

かなた望遠鏡により取得された Ia 型超新星の
光度曲線とスペクトルに基づく研究

広島大学 理学部 物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B141076 木村 浩輝

主査：川端 弘治

副査：岡部 信広

2018年2月9日

概要

宇宙において距離を測定するためには、その天体の真の明るさを知る必要があり、そのような天体は非常に限られている。Ia型超新星は、その光度曲線の減光率と絶対光度に強い相関関係を持ち、母銀河の距離を測定できる強力なツールとして知られている。その結果、宇宙加速膨張という重大な科学的発見がもたらされた。しかしながら、Ia型超新星の爆発起源天体や爆発メカニズムは未だに明らかになっていない。近年、Ia型超新星の系統的な分光観測が進められ、膨張速度の多様性が示された。その結果、絶対光度の類似性に対して、膨張速度においては多様性を示すことが示された。これらは、起源天体や爆発メカニズムの多様性を反映している可能性があり、さらなる詳細な研究が求められている。

本研究では、かなた望遠鏡で増光期から取得された6つのIa型超新星の光度曲線・スペクトルデータを用いて、減光速度と膨張速度の変化率を調査した。その内の4つが先行研究で示された膨張速度と速度変化率の関係性に従うことを示した。一方で、残りの2つは膨張速度に比べて大きな速度変化率を示すことを明らかにした。また、これら2つのサンプルは光度曲線においても比較的速い減光を示すタイプであることが明らかになった。したがって、膨張速度と光度曲線による観測的分類は、必ずしも爆発メカニズムや起源天体の多様性を反映しているとは限らないと結論付けた。

目次

第 1 章	序論	3
1.1	Ia 型超新星とは	3
1.1.1	超新星の分類と Ia 型	3
1.1.2	親星と爆発モデル	4
1.1.3	距離指標としての Ia 型超新星	5
1.1.4	分光学的多様性	6
1.2	研究の目的	7
1.3	研究対象の超新星	8
第 2 章	方法	9
2.1	かなた望遠鏡によって取得されたデータ	9
2.1.1	観測データ	9
2.2	線速度の測定	10
2.3	光度曲線	10
第 3 章	結果	11
3.1	SiII の線速度変化	11
3.2	ライトカーブ	12
3.2.1	光度曲線	12
3.3	他天体との速度変化率・減光速度の比較	13
第 4 章	議論とまとめ	15
4.1	SN 2011B の起源	15
4.2	まとめと今後	15

目次

1.1	極大期に得られる超新星爆発のスペクトル (Filippenko, 1997)。水素の吸収線が見られる超新星は II 型と分類され (b)、強いケイ素、硫黄、鉄などの吸収線が見られる超新星は Ia 型と分類される (a)。	3
1.2	降着モデルの想像図。伴星から主星である白色矮星に少しずつ質量が供給され、限界質量に到達し爆発に至る。	4
1.3	合体モデルの想像図。2つの白色矮星が重力波の放出にともなって接近衝突合体し、チャンドラセカール限界質量を超え、爆発に至る。	4
1.4	減光速度 ($\Delta m_{15}(B)$) と極大絶対等級の相関 (Prieto et al., 2007)。極大等級から 15 日後の減光等級が $\Delta m_{15}(B)$ として定義される。減光速度が大きい程、より明るい絶対光度を持つことが知られている。	5
1.5	S II $\lambda 6355$ の線速度変化 (Benetti et al., 2005)	6
1.6	膨張速度の変化率と $\Delta m_{15}(B)$ (Benetti et al., 2005)	7
2.1	ケイ素による吸収線 (Si II $\lambda 6355$)	10
3.1	Si II $\lambda 6355$ の線速度の変化	11
3.2	研究対象の Ia 型超新星のライトカーブ。相似形な変化を示し、減光速度に違いが見られる。	12
3.3	膨張速度の変化率と $\Delta m_{15}(B)$ 。Benetti et al. (2005) に本研究で解析した 6 つのデータを加えた。その特徴から、3つのサブグループに分類され、多様性を示す。	14

第1章 序論

1.1 Ia型超新星とは

1.1.1 超新星の分類とIa型

超新星とは、恒星が一生を終える時に起こす爆発現象である。超新星は、そのスペクトルに見られる吸収線に基づいてI型とII型に分類される (Filippenko, 1997)。初期スペクトルに水素の吸収線が見られるものがII型で、見られないものがI型である。I型の中でも、ケイ素の吸収線が顕著に見られるものがIa型超新星である。Ia型超新星は、白色矮星がチャンドラセカール限界質量付近に到達した時に中心付近で熱核暴走反応が引き起こされ、爆発に至る現象である。一方で、II型及びIb、Ic型超新星は太陽の8-10倍以上の質量を持つ大質量星を起源とする重力崩壊型である。本研究では、Ia型超新星に焦点を当て、複数の天体の観測データを用いて調査を行った。

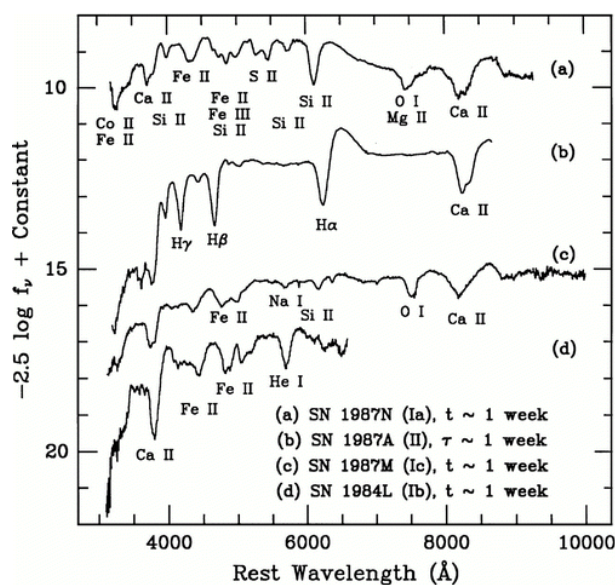


図 1.1: 極大期に得られる超新星爆発のスペクトル (Filippenko, 1997)。水素の吸収線が見られる超新星はII型と分類され (b)、強いケイ素、硫黄、鉄などの吸収線が見られる超新星はIa型と分類される (a)。

1.1.2 親星と爆発モデル

超新星爆発を引き起こす元の星を親星という。Ia 型超新星の親星の起源には、複数の説が唱えられている。降着説と合体説である。前者においては、連星系の中で、主星の重力圏によってロッシュローブを満した伴星から白色矮星に少しずつ物質が降着していき、白色矮星の質量がチャンドラセカール限界質量付近に到達した時、熱核暴走反応を起こし爆発する、と考えられている。伴星は赤色星が候補として考えられている。一方で、合体説においては白色矮星同士が合体衝突し、総質量がチャンドラセカール限界質量を超え、中心部が臨界密度に到達すると考えられる。両シナリオともに、親星および伴星の光度は非常に暗く、この 40 年で最も近い Ia 型超新星においても、親星は直接検出されていない (Li et al., 2011; Kelly et al., 2014)。

白色矮星がある領域で臨界密度に到達し、核融合反応が始まると、白色矮星物質を燃焼させながら伝搬していく。この時、伝搬は亜音速で広がり白色矮星を構成する炭素と酸素をより重い元素に改変していく。これを爆燃波 (deflagration) と呼ぶ (Nomoto et al., 1984)。また、爆燃波の後に、白色矮星内部のより外側である臨界密度に到達し、音速を超える衝撃波を生み、より強い燃焼が引き起こされる。これは爆轟波 (detonation) と呼ばれ、特に爆燃波の後に遅れて引き起こされることから、遅延爆轟波と呼ばれる (delayed detonation; Khokhlov (1991))。

両者の爆発シナリオは、Ia 型超新星の観測を説明するために提案され、特に明るさや大きな膨張速度を説明するためには後者のモデルが必要とされているが、爆発を計算する流体シミュレーションの中で、臨界密度への到達が難しいなどの問題を抱えており、爆発メカニズムは未解決となっている。

これらの諸問題は提唱された後 30 年以上に亘り論争が続いており、未だ解決していない。観測的にこれらの問題にアプローチすることが望まれている。

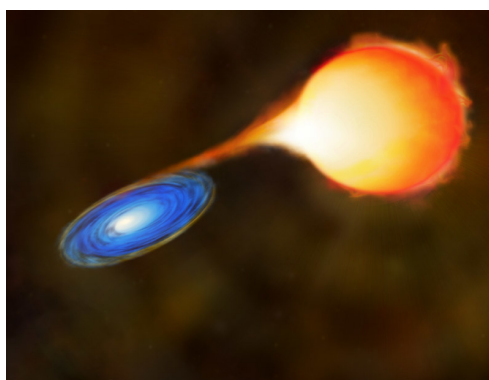


図 1.2: 降着モデルの想像図。伴星から主星である白色矮星に少しずつ質量が供給され、限界質量に到達し爆発に至る。

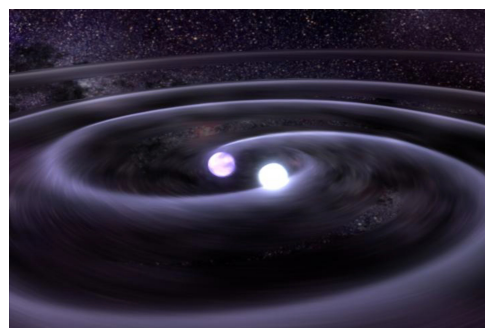


図 1.3: 合体モデルの想像図。2つの白色矮星が重力波の放出とともに接近衝突合体し、チャンドラセカール限界質量を超え、爆発に至る。

1.1.3 距離指標としての Ia 型超新星

Ia 型超新星は光度曲線における減光速度と絶対等級に相関関係が認められる (Phillips, 1993)。減光速度が大きいほど絶対光度も大きいという傾向が観測的に示されている。したがって、光度曲線から絶対等級を推定することが可能となる。見かけの等級と絶対等級を使って遠方の銀河までの距離を測定することができる。このような性質を持つ天体は限られている。この性質を用いて、宇宙加速膨張という重大な科学的発見がもたらされた (Perlmutter et al., 1999; Riess et al., 1998)。

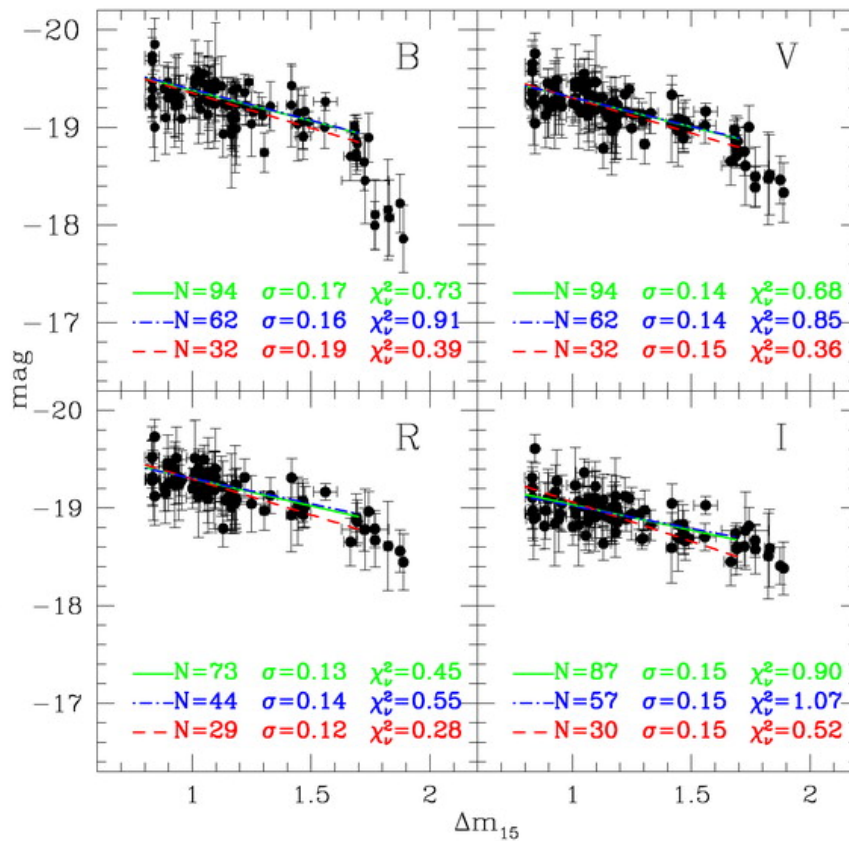


図 1.4: 減光速度 ($\Delta m_{15}(B)$) と極大絶対等級の相関 (Prieto et al., 2007)。極大等級から 15 日後の減光等級が $\Delta m_{15}(B)$ として定義される。減光速度が大きい程、より明るい絶対光度を持つことが知られている。

1.1.4 分光学的多様性

近年、Ia型超新星の分光データが初期から取得されるようになり、膨張速度の変化の統計的な調査がなされている (Benetti et al., 2005)。測定された膨張速度は極大光度の10日前においては 8000 km s^{-1} ものパラッキを示す (図 1.5)。また、大きな膨張速度を持つもの程、より大きな速度変化を示すことが示されている。一方で、膨張速度の小さな天体は速度変化率も小さい。これらは、絶対光度が平均から明るいグループに限られる。絶対光度が暗い天体では初期の膨張速度が小さく、かつ速度変化率も大きい。速度変化率を減光速度に対してプロットすると、3つのサブグループに分類される (図 1.6)。これらは、起源天体や爆発メカニズムの多様性を反映している可能性があり、さらなる研究が求められる。

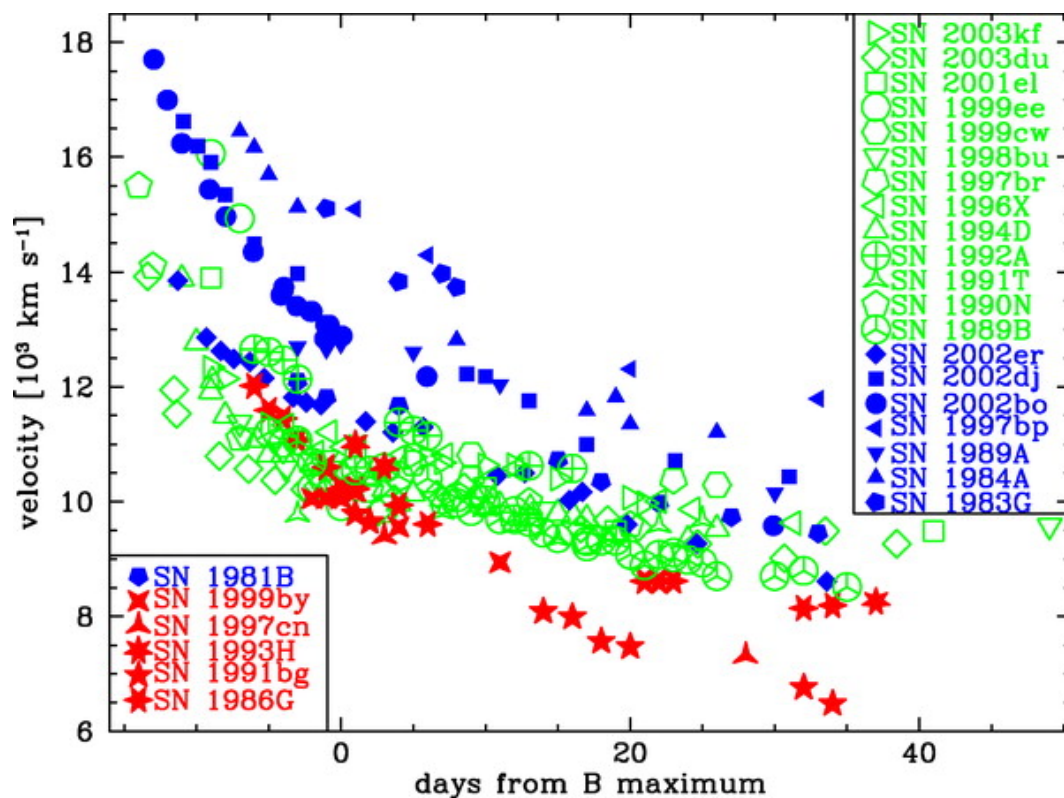


図 1.5: S II $\lambda 6355$ の線速度変化 (Benetti et al., 2005)

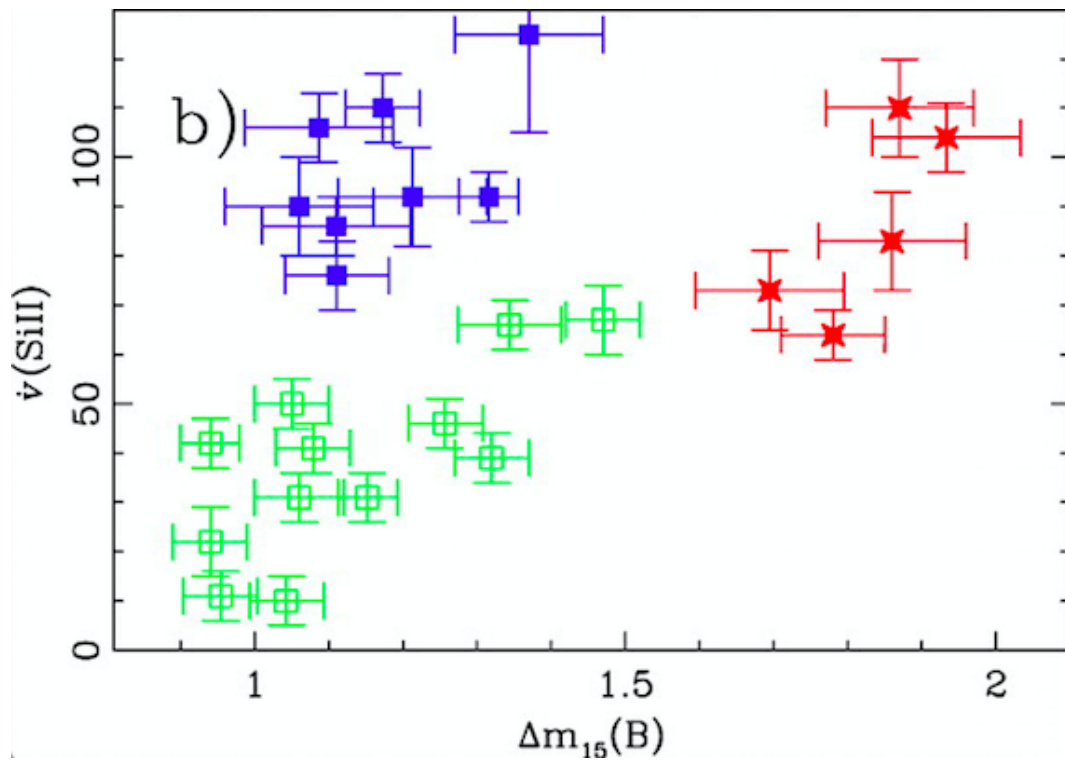


図 1.6: 膨張速度の変化率と $\Delta m_{15}(B)$ (Benetti et al., 2005)

1.2 研究の目的

本研究では、かなた望遠鏡によって得られた Ia 型超新星の新しいデータを複数加えて観測的な多様性を検討する。光度曲線、スペクトルを用いて、各々の天体の光度曲線及び線速度変化に焦点を当て研究する。それらから爆発モデルや親星を議論する。

1.3 研究対象の超新星

表 1.1: 研究対象となる超新星爆発の基本的パラメータ

天体名	発見日	発見等級 [等]	極大日	極大等級 [等]	母銀河	距離 [Mpc]	後退速度 [km/s]
SN 2011B	2011/01/05	17.5	2011/01/21	13.2	NGC 2655	24.400	1400
SN 2011ek	2011/08/04	16.4	2011/08/13	16.2	NGC 918	19.115	1507
SN 2011fe	2011/08/24	17.2	2011/09/10	10.2	M101	6.855	241
SN 2012ht	2012/12/18	18.6	2013/01/04	14.4	NGC 3447	13.730	1066
SN 2013dy	2013/07/10	19.0	2013/07/24	13.0	NGC 7250	18.055	1166
SN 2014J	2014/01/21	11.9	2014/01/31	11.9	M82	3.907	203

調査対象となる超新星爆発は 2011 年から 2014 年にかけて東広島天文台かなた望遠鏡によって取得された Ia 型超新星である。SN 2011B, SN 2011ek, SN 2011fe, SN 2012ht, SN 2013dy, SN 2014, の 6 つが対象となる (表 1.1)。これら 6 つは共通して、銀河の距離が近く、明るいいため、長期に渡るデータ取得が可能となった。これらの観測開始日、観測終了日、取得夜数を示す (表 1.1)。これらのうち、先行研究が出版されている 4 天体について簡潔にその特徴を述べる。

- SN 2011fe : 6.4Mpc の近傍銀河 M101 に極めて初期から発見された Ia 型超新星である。極大等級は 9.8 等にも到達し、この 40 年で見かけ上最も明るい Ia 型超新星である (Zhang et al., 2016)。非常に初期には高速の酸素の吸収線が同定され、白色矮星起源である可能性が示唆された (Nugent et al., 2011)。ハッブル宇宙望遠鏡で取得された爆発前の画像解析から、親星の伴星は赤色巨星である可能性が棄却され、親星モデルの描像に強いインパクトを与えた (Li et al., 2011)。
- SN 2012ht : 西山氏・桜島氏によって非常に早期の段階で、NGC 3447 に発見された Ia 型超新星である。爆発初期からの増光曲線が得られており、典型的なものよりやや暗い中間的な光度を持つ Ia 型超新星である (Yamanaka et al., 2014)。
- SN 2013dy : 爆発直後と見られる非常に初期から発見され、強い炭素の吸収線を示した。炭素は爆発構造の最外層構造を反映しており、元の白色矮星物質と見られる。初期の増光曲線に急激な立ち上がりが捉えられ、伴星との相互作用の兆候は見られなかった (Zheng et al., 2013)。
- SN 2014J : 3.7Mpc の近傍銀河 M82 で発見された Ia 型超新星である。銀河の明るい領域で爆発したため、発見がやや遅れた。この 40 年で最も近い銀河で発見された Ia 型超新星である。母銀河のダストによる強い散乱を受け、赤化している。かなた望遠鏡を用いて偏光撮像観測がなされ、星間ダストの性質に制限が与えられた (Kawabata et al., 2014)。また、可視光での極大後に放射性崩壊したコバルト 56 からのガンマ線が検出され、ある遅延爆轟波モデルで期待される強度と一致したことが明らかになった (Churazov et al., 2014)。

第2章 方法

2.1 かなた望遠鏡によって取得されたデータ

2.1.1 観測データ

表 2.1: かなた望遠鏡で得られた超新星のデータ統計

天体名	観測開始日	観測終了日	取得夜数
SN 2011B	2011/01/09	2011/12/17	69
SN 2011ek	2011/08/11	2012/01/17	55
SN 2011fe	2011/08/25	2012/11/06	118
SN 2012ht	2012/12/20	2013/06/04	57
SN 2013dy	2013/07/11	2014/01/06	82
SN 2014J	2014/01/22	2015/02/03	61

6つの超新星爆発は、かなた望遠鏡及び可視波長域で観測可能な Hiroshima One-shot Wide-Field Polarimetry (HOWPol; (Kawabata et al., 2008)) を用いて、B, V, R, そして I バンドの4つのフィルターで撮像観測が実施されている。特に、本研究においては Ia 型超新星において最も重要となる、絶対等級の指標となる $\Delta m_{15}(B)$ を見積もるために、B バンドの光度曲線データを用いる。

かなた望遠鏡によって得られたデータはすでに IRAF を通じて標準的な解析がなされている。すなわち、撮像データはバイアス・フラット処理がなされ、銀河の背景光によるコンタミネーションを避けるために Point Spread Function (PSF) 測光がなされている。

測定された等級は、等級が良く調べられている参照星を用いた相対測光を実施している。得られた差分等級から HOWPol のフィルターの性質に依存する color term を補正して標準等級が求められている。color term は、良く研究されている星団撮像データを用いて求められている。この撮像データは過去に、HOWPol を用いて BVRI バンドで観測がなされている。

また、分光データも同じく標準的な解析がなされている。波長校正はスカイ領域に見られる水銀や酸素の輝線を同定して行った。また、強度校正は非常に素性のよく知られた高温度星の観測データを用いて行われている。

波長範囲は 4500\AA から 9000\AA となっており、波長分解能は $R=400$ 程度である。本研究においては、スペクトルに見られる幅の広がった吸収線の測定を行うが、これに耐えうるデータである。

2.2 線速度の測定

超新星爆発に見られる吸収線は、その噴出物質の膨張速度のためにドップラー効果によって青方偏移を示す。すなわち、静止波長系で見られる吸収線はより短い波長にシフトする。Ia型超新星においては、6100Å付近に見られるケイ素による吸収線 ($\text{Si II } \lambda 6355$) が最も特徴的であり、よく研究されている。本研究においても、 Si II の吸収線速度の測定を行った。(図 2.1)

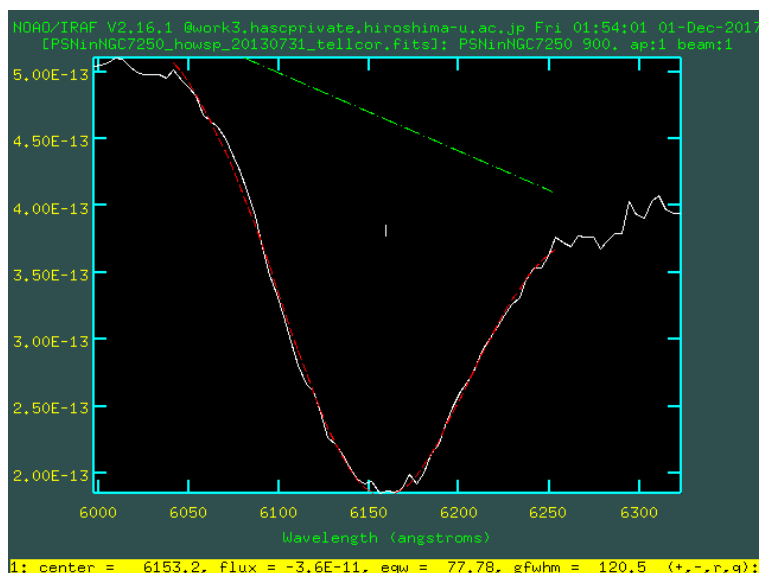


図 2.1: ケイ素による吸収線 ($\text{Si II } \lambda 6355$)

IRAF の *onedspec* パッケージに搭載されている *splot* タスクを用いて、 $\text{Si II } \lambda 6355$ の吸収線をガウシアンフィッティングを行い、吸収線最小波長を求めた。吸収線は幅が広がっており、独立な複数回の測定を行い、平均値を取った。その標準偏差を誤差とした。また、これとは独立に波長分解能によって系統誤差も考慮に含めなければならない。得られた吸収線波長位置は、ドップラー効果の式により速度に変換し、最後に母銀河の後退速度を補正して、線速度を求めた。まとめると以下の式になる。

$$v_{\text{SiII}} = \frac{\lambda_{\text{cen}} - \lambda_{\text{lab}}}{\lambda_{\text{lab}}} \times c - v_{\text{rec}}$$

λ_{lab} はその元素による吸収線の実験室波長、 λ_{cen} は測定した波長、 c は光速、 v_{rec} は母銀河の後退速度である。

2.3 光度曲線

光度曲線は極大光度付近で緩やかな変化を示す。まず数値上最も小さい値を仮の極大日とした。その極大光度付近の5日間の区間を定め、平均等級を求めて、極大等級とした。また同様に、 $\Delta m_{15}(B)$ も極大光度及び15日後のそれぞれ前後5日間で平均等級及び標準偏差を求めた。

第3章 結果

3.1 SiIIの線速度変化

6つの超新星の線速度変化を示す(図3.1)。SN 2011B, SN 2011fe, SN 2012ht, SN 2013dyは極大光度の10日以前に $13000\text{--}14000\text{km s}^{-1}$ と比較的大きな速度を示したが、極大の10日前までに急激な速度減衰を示し、極大光度付近で 11000km s^{-1} 程度となった。これらは、Benetti et al. (2005)で示された膨張速度の遅いIa型超新星の特徴に合致する。一方で、SN 2011ek, SN 2014Jの膨張速度は初期に 15000km s^{-1} とさらに大きな速度を示し、その後ほぼ直線的な速度の減少を示した。これらの特徴は膨張速度の大きなIa型超新星に合致する。さらに、SN 2011B, SN 2011ekに他の超新星に見られない特異な振る舞いが見られた。すなわち、SN 2011Bにおいては、極大10日後に 8000km s^{-1} まで速度が減少し、SN 2011ekにおいては25日後に 8000km s^{-1} まで減少を示した。これらの特徴は典型的なIa型超新星には見られない。

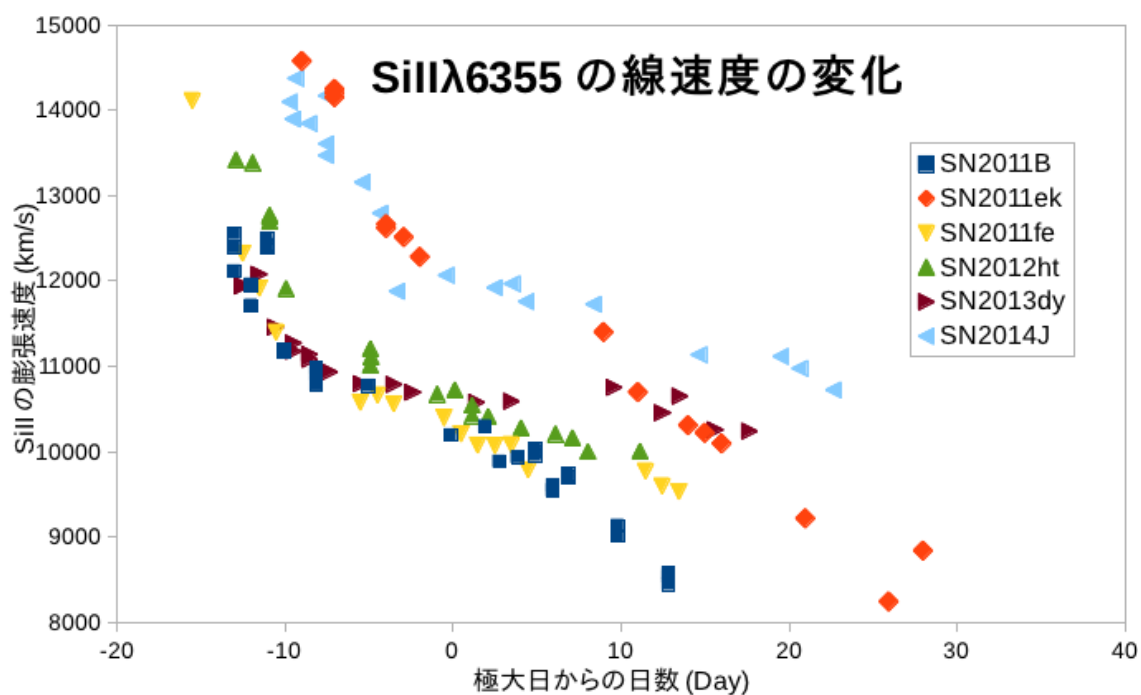


図 3.1: SiII λ 6355 の線速度の変化

3.2 ライトカーブ

3.2.1 光度曲線

6つの超新星のBバンドの光度曲線を示す(図3.2)。極大光度付近の光度曲線の振る舞いに着目するために、観測開始から極大後60日までのデータを示している。各々の光度曲線は極大付近で滑らかな形状であり、相似形を示す。また、減光速度に違いが見られる。

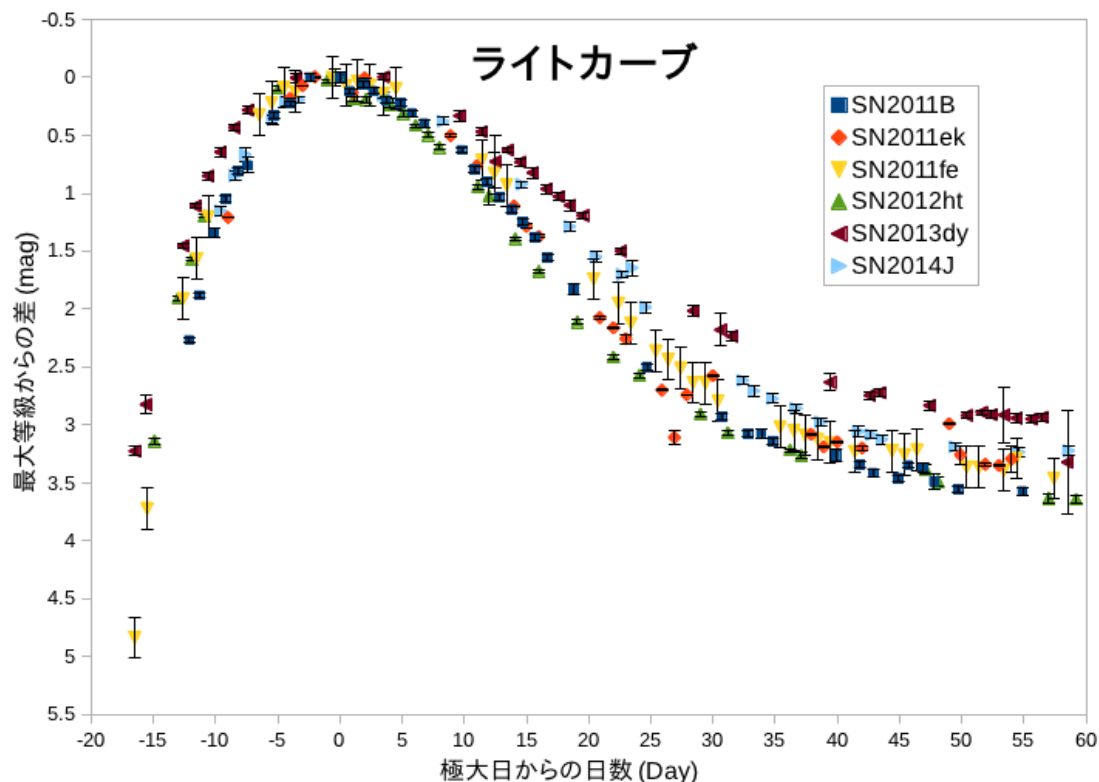


図 3.2: 研究対象の Ia 型超新星のライトカーブ。相似形な変化を示し、減光速度に違いが見られる。

これらの光度曲線を用いて、Ia 型超新星において絶対等級の指標となる $\Delta m_{15}(B)$ を見積もった。 $\Delta m_{15}(B)$ は B バンドにおける極大等級と極大日から 15 日後の等級差である。本研究においては、極大日を最も明るい等級の日と定め、極大等級は極大日前後の 5 日間の平均等級、15 日後の等級はその前後 5 日間の平均等級と定めた。これらの差を $\Delta m_{15}(B)$ として求めた。また、極大等級・15 日後の平均等級を求めた際の各々の標準偏差を誤差とした(表 3.1)。(表 3.1)には Si II の膨張速度の変化率も併せて記す。 $\Delta m_{15}(B)$ を指標として、減光速度を議論する。SN 2013dy、SN 2014J の $\Delta m_{15}(B)$ は比較的小さいことが分かった。これらは、先行研究と誤差の範囲で一致する。

表 3.1: $\Delta m_{15}(B)$ 、膨張速度の変化率とそれぞれの測定誤差

天体名	$\Delta m_{15}(B)$	$\Delta m_{15}(B)$ の測定誤差	速度変化率	速度変化率の測定誤差
SN 2011B	1.19	0.10	147	11.5
SN 2011ek	1.28	0.22	108	35.1
SN 2011fe	1.17	0.26	46.5	13.7
SN 2012ht	1.45	0.22	61.9	7.09
SN 2013dy	0.77	0.09	6.73	10.2
SN 2014J	0.73	0.26	60.4	8.49

3.3 他天体との速度変化率・減光速度の比較

一般に、Ia 型超新星においては、 $\Delta m_{15}(B)$ に対して絶対等級が強い相関関係を示す。しかしながら、Benetti et al.(2005) は、特にある値より小さな $\Delta m_{15}(B)$ に対して、速度変化率が大きくバラつきを持つことを明らかにした。 $\Delta m_{15}(B)$ に対する速度変化率に基づいて、3つのサブグループに分類されることが示された。

- HVG : $\Delta m_{15}(B)$ が 1.5 より小さく、極大光度付近で 12000km s^{-1} 以上の大きな速度を持ち、なおかつ速度変化率の大きなサブグループ。high-velocity gradient の略 (図 3.3 における青色の点)。
- LVG : $\Delta m_{15}(B)$ が 1.5 より小さく、極大光度付近で 12000km s^{-1} 未満の小さな速度を持ち、なおかつ速度変化率の小さなサブグループ。low-velocity gradient の略 (図 3.3 における緑色の点)。
- FAINT : $\Delta m_{15}(B)$ が 1.5 以上の絶対光度の暗い天体のグループ。極大光度付近では 12000km s^{-1} 未満の小さな速度を持ち、なおかつ速度変化率が大きい。絶対等級が暗い性質を持つことから FAINT と名付けられた (図 3.3 における赤色の点)。

本研究において求めた $\Delta m_{15}(B)$ 及び速度変化率を図 3.3 にプロットした。SN 2011fe, SN 2012ht, SN2013dy, SN 2014J は LVG のグループに属すると考えられる。SN 2013dy は $\Delta m_{15}(B)$ と速度変化率が非常に小さいことが分かった。これは先行研究に一致する。SN2014J の $\Delta m_{15}(B)$ も著しく小さいが、決定誤差が大きい。これは極大光度付近にデータが少ないためである。また、SN 2012ht は速度変化率がやや大きく、 $\Delta m_{15}(B)$ もやや大きい。近年、中間的なパラメータを持つ Ia 型超新星も発見されてきており、これに対応する。先行研究で求められている値も一致する。また、SN 2014J は HVG と LVG の中間であると指摘されている (Galbany et al., 2016 ; Srivastav et al., 2016) が、これにも誤差の範囲内では一致している。

一方で、SN 2011ek は速度変化率が極めて大きく、HVG の中でも際立っている。これは線速度が極大光度を経過した後も直線的に減少していることが原因である。また、SN 2011B はやや大きい減光速度を持ち、また大きな速度変化率を持つ。速度変化率が大きな要因は、極大光度を過ぎた後 10 日後に 8000km s^{-1} の減少を示しているためである。極大光度後に大きく線速度が減少するのは FAINT に見られる特徴であり、LVG には見られない。

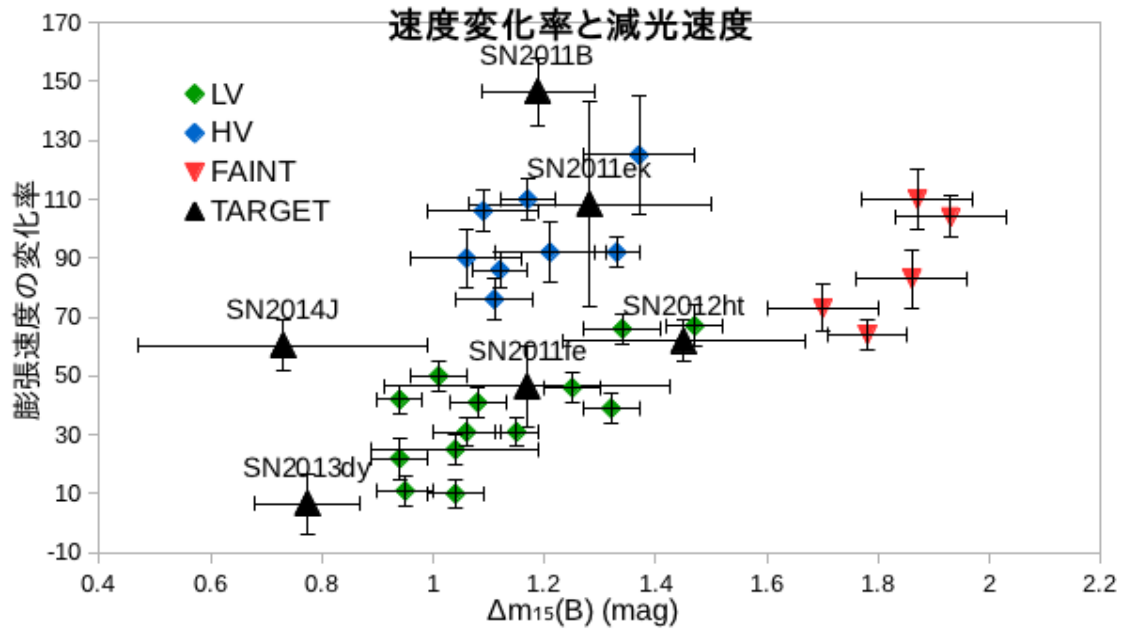


図 3.3: 膨張速度の変化率と $\Delta m_{15}(B)$ 。Benetti et al. (2005) に本研究で解析した 6 つのデータを加えた。その特徴から、3 つのサブグループに分類され、多様性を示す。

第4章 議論とまとめ

4.1 SN 2011B の起源

本研究において、SN 2011B は大きな速度変化率を持ち、かつ小さな $\Delta m_{15}(B)$ の値を持つことを明らかにした。これは HVG に属することを示唆する。一方で、極大光度付近においては、その速度は 11000 km s^{-1} 程度であったが、その速度は 8000 km s^{-1} まで減少しており、このような特徴は HVG に合致しない。寧ろ、小さな $\Delta m_{15}(B)$ 、小さな膨張速度は LVG への分類を支持する。

膨張速度の多様性はある爆発メカニズムにおいて、あるパラメータを振ることによって説明できると考えられている (Kasen, 2009 ; Maeda et al., 2011)。しかしながら、HVG/LVG の双方の特徴を併せ持つ Ia 型超新星を発見したことにより、このようなシナリオで多様性を説明することは困難であると言える。爆発メカニズムのさらなる理論的な発展が求められる。

4.2 まとめと今後

Ia 型超新星は、一様な絶対光度を持つため、宇宙で距離を測るために重要な天体である。一方で、爆発の起源となる天体や爆発のメカニズムについては、完全な解明には至っていない。しかし、近年、系統的な分光観測が進み、爆発の膨張速度の多様性が起源天体を反映している可能性が示された。

本研究では、かなた望遠鏡で取得された 6 つの Ia 型超新星について議論を行った。光度曲線と $\text{Si II } \lambda 6355$ の線速度を調べた。従来知られているような多様性を確認することができた。一方で、SN 2011B は、複数のサブグループの特徴を併せ持つことが分かった。少なくとも、速度変化率及び減光速度による分類は、必ずしも Ia 型超新星の起源を反映しているとは限らない可能性がある。今後は、SN 2011B にさらに焦点を当て多様なパラメータの調査を行う予定である。

謝辞

本論文を進めるにあたり、研究のご指導、背景知識のご教授、論文のご添削等、様々なご指導を頂きました。指導教員の宇宙科学センター 山中 雅之 特任助教に深く感謝致します。また、忙しいながら日々指導して頂いた、深沢 泰司 教授、川端 弘治 教授、スタッフの先生方に深く感謝致します。研究室では、同じ超新星グループの先輩としてアドバイスを下さった、中岡 竜也 先輩、河原 直貴 先輩、分からない所をいつも教えて下さった、森 裕樹 先輩、戸田 皓陽 先輩、阿部 太晴 先輩、Tex の使い方を教えて下さった、内田 和海 先輩、プログラムを教えて下さった、小山 恭弘 先輩、長嶋 大樹 先輩に深く感謝します。また、歓迎会や激励会等、研究に協力してくれた研究室の先輩方に感謝します。そして、最後まで共に論文を執筆してきた同期の皆さん、ありがとうございました。

関連図書

- Benetti, S., et al. 2005, ApJ, 623, 1011
- Churazov, E., et al. 2014, Nature, 512, 406
- Filippenko, A. V. 1997, ARA&A, 35, 309
- Kawabata, K. S., et al. 2014, ApJ, 795, L4
- Kelly, P. L., et al. 2014, ApJ, 790, 3
- Khokhlov, A. M. 1991, A&A, 245, 114
- Li, W., et al. 2011, Nature, 480, 348
- Nomoto, K., Thielemann, F., & Yokoi, K. 1984, ApJ, 286, 644
- Nugent, P. E., et al. 2011, Nature, 480, 344
- Perlmutter, S., et al. 1999, ApJ, 517, 565
- Phillips, M. M. 1993, ApJ, 413, L105
- Prieto, J. L., et al. 2007, ArXiv e-prints
- Riess, A. G., et al. 1998, AJ, 116, 1009
- Yamanaka, M., et al. 2014, ApJ, 782, L35
- Zhang, K., et al. 2016, ApJ, 820, 67
- Zheng, W., et al. 2013, ApJ, 778, L15