期の長さは、このSN 2012Aとよく似ており、またtail期への減光の大きさもほぼ同じである。このことから、SN 2013buはSN 2012Aと似たような天体であると考えられる。

② Spectra

図4は、SN 2013buのスペクトルである。典型的なIIP型に見られるバルマー系列及びCa II IR tripletがはっきり見られた。また、爆発後83日のスペクトルには、Sc IIやBa IIも確認された。

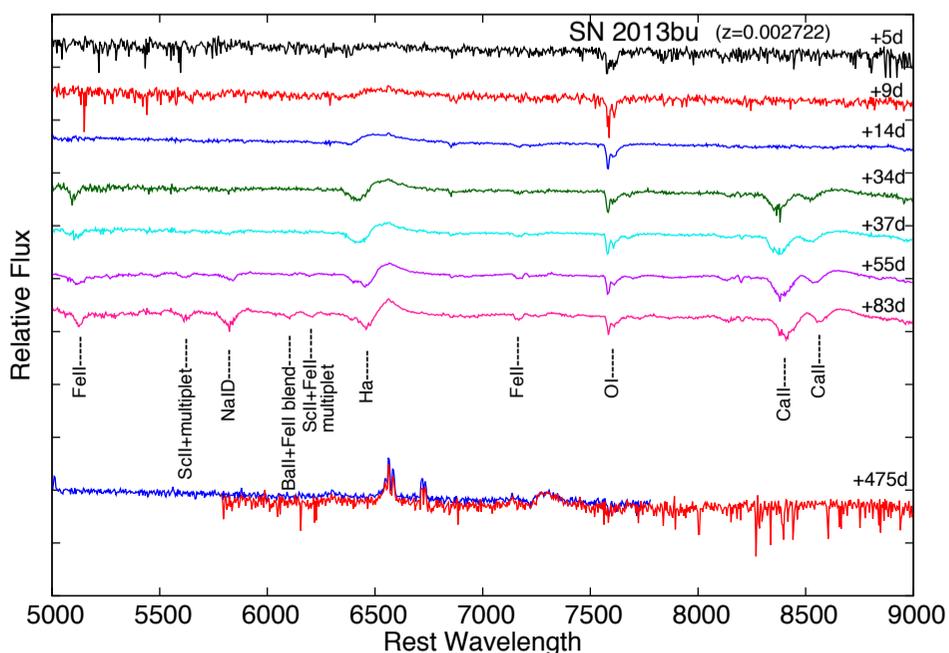


図4. SN 2013buのスペクトル

(3)その他解析結果

※我々の本研究では、Iバンドに着目した研究が少なく、またより後期まで精度よく観測が可能であることから、Iバンドに注目して比較・議論等を行った。

①SN 2013buの爆発日の推定

SN 2013buの発見時の等級は16.6等であった(Daniel 2013; CBET)。しかし実際に発見時の画像を我々で解析したところ、SN 2013buの等級は 15.4 ± 0.2 等であり、既にplateau期に入っていたことが、我々の解析結果から判明した。また、板垣氏は発見日の9日前にもNGC 7331を撮影していたが、その時点ではこの超新星はまだ爆発していなかった。これらのことから、我々はこの天体を爆発直後から観測出来た可能性が高いと判断し、爆発日を $2013/04/17 \pm 3$ とした。

②plateau期の長さ

我々は、後の比較のために、plateau期の長さの求め方を独自に定義した。定義方法は以下の通りである(右図参照)。

- (i) light curveを二日ごとに区切り、等級の平均を区切りごとにとる。
- (ii) 求めた平均値を最初から順に足していき、その和の平均値とその次の値の差が0.5以上になったところを、plateau期の終わりとする。
- (iii) plateau期の終わりから爆発日を引いて出た値を、plateau期の長さとする。

この定義を元に、SN 2013buのplateau期の長さを求めた結果、 91.7 ± 3 日となった。これは他のIIP型超新星と比べると、非常に短いplateau期の長さであった。

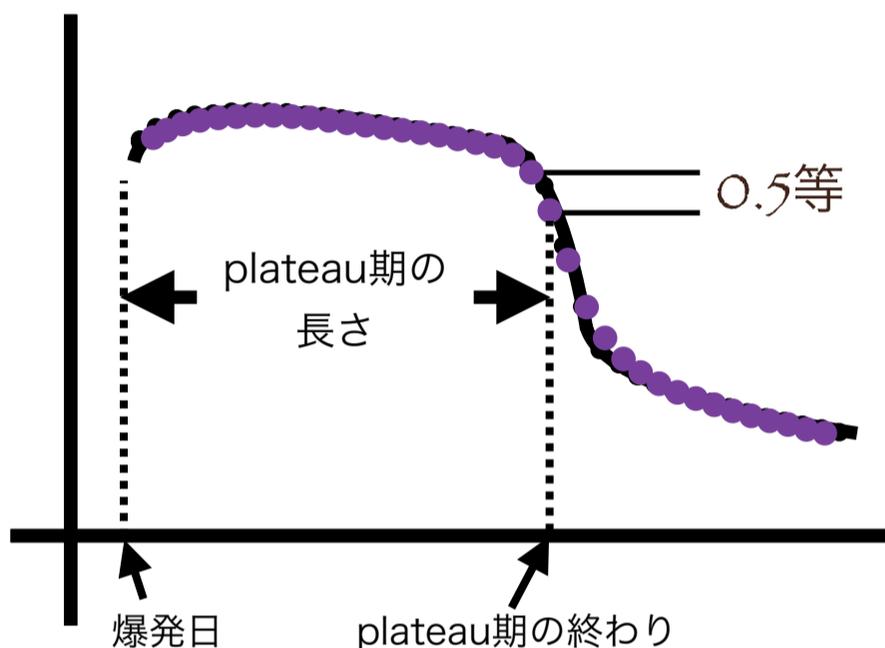


図5. plateau期の長さの求め方

③Iバンドの絶対等級

図6は、IIP型超新星のIバンド絶対等級を比較したグラフである。SN 2013buの絶対等級は、典型的なIIP型超新星であるSN 1999emに似ている。しかしSN 2013buのtail期の光度は、subluminousなクラスのSN 2008inやSN 2009Nと似た等級であった。またplateau期の長さは、上でも述べたが、他のIIP型超新星と比べると非常に短いことが分かる。

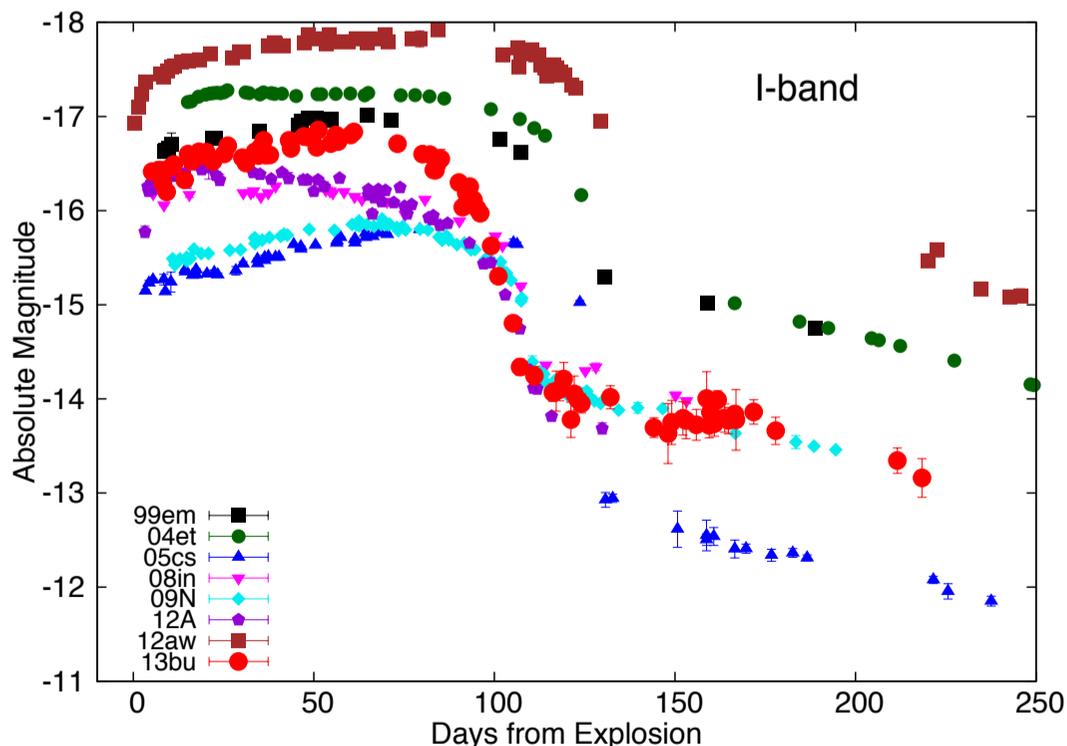


図6. Iバンドの絶対等級の比較

4. 議論

※以下でIIP型超新星の比較を行うが、plateau期のデータは爆発後50日から、tail期のデータは爆発後150日から得ることで統一した。また、SN 2013buやその他のIIP型超新星の絶対等級や ^{56}Ni 質量などは、前で求めたplateau期の長さを使って独自に求めた。

(1) 相関関係

① plateau期とtail期の絶対等級

図7は、IIP型超新星のplateau期とtail期の絶対等級を比較したグラフである。この図から、plateau期の絶対等級が暗いほど、tail期の絶対等級も暗くなるのが分かる。また、SN 2013buはこの相関に乗っているように見えるが、一方ではtail期の光度から予期されるよりもわずかにplateau期の光度が明るいともとることができる。

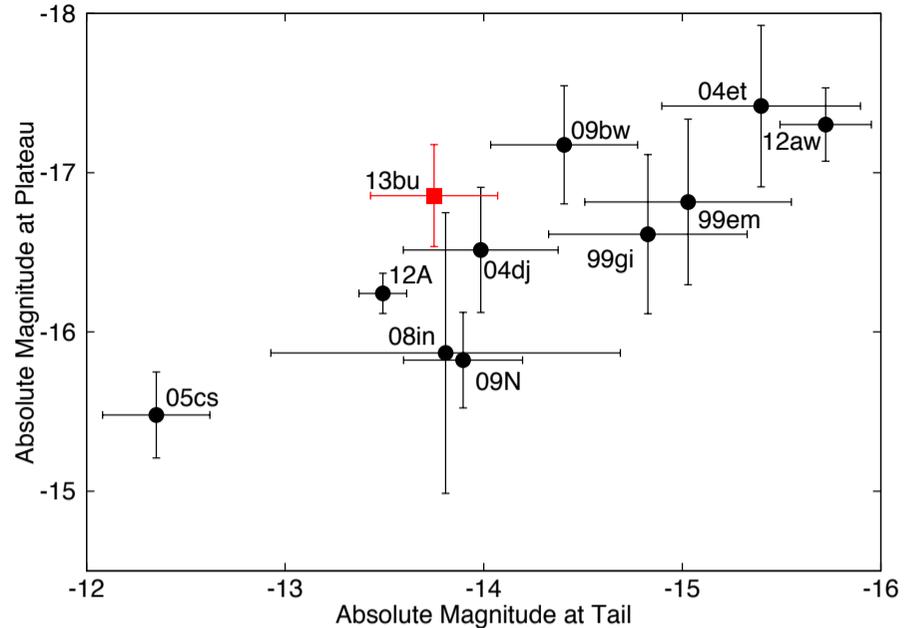


図7. plateau期とtail期の絶対等級

② plateau期の長さとの絶対等級

Faran et al. (2014)では、plateau期の長さとのバンド絶対等級の間に相関があり、明るいほどplateau期の長さが短いと述べられている。しかし我々が調べた結果、Faranが示した関係は見られなかった(図8)。それどころか逆に、SN 2013buとSN 2005csを除くと、plateau期が長いと明るくなるという関係が見られた。この理由であるが、Faranではサンプル数の不足が考えられる。

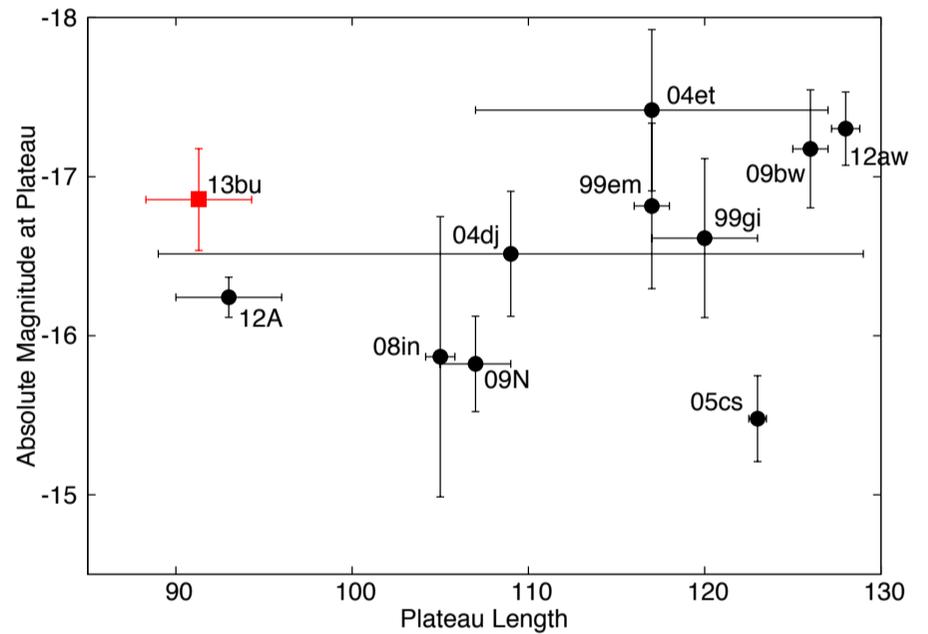


図8. plateau期の長さとの絶対等級

③ plateau期の長さとの ^{56}Ni の質量

tail期の等級から求めたSN 2013buの ^{56}Ni の質量は、 $0.006 M_{\odot}$ と推定された。図9は、plateau期の長さとの ^{56}Ni の質量の関係を示したグラフである。SN 2005csを除けば、plateau期が長いほど ^{56}Ni の質量は大きくなる、という相関があるように見える。

SN 2013buの絶対等級の明るさは、 ^{56}Ni の質量から考えられるよりもかなり明るい結果となったが、これは ^{56}Ni の質量は爆発時のエネルギーのみによって決まらないだろうということを示唆している。

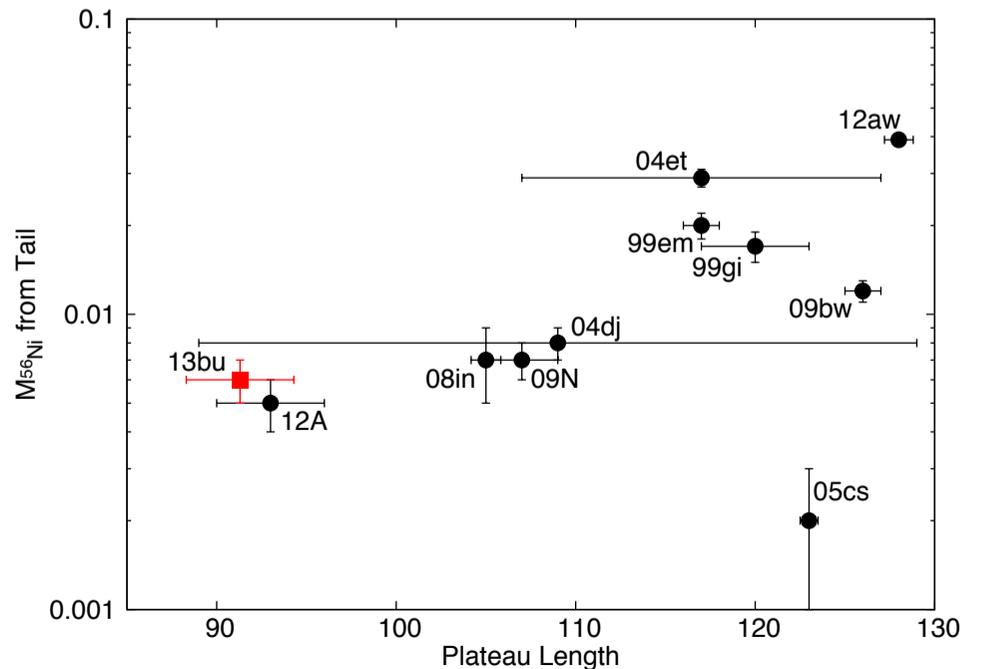


図9. plateau期の長さとの ^{56}Ni の質量

(2)物理量の推定

我々は、Popov (1993)で示されている以下の式を用いて、SN 2013buの爆発時のエネルギーやejectaの質量を求めた。

$$\log E = 4.0 \log t_p + 0.4V + 5.0 \log u_{ph} - 4.311$$
$$\log M = 4.0 \log t_p + 0.4V + 3.0 \log u_{ph} - 2.089$$

我々はSN 2013buの物理量を見積もる際、非常に良く研究されているSN 1999emとSN 2012Aを比較対象に用いた(不定性を持つ係数をキャンセルするため)。典型的なIIP型超新星であるSN 1999emを用いてSN 2013buの物理量を求めると、 $E_{13bu} \sim 0.2 \times 10^{51} \text{ erg}$ 、 $M_{13bu} \sim 4.2 M_{\odot}$ という結果になった。また、SN 2013buとよく似た観測的特徴を示しているSN 2012Aを用いると、 $E_{13bu} \sim 0.5 \times 10^{51} \text{ erg}$ 、 $M_{13bu} \sim 10 M_{\odot}$ という値になった。これらから、SN 2013buのejectaの質量は4~10 M_{\odot} 、親星の質量は8~12 M_{\odot} となり、これは最小クラスの親星質量に匹敵する、low-mass endからの超新星であるということを示唆する結果となった。

一方、最小質量クラスのSN 2005csとSN 2013buを比較してみた。図10は、SN 2013buとSN 2005csのバンドの絶対等級を比較した図である。爆発時のエネルギーはSN 2013buの方が大きい、plateau期の長さはSN 2005csの方が長い、ということがこの図から考えられる。これらのことから、似通った親星から、全く異なる観測的多様性を生むかもしれない、ということを示唆している。

E...爆発エネルギー($\times 10^{51}$)
M...ejectaの質量($\times M_{\odot}$)
 t_p ...plateau期の長さ
V...plateau期の絶対等級
 u_{ph} ...水素線の膨張速度($\times 10^3$)

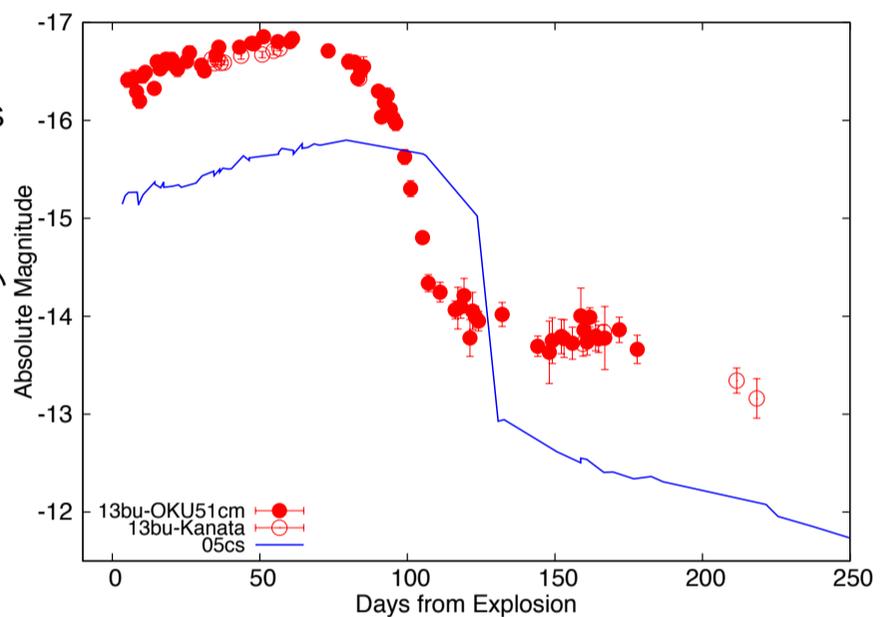


図10. SN 2013buとSN 2005csのバンド絶対等級の比較

5. まとめ

我々は、IIP型超新星SN 2013buの測光分光観測を長期間にわたって行った。観測データを解析した結果、SN 2013buはplateau期の長さが非常に短いことが分かった。この天体の性質を調べるため、よく研究されているIIP型超新星と比較したところ、tail期から予測されるよりも明るいplateau luminosityを示した。また、光度曲線と線速度から見積もった物理量から、SN 2013buは最小クラスの質量を持つIIP型超新星であることが判明した。しかし、同じ最小クラスであるSN 2005csとは、全く異なる観測的多様性を示すのではないかとということを示唆する結果となった。