

極めて明るい Ia 型超新星の観測的研究 —これまでの「限界」を超えた超新星—



山中 雅之

〈広島大学宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: myamanaka@hiroshima-u.ac.jp

Ia 型超新星は極大光度がほぼ一様である。さらに、その減光速度-極大光度関係を用いた補正によりさらに精度は高まり、宇宙遠方までの距離を推定できる標準光源となっている。これは白色矮星がチャンドラセカール限界質量（太陽質量の 1.4 倍）付近に達することで爆発を起こすためと長年考えられてきた。しかしながら、最近になってこのような限界質量（以内）の白色矮星の爆発では説明がつかない「スーパーチャンドラセカール質量超新星爆発」が発見された。本稿では、その 3 例目の候補として発見された SN 2009dc の観測研究について紹介する。われわれは広島大学「かなた」望遠鏡をはじめとした国内中小口径望遠鏡や「すばる」望遠鏡を総動員して早期から一年後までの観測を行った。極大光度から推定されたニッケル 56 の質量は 2.0 太陽質量と極めて大きいことがわかった。さらに分光観測によって炭素が豊富に存在することがわかった。炭素は白色矮星起源の燃え残りの物質であり、親星の質量がより大きいことを意味する。これらのことからわれわれは SN 2009dc がスーパーチャンドラセカール超新星であると結論づけた。

1. Ia 型超新星の性質と未解決問題

宇宙において距離を測定するにはどのような方法が用いられるだろうか？「標準光源」*1 と呼ばれる天体がこれを可能にする。とりわけ Ia 型超新星爆発はその極大光度が本質的にとても明るい（ $M_V \sim -19$ 等）、遠方までの銀河の距離の測定が可能である。遠方の Ia 型超新星の観測は宇宙膨張の加速の発見などのセンセーショナルな研究成果にも結びついている^{1), 2)}。このような背景から、Ia 型超新星は観測、理論の両面から非常によく研究されている天体の一つとなっている。それにもかかわらず爆発メカニズムや親星（爆発する元の星）の正体など重大な問題が解決されていない³⁾。2000 年代には爆発初期の分光学的特徴に

ばらつきがあることもはっきりしてきた⁴⁾。すなわちその観測的特徴の均一性から距離指標としての確立が進んでいる一方で、爆発メカニズムや親星の違いが観測的多様性（非均一性）の起源になっている可能性も指摘されているのである⁵⁾。最近では非球対称爆発をさまざまな角度から観測しているために、多様性が生じているという研究成果も出されている⁶⁾。これらの未解決問題へのアプローチが Ia 型超新星の観測的研究の一つの焦点となる。

Ia 型超新星は、白色矮星がチャンドラセカール限界質量近くに到達したときに中心付近で熱核暴走反応を起こし大爆発を引き起こす現象と考えられている。しかしながら、爆発への道筋は、伴星からの質量降着によって質量が増加しやがてチャ

*1 松永氏が天文月報 2010 年第 103 巻第 2 号で紹介された周期光度関係をもつ型の変光星もその一つである。

ンドラセカール限界質量近くには到達する「単縮退説」⁷⁾か、白色矮星同士の合体によって限界質量に到達する「双縮退説」^{8), 9)}なのかは全く決着がつかない。爆発モデルについては、チャンドラセカール限界質量以内での理論的研究は発展してきており、典型的なグループの **Ia** 型超新星の観測的特徴はよく再現されつつある^{10), 11)}。爆発モデルは白色矮星内部での炭素・酸素の核燃焼が超音速で伝播する「爆燃波モデル (標準モデル)¹²⁾」と、その爆燃波が外層まで伝わる際に超音速の爆轟波へと遷移する「遅延爆轟波モデル¹³⁾」が提唱されている。前者のモデルでは、噴出物質全体をよく混合することや、やや暗い平均的な極大光度を再現することが知られており、後者のモデルでは、反対に爆発で合成された物質は層を作り、より明るい光度を再現することが知られている。最近の観測では、いくつかの **Ia** 型超新星で外層の膨張速度が非常に大きいことが明らかにされているが、これらは後者のモデルを支持する¹⁴⁾。一方で、いくつかの **Ia** 型超新星 (特に膨張速度の遅いタイプ) では非常に弱い炭素の吸収線が検出されている可能性も議論されており、これらは前者で十分再現可能であることが指摘されている¹⁵⁾。もちろん、これらのモデルのうちどちらか一方のみが寄与しているというわけではないかもしれない。

2. 超新星の放射起源—ニッケル 56

Ia 型超新星爆発ではさまざまな元素が合成されるが、特にニッケル 56 は超新星の光度の起源である¹⁶⁾。本稿で紹介する「スーパーチャンドラセカール質量超新星爆発」においては噴出物質の質量の定量化はたいへん重要な議論であり、ニッケル 56 は信頼性の高い質量の定量化が可能な元素である。ニッケル 56 は放射性崩壊元素であり、ガンマ線を放出しながら、コバルト 56 に変わる。放出されたガンマ線と内部の密度の高い噴出物質が相互作用し、噴出物質が温められる。結果的に、超新星の外層では可視で放射ピークがくる。ニッ

ケル 56 の電子捕獲に対する平均寿命は 8.8 日と短い、大気膨張の効果との兼ね合いで観測されているようなタイムスケールの光度曲線をつくる。おおよそ極大に到達するのが 2-3 週間程度であると考えられているが、このタイムスケールと極大光度をパラメーターとして超新星が合成したニッケル 56 を見積もることが可能である。観測では特に、極大光度を求めるための標準星を用いたキャリブレーションや星間赤化の補正が重要なファクターとなる。

3. スーパーチャンドラセカール質量超新星

ここまで述べてきたとおり、**Ia** 型超新星は観測理論の両面から非常によく研究が進んでいるが、一方で「新たな多様性」とも呼べる全く新種の **Ia** 型超新星が発見された。それが“スーパーチャンドラセカール超新星”である。2003 年に **Supernova Legacy Survey (SNLS)** という宇宙遠方の超新星サーベイグループによって発見された **SN 2003fg** という超新星がその最初の天体であった¹⁷⁾。**SN 2003fg** はその見かけの等級と母銀河の後退速度から $M_V = -19.9$ 等というこれまで研究されてきた最も明るかったクラスの超新星 ($M_V = -19.5$ 等)¹⁸⁾ より 0.4 等も明るい光度をもつことが明らかにされた。さらにその減光も遅く、「減光が遅いほど明るい」という **Ia** 型超新星の幅-光度関係に一致するセンスであることもわかった。何より極大光度付近で得られたスペクトルは **Ia** 型超新星のそれによく似ており、かつ炭素の吸収線が確認された。このような特徴を示す **Ia** 型超新星は **SN 2003fg** が初めてであった。見積もられたニッケルの質量は 1.3 太陽質量と極めて重く、膨張速度から得られた束縛エネルギーを仮定すると、元の白色矮星は 2.1 太陽質量程度はあっただろうという大胆な提案がなされた。回転のない場合の白色矮星のチャンドラセカール限界質量は 1.4 太陽質量であり、これをはるかにしのぐ。非常にインパク

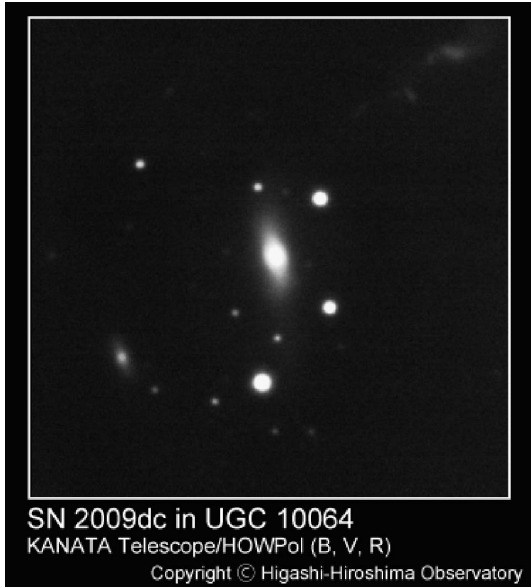


図1 かなた望遠鏡およびHOWPolで撮影されたSN 2009dc. 画像合成は広島大学の伊藤亮介氏が行った。

トの強い発見となった。

その後、別のグループによって2例目となるSN 2006gzの可視測光分光観測の報告論文が出され、これもやはり極めて明るい光度、ゆっくりとした減光、炭素の吸収線が確認され、“スーパーチャンドラセカール超新星”がいよいよ現実的な現象として認識されるようになった¹⁹⁾。しかしながら、理論研究グループによって非球対称な爆発の軸方向が観測者側に向いた場合には、極大光度を明るくする効果があることを指摘する論文も出された²⁰⁾。このモデルではチャンドラセカール限界質量以内の白色矮星の爆発で、十分観測が再現されうる。これら2例の超新星爆発は本当にスーパーチャンドラセカール超新星であったのか、さらなる研究が待たれている状況であった。

4. SN 2009dcの発見と観測

SN 2009dcは2009年4月9日(世界時)にアメリカのアマチュアグループによって発見された。4月16日には分光観測が行われ、そのスペクトル

はIa型超新星の特徴をよく示しており、かつ炭素の吸収が見られ、SN 2006gzに似ているという報告であった。筆者はSN 2009dcについて、17日に東京大の田中雅臣氏より報告を受け、その日のうちに広島大学かなた望遠鏡での観測を実行し、翌18日には0.1等以上増光していることを確認した。19日は曇天のため観測を実行できなかったが、20日にはさらにもう0.2等近く増光していることを確かめた。この増光率から極大に到達するよりおよそ1週間ほど前であることを確信し、国内の中小口径望遠鏡をもつ天文台にメールを流した。このとき素早く反応をくださったのは県立ぐんま天文台の衣笠健三氏と国立天文台岡山天体物理観測所の今田明氏であった。22日には、ぐんま天文台1.5 m反射望遠鏡で分光観測がなされ、岡山観測所では所員時間によりISLEを用いた近赤外撮像観測がなされた。このとき、まだ極大光度に到達する3日前であった。今田氏を経由して鹿児島大1 m望遠鏡でも近赤外での観測が行われた。さらに、5月1日には東京大の田中氏がP.I.となってすばる望遠鏡を用いた偏光分光観測をToOで行った。同様の装置を用いて筆者がP.I.となって1年後の測光分光観測も行った。このようにさまざまな観測所が動員された徹底的な超新星の観測は国内ではまだ例がほとんどない。この大規模な観測が行われた背景には、メートルクラスの望遠鏡の有機的連携と突発天体観測への特化がキーワードとして挙げられる。これらについては大杉氏、植村氏の記事を参照にされたい。結果的にわれわれはSN 2009dcを極大8日前から383日後までの1年以上もの長い期間にわたって観測することができた。

5. 早期観測結果

SN 2009dcにおいてまず注目されるべきはその極大光度である。われわれはVバンドでの見かけの極大等級を14.98等と見積もった。これはわれわれの銀河系の吸収のみを補正している²¹⁾。母銀

河である UGC 10064 の距離指数 34.88 を差し引くと絶対等級 $M_V = -19.90 \pm 0.15$ 等となった。この不定性には距離指数と測光標準星によるキャリブレーションがすでに含まれており、“スーパーチャンドラセカール超新星” SN 2003fg と同程度に明るいことがわかった。さらに、われわれは母銀河中を漂う星間ダストによる吸収の補正を検討した。FOCAS のスペクトルには Na によるわれわれの銀河のものとは異なる母銀河起源の吸収線が明瞭に受かっていた。この吸収量を基にダストによる減光量を見積もって絶対等級を求めたところ $M_V = -20.32 \pm 0.19$ 等となった。この値は、SN 2009dc がこれまで発見されているどの Ia 型超新星より明るいことを意味する。さらに極大後の減光率も極めて緩やかで SN 2006gz とほぼ一致しており、Ia 型超新星の「遅い減光ほど明るい」相関関係に誤差の範囲内で従うこともわかった。われわれは、通常の超新星と同様に、可視域での放射が全総放射の 6 割程度であると仮定して²²⁾、ニッケル 56 の質量を 2.0 ± 0.5 太陽質量と求めた。典型的な Ia 型超新星は 0.6 太陽質量のニッケル 56 を生成するが、それははるかにしのぐ値であった。

分光観測では、極大の 5 日後に至るまでの長期間にわたって強い炭素の吸収線が見られた。強い炭素の吸収が確認された SN 2006gz でも極大後には炭素の吸収は見られなかった。このことから SN 2009dc は非常に豊富な炭素を噴出物質中に含んでいたことが明らかになった。炭素は白色矮星起源の物質であり、核燃焼が伝播しなかった領域が広いことを意味する。この観測事実は白色矮星の質量がより重かった事実をサポートする。われわれはこれらの観測事実から、その総噴出物質が(回転のない)白色矮星のチャンドラセカール限界質量を超えており、SN 2009dc が 3 例目の“スーパーチャンドラセカール超新星”であることを結論づけた²³⁾。田中氏を P.I. として行われた偏光分光観測もこれを支持する結果であった。す

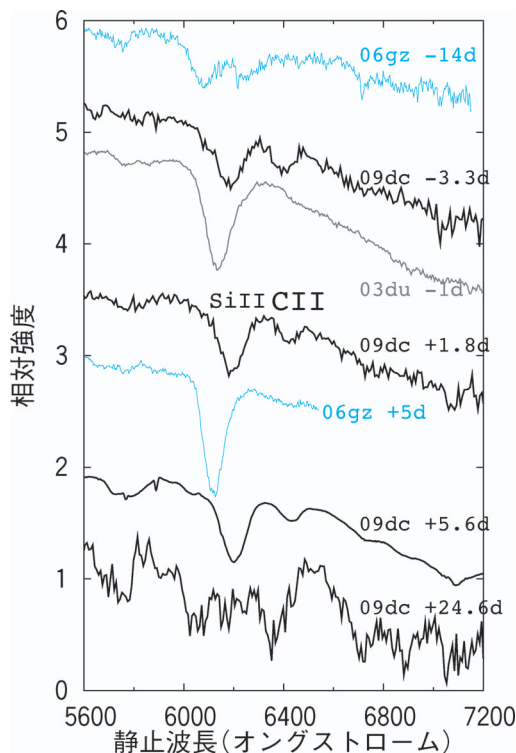


図2 SN 2009dc のスペクトル進化、もう一つのスーパーチャンドラセカール超新星 SN 2006gz、典型的な Ia 型超新星 SN 2003du と比較している。

なわち、連続光成分の偏光が非常に弱かったこと、および Si の吸収で強い偏光度を示したことが明らかになった。これは、膨張する大気的光球面がほぼ球対称であり、加えて Si の層が厚いことを意味する。非球対称爆発はほぼ支持しない。われわれはこれらの観測結果をそれぞれの論文としてまとめあげ、世界に先駆けて成果を公表することができた^{23), 24)}。

6. 後期観測結果

SN 2009dc の観測はこれで終わったわけではない。減光し、暗くなった 1 年後にもすばる望遠鏡で測光と分光観測を行うことができた。そこからは意外な観測的特徴を示す結果を得ることができた。測光観測によって得られた光度は早期観測か

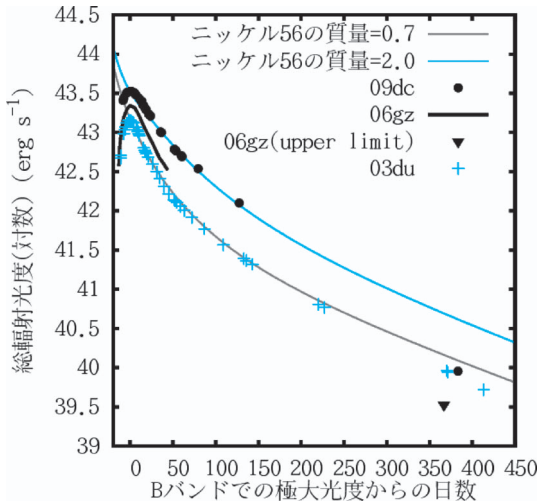


図3 SN 2009dcの疑似総放射光度曲線をSN 2006gzと典型的なIa型超新星SN 2003duの総放射光度曲線を比較したもの。それぞれIa型超新星の標準的なモデルでフィッティングできている。ニッケルの質量は1太陽質量を基準としている。

ら予測されるより早く暗くなり、この時期の典型的なIa型超新星の光度に追いついてしまった。この説明には二つの仮説が考えられる。一つは初期に何らかの原因でプラスアルファの放射があったか、もしくは後期に何らかの原因で減光したかである。そこでアーネット・ルール¹⁶⁾と呼ばれる超新星の光度変化の基本的な理論を用いて、初期の光度変化の要因を再検討することにした。このモデルでは極大光度からニッケル56の質量を求めることができるほかに膨張大気の運動エネルギーと総噴出質量を仮定して、減光する割合を求めることができる。簡単なフィッティングを行うと、 $E_K = 1.9 \times 10^{51}$ erg, $M_{ej} = 2.4$ 太陽質量という結果が得られた。これは極大光度から得られたニッケル56の質量2.0太陽質量と矛盾がなく、かつ膨張速度から見積もられる運動エネルギーとも誤差の範囲内で一致していた。何よりその光度変化を再現することができたので通常のIa型超新星と同じ放射機構で説明することができることがわかった。

では、後期に減光した原因は何だろうか？ われわれはいくつかの可能性を検討したが、超新星自身によって生成されたダストが減光を担った正体ではないかと考えている。いくつかの重力崩壊型超新星爆発では、可視光での急減光とともに赤外での再増光が確認されている²⁵⁾。これは可視光で厚いダストの生成に伴う現象であることが議論されている。このようなダストは近赤外より長波長で放射ピークとなるような低温の黒体放射をする。SN 2009dcでも1年後の色は他のIa型超新星に比べ急激に赤くなっていることがわかった。これはダストによる放射が寄与している可能性を示唆している。さらに初期のスペクトルに見られた炭素の吸収線は噴出物質中に豊富な炭素が存在することを意味し、ダストの材料になった可能性がある。このように、直接証拠はないもののいくつかの状況証拠がダスト生成に一致する。

すばるではスペクトルも得ることができた。そこにはほかのIa型超新星に比べて細い鉄とニッケルのラインが見られた。これは初期の遅い膨張速度と一致する。さらにもう一つカルシウムと見られるラインも検出された。もしこのラインがカルシウムだとすると、鉄やニッケルより幅が狭いことからより内側に分布している可能性が高い。これはカルシウムがニッケルや鉄より内側への混合を起こしている可能性を示唆する。このような観測事実は典型的なIa型超新星には見られない特異な特徴である²⁶⁾。

7. 親星と爆発モデル、そして今後の展望

われわれは、1年間を通じた観測でSN 2009dcがスーパーチャンドラセカール超新星であることを示し、その観測的特徴を明らかにした。では、このような特異な超新星の親星はどのような形態であろうか？ Ia型超新星は伴星からの質量降着により白色矮星の質量が増す「単縮退説」と二つの白色矮星の合体によりチャンドラセカール限界

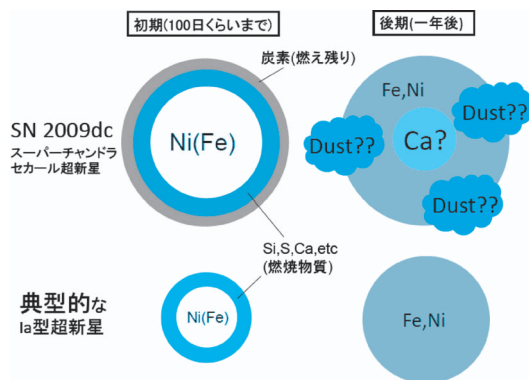


図4 SN 2009dc の膨張大気構造と典型的な Ia 型超新星との比較。それぞれの半径の大きさは噴出物質の質量の違いを反映している。SN 2009dc はその外層に豊富な炭素を含み、ニッケル 56 を非常に多く生成した。さらに後期の予想外の減光はダストが原因と考えられる。後期スペクトルからカルシウムがニッケルや鉄より内側に分布している可能性が示唆される。

質量を超える「双縮退説」の二つの説で論争が今日まで続いていることはすでにイントロダクションにおいて述べた。「単縮退説」では、回転のない白色矮星のチャンドラセカール限界質量が 1.4 太陽質量だが、高速回転しているならばより大きな質量の白色矮星が存在できる²⁷⁾。Pfannes らは高速回転した白色矮星の密度プロファイルなどを仮定して爆発の流体計算をシミュレーションしている²⁸⁾。それによると 2.1 太陽質量の白色矮星を仮定したときに 1.5 太陽質量のニッケル 56 を生成することが可能であるという示唆が得られている。これはわれわれの観測の赤化を補正していない場合によく一致している。少なくとも典型的な Ia 型超新星では算出されえない値である。一方で、二つの白色矮星の合体を実現することは実は連星系の進化のうえではたいへん難しい²⁹⁾。最近の研究では同程度の質量 (0.9 太陽質量) の白色矮星二つが合体したことを仮定して、合体直後から熱核燃焼のシミュレーションが計算されている³⁰⁾。これによると、ニッケル 56 は 0.1 太陽質量程度しか生成されず、むしろ暗いクラスの Ia 型

超新星に対応する。これらのことから現状で議論されているモデルではわれわれの観測結果は「単縮退説」を支持する。しかしながら、スーパーチャンドラセカール超新星の理論的研究はまだ発展途上である。われわれが今回の観測で得た極端な物理量を説明するためには爆発メカニズムや親星の進化の研究など理論的側面の進展が必要であろう。

一方で、観測から求められる情報としては、(1) 後期のダスト形成の兆候、(2) 親星の周辺環境についての情報、などが挙げられる。(1) については SN 2009dc のような明るい (近傍銀河の) スーパーチャンドラセカール超新星が現れたときにこのようなチャンスが訪れるだろう。すばる望遠鏡のような大口径望遠鏡を用いた爆発 1 年後における近赤外での観測がそれを実現する。すでに述べたとおり、ダストによる低温放射の寄与を検出できるかもしれない。今回はそもそもダストによる放射の可能性は超新星発見時には検討されず近赤外での観測は行われなかったが、次の機会には必ずチャレンジすべき観測である。(2) については、すでにスーパーチャンドラセカール超新星の出現した銀河の分光観測によって実現できる。これは、われわれの SN 2009dc の観測論文が公表された後に、アメリカのグループによって出された同天体の観測論文で一部が議論されている³¹⁾。SN 2009dc の位置から 45 kpc ほど離れた銀河のスペクトルが得られている。彼らのスペクトルではバルマー系列の弱い吸収線を示し、少なくとも輝線は認められなかった。現在、星生成を活発に行っているような銀河ではないことを意味する。しかしながら、SN 2009dc のごく近傍の環境についてはその情報がまだ得られておらず、より本質的な情報を得るためにはさらなる観測が求められる。これら (1) や (2) の観測は 8 m クラスの望遠鏡を用いれば十分可能である。今後スーパーチャンドラセカール超新星が出現した場合には焦点となることが予想される。そのときには世界中で 1 m ク

ラスから 8 m クラスまでの多くの望遠鏡が向けられ、再び激しい競争が繰り広げられることになるだろう。

謝 辞

本稿は、私が広島大学で執筆しました博士論文の内容を基にしたものです。博士課程における研究を丁寧に指導して下さった川端弘治氏に深く感謝いたします。共同研究者である東京大学の田中雅臣氏、前田啓一氏、ぐんま天文台の衣笠健三氏、国立天文台の今田 明氏、その他研究内容を指導して下さり、観測を協力して下さったすべての方にも感謝いたします。また、本稿の執筆を助めて下さった青山学院大の山崎 了氏に御礼申し上げます。筆者は特別研究員として日本学術振興会より支援を受けております。

参 考 文 献

- 1) Perlmutter S., et al., 1999, ApJ 517, 565
- 2) Riess A. G., et al., 1998, AJ 116, 1009
- 3) Hillebrandt W., Niemeyer J. C. 2000, ARA&A 38, 191
- 4) Hachinger S., et al., 2006, MNRAS 370, 299
- 5) Benetti S., et al., 2005, ApJ 623, L1011
- 6) Maeda K., et al., 2010c, Nature 466, 82
- 7) Whelan J., Iben Jr., I., 1973, ApJ 186, 1007
- 8) Webbink R. F., 1984, ApJ 277, 355
- 9) Iben Jr., I., Tutukov A. V., 1984, ApJS 54, 335
- 10) Kasen D., Röpke F. K., Woosley S. E., 2009, Nature 460, 869
- 11) Mazzali P. A., et al., 2007, Science 315, 825
- 12) Nomoto K., Thielemann F., Yokoi K., 1984, ApJ 286, 644
- 13) Khokhlov A. M., 1991, A&A 245, 114
- 14) Benetti S., et al., 2004, MNRAS 348, 261
- 15) Parrent J. T., et al., 2011, ApJ 732, 30
- 16) Arnett W. D., 1982, ApJ 253, 785
- 17) Howell D. A., et al., 2006, Nature 443, 308
- 18) Filippenko A. V., et al., 1992, ApJ 384, L15
- 19) Hicken M., et al., 2007, ApJ 669, L17
- 20) Hillebrandt W., et al., 2007, A&A 465, 17
- 21) Schlegel D. J., et al., 1998, ApJ 500, 525
- 22) Wang X., et al., 2009, ApJ 697, 380
- 23) Yamanaka M., et al., 2009, ApJ 707, L118
- 24) Tanaka M., et al., 2010, ApJ 714, 1209
- 25) Nozawa T., et al., 2008, ApJ 684, 1343
- 26) Maeda K., et al., 2010, ApJ 708, 1703
- 27) Yoon S., Langer N., 2005, A&A 435, 967
- 28) Pfannes J. M. M., et al., 2010, A&A 509, 75
- 29) Saio H., Nomoto K., 1985, A&A 150, L21
- 30) Pakmor R., et al., 2010, Nature 463, 61
- 31) Silverman J. M., et al., 2011, MNRAS 410, 585

Observational Study of Extremely Luminous Type Ia SN 2009dc

Masayuki YAMANAKA

Space Science Center, Hiroshima University, Kagamiyama 1-3-1 Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: Type Ia supernova (SN) is a “standard candle”, which can be used to estimate distances to high redshift galaxies by its width-luminosity relation of the light curve. It has been widely thought that its true nature is the nuclear runaway explosion of a white dwarf whose mass reaches near the Chandrasekhar-limiting mass. Recently, some extreme cases of Type Ia SN have been discovered. Their observational properties cannot simply be explained by the explosion of a white dwarf within Chandrasekhar-limiting mass. They are called as “super-Chandrasekhar SN”. In this article, I introduce an observational study of the third candidate object of this category, SN 2009dc. Our group performed observations of SN 2009dc with “Kanata”, “Subaru” and other many telescopes in optical and near-infrared wavelengths for more than 1 year. Its nickel mass is estimated to be $2.0 M_{\odot}$ from its peak luminosity. We also found an evidence of massive unburnt material (carbon) in the spectra of this SN. These findings strongly suggest that the progenitor mass is more massive than Chandrasekhar-limiting mass.