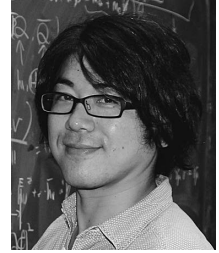


TMTで探るさまざまな爆発現象の起源

前田 啓一

〈京都大学宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉
e-mail: keiichi.maeda@kusastro.kyoto-u.ac.jp



全世界的により深く、より遠く、そしてより短いタイムスケールを狙う時間軸天文学が進展するなか、TMTは究極の追観測望遠鏡となる。その集光力は4-8 m級望遠鏡による突発現象探査計画の分光追観測に不可欠であり、その集光力ゆえに可能な即時分光追観測・高時間分解観測、さらに補償光学による空間高分解面分光など、突発天体現象研究の新たな地平を開くことが、時間軸天文学におけるTMTの使命である。本稿では、近傍の超新星・突発現象の追観測による恒星進化と爆発機構の理解、遠方の超新星・ガンマ線バースト可視対応天体の観測による星生成史や第一世代星の特定といった観点から、TMTに期待される役割をまとめる。

1. 次世代突発天体研究とTMTの役割

米国科学アカデミーの発表したThe Astronomy and Astrophysics Decadal Surveyの2010年版¹⁾においてTime Domain Astronomy(時間軸天文学)がハイライトの一つとして選ばれたのは記憶に新しい。ここ10年ほどの間に突発天体の研究は目覚ましい進歩を遂げており、国内でもその気運が高まっている。すばる望遠鏡のHSC(Hyper Suprime-Cam)を用いた広視野サーベイが開始されたが、TMTの運用の始まる時代には、8 m級望遠鏡による広視野・高時間分解サーベイ観測計画であるLSST(Large Synoptic Survey Telescope)をはじめ、さまざまなサーベイ観測が進んでいると期待される。その中でTMTは究極の追観測望遠鏡と位置づけられる。その大口径による集光力が分光追観測に不可欠であるのは言うに及ばず、その集光力ゆえに可能な即時分光追観測・高時間分解観測、さらに大口径ゆえ可能な補償光学を用いた高空間分解面分光など、突発天体現象研究の新たな地平が開かれるであろう。

本稿では、ISDTs(International Science Devel-

opment Teams: TMTによるサイエンス検討のための国際チーム)²⁾や国内TMTサイエンス検討会³⁾における議論に基づき、主に銀河系外の突発現象についていくつかのトピックを紹介したい。新星・矮新星・パルサー活動など系内やごく近傍の銀河における突発現象、また比較的定常な現象に基づく研究(距離指標、超新星残骸など)も非常に面白いトピックであるが、これらの紹介は別の機会に譲りたい。

2. 未知の爆発現象の発見と解明

天文学の醍醐味は、何と言っても新たな観測機器や観測計画の導入によりそれまで未知の現象を発見したり、あるいは既知のものに対して全く次元の異なる新情報を得たりすることであろう。新しい天体・現象の発見という点では、高時間分解・即時追観測による数日以内の変動現象の探査・研究が挙げられる(図1)。少なくとも系外銀河においては未知の地平線であり、これを切り開くことはTMTに課せられた重大な使命である。また、非常に暗いため(あるいは遠方で発生するため)観測できていないものもあるはずであ

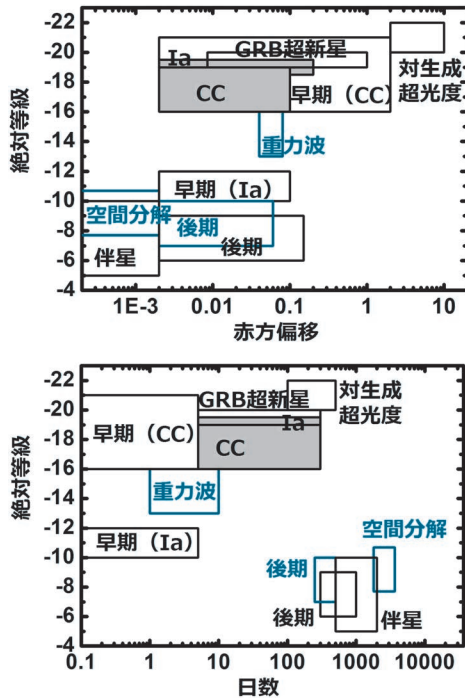


図1 本稿で取り上げる突発現象やそれに関連した現象。主に可視域で狙うものは黒枠、近赤外域は青枠、現在までによく観測されているIa型超新星と重力崩壊型超新星(CC)はグレーで示されている。TMTでの重要な研究対象として、近傍で暗い現象、遠方の現象、短い時間で発生・変動する現象が挙げられる。

り、これもTMTによる重要な研究対象である。

例えば、理論的に予想されるがまだ確固たる対応天体が特定されていないものが挙げられる。最近進展の著しいものとしては重力波の光学対応天体として中性子星連星の合体があるが、これは暗く(200 Mpcで発生した場合に可視域で22-25等、近赤外で21-24等)、かつ数日のタイムスケールであると予測されている⁴⁾。重力波天文学の幕開けを担う重要な観測対象である。遠方天体では、第一世代星の起こす超新星爆発が挙げられる。代表的な候補として、太陽質量の150-250倍程度の超大質量星が起こすとされている電子陽電子対生成型超新星がある(赤方偏移 $z \sim 3$ でRバンド等級26等程度、Kバンド等級22等程度)⁵⁾。

ほかにも恒星進化論から予想されるが観測的確証の得られていない現象は数多く存在する。

一方、観測的な観点からは理論家の予想を超えた現象こそを発見したいであろう。近年のサーベイ・追観測の進展により、よりタイムスケールの短い現象・暗い現象の発見が相次いでいるが、これらの多くの正体は未解明である。例えば、筆者らが2010年に報告した「カルシウム・リッチ」超新星⁶⁾はいまだにその正体が解明されていないが、ここ5年の間に新たな超新星のタイプとして認識されその研究が活発に行われている。次世代サーベイとTMTによる追観測は、さらなる謎を伴った短時間・低光度現象を発見するであろう。新現象を発見しさらにその正体を突き止めること、これがTMTに課せられた第一の使命である。

3. 近傍超新星と親星進化・爆発機構

超新星をはじめとする突発現象の観測研究は、近傍現象の詳細な観測を通しその起源に迫るもの、遠方の現象を捉えて銀河・宇宙の進化に応用するものの二つに大別される。と言っても実際には完全に区別はできず、お互い相補的な位置づけにある。本稿では5-7章で高赤方偏移天体について紹介するが、まず3・4章で近傍天体の観測について述べる。

超早期分光追観測

時間軸天文学の観点から、超早期分光および後期分光追観測の重要性を強調したい。近年では爆発後1週間以内における早期分光観測が可能になってきた。これは爆発前の星(親星)の最外層の情報を明らかにするのに有力である。未解明の恒星終末期進化の理解の鍵として、早期追観測の成果が連日プレプリントサーバ(新着論文をまとめたウェブサイト)をにぎわしている。

Ia型超新星は白色矮星の核暴走爆発であると考えられ、特に最外層の「燃え残り」の炭素の量は親星進化や爆発機構に大きく依存すると考えられている。例えば、Ia型超新星に至る進化経路とし

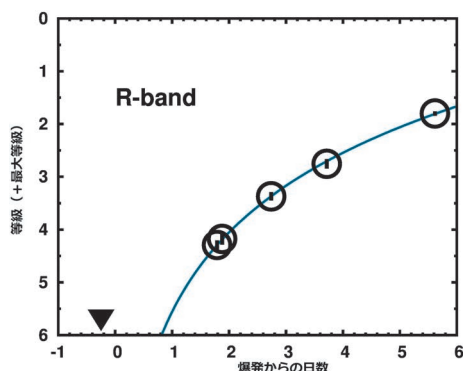


図2 Ia型超新星の早期撮像追観測の例(超新星SN 2012ht)¹³⁾。山中雅之氏を中心に行われた観測である。さらに早い段階から、しかも分光追観測することで、Ia型超新星の親星や伴星を明らかにすることができる。

て主系列・巨星伴星からの降着⁷⁾ および二つの白色矮星の合体⁸⁾ が考えられているが、これら二つのシナリオで最外層の炭素含有量に大きな違いが出るのは容易に予想される。近年の早期分光観測により、最外層の炭素の存在が極めて一般的であることが指摘されている⁹⁾。また、スペクトルに見られるシリコン・カルシウムなどの吸収線速度も初期に激しい進化を示すことが知られている。早期には非常に高速の成分が見られるが、その起源は依然として謎に包まれている^{10), 11)}。

早期追観測のもう一つの可能性として、爆発する白色矮星に「伴星はいるのか」という過去数十年にわたる論争に決着がつくことを大いに期待したい。連星系で超新星爆発が起きた場合、超新星放出物質と伴星との衝突の痕跡が観測できる可能性が提案されている。衝突で発生した熱エネルギーは数日のタイムスケールで紫外線を中心に放出されると予想され¹²⁾、これを超早期観測で捉えようという試みである。現在では撮像観測による早期追観測がなされている¹³⁾(図2)。理論予測の不定性を考えると、これを探索するうえで分光観測は不可欠だと思われる。

重力崩壊型超新星においても、即時・早期追観測が世界中で行われるようになってきた。重力崩

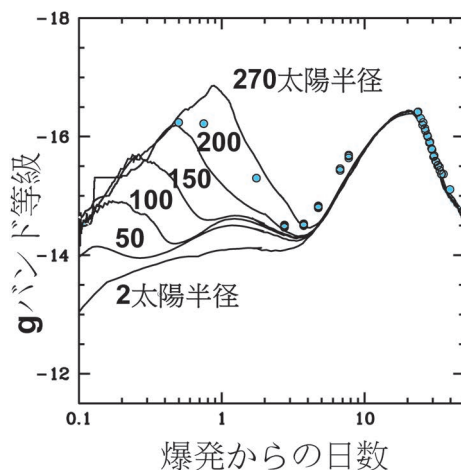


図3 IIb型(重力崩壊型)超新星SN 2011dhの早期撮像追観測と異なる半径の親星に基づく光度曲線モデル¹⁵⁾。このような爆発直後の現象を初期から分光追観測することで、超新星親星の理解が大きく進展する。

壊型超新星においては爆発前の親星の種類(巨星、ウォルフライエ星など)を明らかにすること、および親星と超新星の性質の関係を解明することは重要課題の一つである。この親星の違いに非常に敏感な現象として、重力崩壊を起こした大質量星の内部で発生した衝撃波が星外層を突き破るときに生じる高エネルギー放射である「ショックブレイクアウト」とそれに引き続き起こるより低エネルギーで数日程度持続する放射が注目されている^{14), 15)}。その放射エネルギーの大半は紫外線・X線で放出されるため、実は可視域ではそこまで明るい現象ではない。上記Ia型超新星の例と合わせても現在まで爆発後1日以内にまともなスペクトルが得られた例は数えるほどしかない。特に、親星がコンパクトであればあるほど(例えばウォルフライエ星)早期放射は暗くなると予想されており¹⁵⁾(図3)、爆発する親星の性質を系統的に理解したければこれら早期に暗いものまでターゲットとして超早期分光追観測を実現しなければならない。

TMTを用いた場合、より遠方の超新星をター

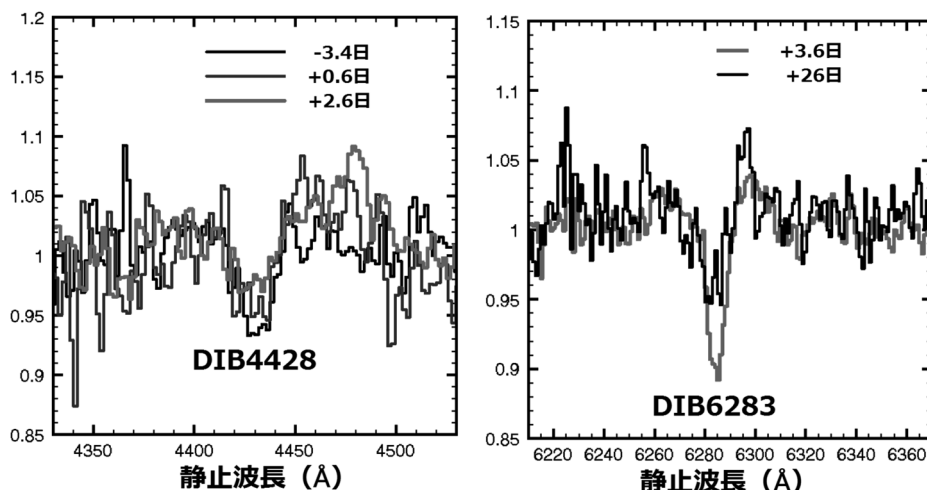


図4 Ic型超新星2012apで検出された強いDIB (Diffuse Interstellar Band)¹⁸⁾。DIB吸収線を作る分子は特定されておらず、その理解は星間化学や星形成領域の物理の理解に大きなインパクトをもたらす。超新星2012apではDIBの時間変動が初めて検出され、DIB吸収線を作る未解明の分子のうち、大質量星形成領域に存在する種族があることが示唆された。TMTによる高時間分解・高波長分解観測により、超新星発生領域の星間ガスや親星からの恒星風により作られる星周物質の理解が大きく進展する。

ゲットに含めることができるため、早期分光が可能な超新星の数は飛躍的に増加する。例えば、実際に観測された例としてIIB型超新星SN 2011dhの早期放射のgバンド絶対等級は-16等程度、8m級望遠鏡で $z \sim 0.1$ 程度が限界であるのに対し、TMTでは $z \sim 0.5$ 程度までが分光ターゲットとなりうる。これは、遠方の超新星の種族が近傍のものとは異なるかというテストとしても重要であり、この点では特にIa型超新星を用いた宇宙論へのインパクトは大きい。上で述べたように、これら超早期放射は可視域では暗いと予測される場合が多い。TMTの集光力は超早期追観測による本当の意味でのサイエンスの幕開けに不可欠である。

高時間分解・高分散観測

また、TMTの集光力を用いれば、超早期の高時間分解・高分散分光すら可能である。単純に集光力だけ考えると、ごく近傍の(年間数個程度の)Ia型超新星爆発後1日の時点での低・中分散分光は8m級望遠鏡の範疇である(さらに早期を目指すにはTMTが必要)。例えば、おとめ座銀

河団でIa型超新星が発生した場合の1日の時点での等級は20等程度であるが、TMTではこれを高分散モードでやっってしまうというわけである。高分散分光により星周物質・星間物質で生じる輝線・吸収線を捉えることができる。星周・星間吸収線の時間変動の探査は超新星研究でのホットなトピックであるが、8m級望遠鏡を用いても最大光度時の観測に限られてしまう^{16), 17)}。Ia型超新星においては連星進化経路から予測される濃い星周物質の存在を捉える試みが行われており、また重力崩壊型超新星においても大質量星の周辺環境を捉える手段として注目を浴びている¹⁸⁾(図4)。より激しい変動の期待される超早期でこのような現象を観測することで、爆発する親星のごく近傍の環境を捉える、これはTMTで初めて可能になる重要なサイエンスの一つである。

後期分光追観測

全く逆方向のアプローチとしては、後期分光観測が挙げられる。Ia型超新星の伴星の有無に関しては、水素に富む伴星大気が超新星放出物質に巻き込まれた場合、十分時間が経って系が光学

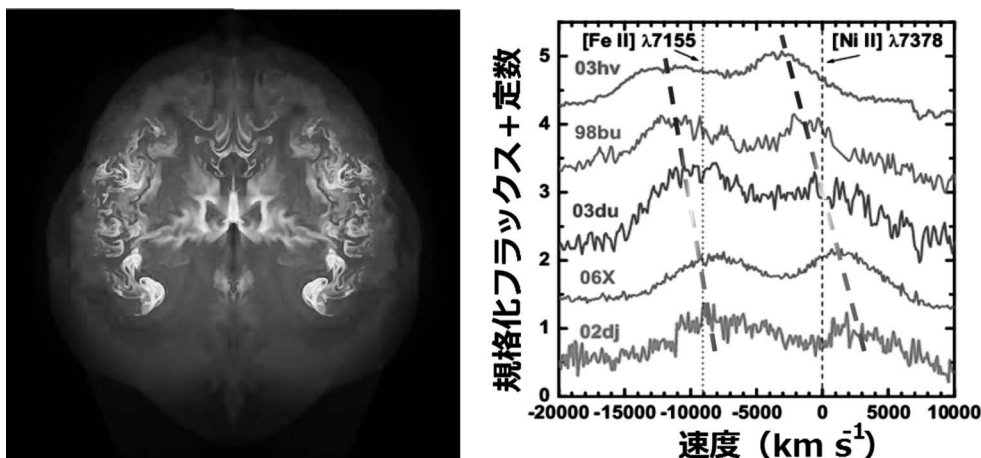


図5 (左) Ia型超新星の爆発シミュレーションの例。(右) 五つのIa型超新星の後期スペクトル。波長はニッケル輝線の静止波長から測った速度で表してある。波長のずれは上のモデルのような爆発をさまざまな方向から見た場合のドップラーシフトとして説明できる¹⁰⁾。TMTではこれまで未開拓のパラメータスペースである、さらに後期の分光や近赤外域での分光を行うことができ、親星や爆発機構に迫ることができる。

的に薄くなると水素輝線として観測できるであろう¹⁹⁾。非常に良い精度のスペクトルが必要とされ、まだこのようなテストのなされた例は少ない。H α の探査が行われてきたが、最近ではP β 探査の優位性も提案されており、可視のみならず近赤外でも同様の試験が待ち望まれる²⁰⁾。

また、後期分光は爆発時に生成される元素やその分布を知ることができるため、爆発機構の有効な検証方法とされている。すばる望遠鏡などを用いた観測により、Ia型・重力崩壊型超新星ともに単純な球対称ではない複雑な構造をもつことが示唆されている^{10), 21)} (図5)。現在まで8 m級望遠鏡により、可視域で1年ほど経過した後の可視分光がなされる一方、それよりさらに時間の経過した時期や近赤外での分光例は非常に限られている。その集光力および特に近赤外域での補償光学による感度向上により、TMTは後期分光で力を発揮するであろう。近赤外域においては可視で得られている結果の独立な検証に加え、イオン特定が容易であること、励起温度の低い輝線により熱的状况に依存しない解析ができること、分子・ダスト形成に制限をつけられること、星周・星間ダ

ストによるエコーを用いた環境診断が可能であること、など多くの独自性がある。

数年スケールでの可視域分光追観測も8 m級望遠鏡ではこれまでほとんど行われていない分野である。最初の1年は⁵⁶Co崩壊からのガンマ線が可視光度への主要なインプットであるが、時間の経過とともに半減期の長い不安定核も光度に寄与することになり、これは爆発機構の判別に有力である²²⁾。近赤外と同様に周辺環境で散乱あるいは吸収・再放射された光(エコー)の探査も可能であるが、より遅い時期を見ることでより大きな空間スケールでの星周・星間物質の情報を得ることが可能である。異なる視線方向に放出された光を見ることができるため、放出物質の三次元構造、ひいては爆発機構に制限を与えることもできる²³⁾。同様な手法は系内超新星残骸でも用いられているが^{24), 25)}、これも25等かそれよりも暗いエコーを捉えるということでTMTが活躍する研究対象である。

空間分解観測

後期観測という点では、爆発後10年スケールで時間が経過した近傍超新星の空間分解追観測も

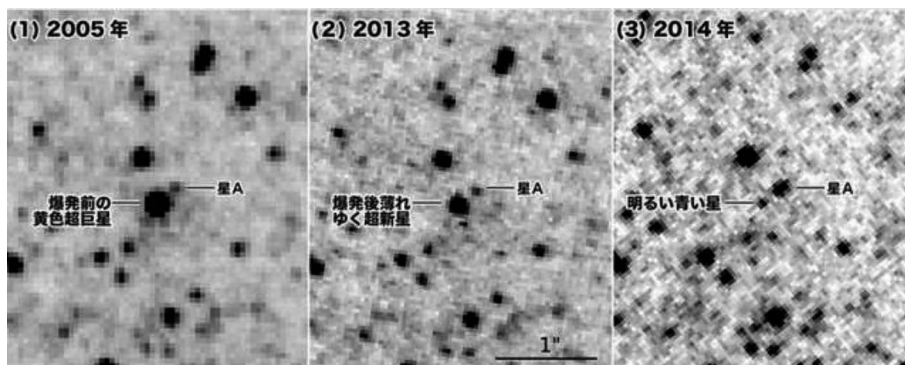


図6 SN Iib2011dhの爆発前(左), 爆発後2年後(中), 3年後(右)のハッブル宇宙望遠鏡画像²⁸⁾. (1) 黄色巨星が検出された. (2) 超新星が時間とともに暗くなり, 爆発前画像の黄色巨星より暗くなった, すなわち黄色巨星が親星であったことが判明した. (3) 超新星がさらに暗くなり, 親星と連星をなしていたと考えられる青い星が発見された(Nasa/Kavli IPMU/G. Folatteli). このような伴星候補は今後さらに発見されることが期待され, TMTによる分光観測はその確定や性質の特定のカギになる.

挑戦的であるがぜひ行いたい課題である. 超新星は時間とともに膨張するため, 0.02秒角の分解能を実現できれば, 少なくとも10例程度の(過去に発見された数Mpc以内で発生した)超新星の空間分解, 特に面分光観測が視野に入ってくる. これにより, 超新星放出物質の直接三次元分解ができれば, 爆発機構の直接的な検証として非常にインパクトの大きい成果になるだろう.

4. 親星と連星伴星

親星進化の観点からは「直接観測」のもたらずインパクトに並ぶものはない. ごく近傍の超新星に対して, 爆発前の高空間分解画像(主にハッブル望遠鏡)を用いた親星探査が行われるようになって久しい²⁶⁾. 特にIip型(赤色巨星の爆発)およびIib型超新星(水素外層の大部分が剥げた親星)で親星候補の巨星が検出され, そのうち一部については爆発後にその親星候補が実際に消失したことが確認されている. 最近の大きな進展として, Iib型超新星の親星(候補)が発見され, それまで赤色巨星からウォルフライエ星に至る進化の過程にあると考えられていた黄色巨星が超新星親星になりうることを示されたことは大きな衝

撃をもたらした²⁷⁾(図6).

上述のIib型超新星の黄色巨星親星の発見に伴い, 親星「系」の直接観測は新たな局面を迎えつつある. もともとIib型(およびIb/Ic型)超新星親星への進化としては大質量単独星と連星進化の二つが考えられてきたが, 黄色巨星親星の発見は連星進化が重要であることを示唆する. M51で発生したSN Iib 2011dhはそのような黄色巨星親星の最初の報告例であるが, この超新星が十分暗くなった2014年8月, 超新星の位置に紫外線で明るい点源が発見された²⁸⁾(図6). この点源の紫外等級やカラーは連星進化モデルの予測する伴星とだいたい一致し, 有力な伴星候補であると考えられる. 今後直接撮像による伴星探査は重要な分野となるはずである.

伴星の最終的な確定は, 直接分光を待たねばならない. これはTMTにおける非常に重要なサイエンストピックである. SN 2011dhの場合, 伴星候補はUバンドで25等級程度. そのUバンドにおける中分散分光はTMTでも困難であろうが, Uバンド低分散分光, 可視域での中分散分光などTMTにおける分光追観測による伴星の確定およびその性質の研究は, 超新星爆発に至る連星進化

の問題に挑戦するうえで大きな可能性を秘める。

5. Ia型超新星と次世代宇宙論

Ia型超新星を標準光源として用いた宇宙加速膨張の発見は大きなインパクトをもたらした。観測的宇宙論の次の大きな課題は「暗黒エネルギー」の正体をつかむこと、さらに言えばその状態方程式における「 w パラメーター」（およびその時間進化）を突き止めることである²⁹⁾。

近年、宇宙論で使用される「普通の」Ia型超新星にも無視できない多様性があり、Ia型超新星には複数の種族がある可能性が指摘されている。これらは異なる進化過程を経て爆発に至ったものか、もしくは、その性質が赤方偏移に伴い進化するのかどうかはまだ明らかにされていない。例えば、近傍のIa型超新星と赤方偏移0.5程度のIa型超新星の平均的な振る舞いにおいて、紫外域で有意なスペクトルの違いが見られると報告されている³⁰⁾。近傍超新星を見ても、可視域スペクトルがほぼ同じであるのに紫外域で大きな違いが見られる例が報告されており³¹⁾、これはIa型超新星に二つの種族がありその発生率が赤方偏移進化することを意味するのかもしれない。同様の話で、金属吸収線の速度の速いもの、遅いものなどがあり、可視域での色指数が異なること（したがって星間吸収量の見積りに統計誤差が入る可能性）が指摘されており、これらが環境依存するか、赤方偏移依存性があるかなどはIa型超新星の光度距離測定の実験誤差を明らかにするうえでも、親星進化や爆発機構の観点からも明らかにされねばならない問いである^{10), 32), 33)}。

現在、高赤方偏移の分光データは主に超新星タイプの確認のために用いられる低分散で精度の低いものであり、その分光的性質を近傍超新星と詳細に比較できるレベルにない。赤方偏移1程度のIa型超新星について、可視および近赤外で質の高い中分散分光データをとることで、直接に近傍と高赤方偏移での観測的特徴の相違点を明らかにす

ること、また種族として進化があるかを統計的に明らかにすることはIa型超新星を用いた宇宙論次世代研究に必須である。また、さらに高赤方偏移（例えば赤方偏移 $z \sim 2$ ）のIa型超新星に対して分光分類することは、Ia型超新星頻度、ひいては親星進化過程を理解するうえで重要である。

TMTが動き出す2020年代には、LSSTやユークリッド宇宙望遠鏡により大量の高赤方偏移超新星が発見され、その分光追観測はTMTの独壇場であろう。また、サーベイに重力レンズを組み合わせてさらに高赤方偏移の超新星を捉える試みも続くであろう^{34), 35)}。複数のレンズ像の時間進化追観測によるハッブル定数決定などは集光力と空間分解能を併せ持ったTMTの出番である。

6. 重力崩壊型超新星と星生成史

重力崩壊型超新星はIa型超新星に比べ実に多様な性質を示す。基本分類だけでもIIp, III, IIIn, IIb, Ib, Ic型などがあり、近年ではさらに細かい分類もなされ、さまざまな特異な超新星が報告されている。これは、爆発する星の質量や連星進化などの多様性に起因すると考えられるが、この関係を明らかにすることは重力崩壊型超新星の研究の一つの大きな目標である。

重力崩壊型超新星の頻度から星形成率を見積ることができる³⁶⁾。高赤方偏移超新星探査は宇宙初期の星形成史の探求につながるものであり、今後大きく発展していく分野であろう。特に、後述の超光度超新星やガンマ線バーストなどは低質量矮小銀河で数多く発見されており、大光度・大質量銀河を用いた星生成史の探求と相補的に進めるべき課題である。この点で近年注目を集めているのはIIIn型超新星である。IIIn型超新星はその光度のばらつきなどかなり多様であり、Ia型超新星より明るいものも存在する³⁷⁾。一般に紫外域で明るい現象であり、赤方偏移に伴う観測波長のずれのおかげで高赤方偏移での発見に適する。4-8 m級望遠鏡によるサーベイで $z \sim 2$ 程度のも

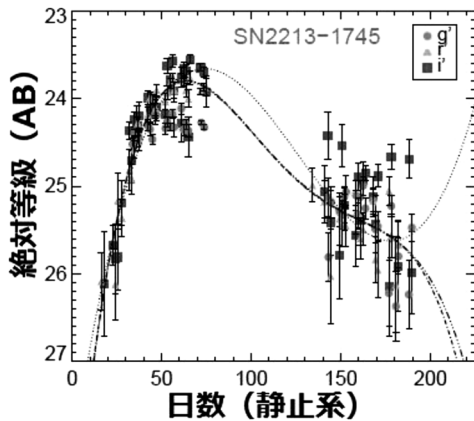


図7 赤方偏移 $z=2.05$ で報告された超光度超新星候補 (文献38より転載). CFHT望遠鏡のLegacy Deepデータを観測後にスタックして(重ね合わせて)発見したものであり, リアルタイムでの分光追観測は行われていない. LSSTやすばるHyper Suprime-Cam (HSC) などにより, リアルタイムでの発見が可能になり, さらにTMTによりリアルタイムでの分光が可能になる. 超新星がわれわれの知る最も遠方天体になる日がくるかもしれない.

のが多数見つかるであろう. より正体が謎に包まれる超光度超新星と呼ばれるクラスはさらに1-2等明るく, さらに遠方, $z\sim 5$ 程度まで8 m級望遠鏡サーベイで見つかる期待される^{38), 39)} (図7). これらの分光追観測はTMTの独壇場となるであろう.

もう一つの高赤方偏移探査の可能性としてはIIP型超新星のショックブレイクアウトが挙げられる¹⁴⁾ (図8). 高赤方偏移を目指すことで, 可視で捉えるには「青すぎる」という特徴を逆手に取ることができる. 8 m級望遠鏡サーベイにより赤方偏移1を超える現象の検出が見込まれている. その即時分光観測は, 親星最外層部や星周物質最内縁部の情報をもたらし, いまだ謎に包まれた爆発直前の恒星進化の問題に光を与えるであろう. 1年スケールでの通常の超新星放射の解析からも爆発や親星の情報を得ることができ, これらを組み合わせてIIP型超新星の深い理解が期待される. これは, 初期質量関数を探るという意味

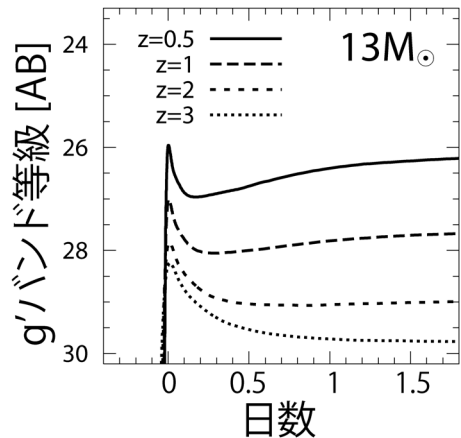


図8 IIP型超新星のショックブレイクアウトの計算例 (富永望氏による計算, 同氏より図を提供していただいた¹⁴⁾. 宇宙初期の星形成史を理解するうえで重要なターゲットになりうる. TMTによる分光が待ち望まれる.

で, 星形成史の探求とも相補的である.

近傍にもまだ面白い未解決問題が数多く存在する. たとえば, ダストで覆われた活発な星形成銀河における星形成史および恒星進化は明らかにされるべき問題である. 8 m級望遠鏡で補償光学を用いた近赤外サーベイにより超新星候補天体が報告されているが⁴⁰⁾, その分光追観測はいまのところ事実上不可能である. このような星形成領域における超新星の分光追観測はTMTをもって初めて可能となる. そもそもこのような環境で発生する超新星のまともな追観測ができていないことを考えると, 環境と恒星進化および超新星の性質に関して多くの新しい知見が得られるであろう.

7. ガンマ線バースト, 超大質量星

ガンマ線バーストの正体が天体物理学上の大きな未解明問題の一つとされて久しい. 持続時間が数秒を超えガンマ線放射が比較的軟らかいロングガンマ線バースト (以下GRB) に関してはここ15年ほどでその大質量星崩壊説がほぼ確定したが, 依然としてどのような星がどのようにして爆

発するかは未解明である。GRBを用いた高赤方偏移探査（星形成率など⁴¹⁾のためには、まずこれらのことを明らかにする必要がある。逆に、これらのことが理解された暁には、遠方超新星と合わせて初期質量関数の赤方偏移進化などの研究が可能になるかもしれない。

GRBの大質量星崩壊説への最大の支持はGRBに伴い超新星が観測されていることからきている^{42), 43)}。ただし、8 m級望遠鏡を用いてもまともに超新星の検出ができるのは $z \sim 0.2$ 程度の距離が限界である。このような近傍のGRBが遠方($z > 1$)のGRBと同じ種族であるかは自明ではない。実際、GRB（ロングガンマ線バースト）には2種族あり、近傍で見ついているものの大半は遠方のGRBとは異なる種族なのではないかという話もある⁴⁴⁾。TMTでは、近赤外域での補償光学と組み合わせて、 $z \sim 1$ 程度のGRBに対して十分深い分光でGRBに付随する超新星の有無、およびその性質の議論ができるはずである（文献3の詳細な議論を参照されたい）。超新星の観測から、親星質量などにも制限をつけることができ、これは上で述べた初期質量関数の進化の研究などの下準備として欠かせないものである。

宇宙の第一世代星はどのような質量であったか、この天文学上の大問題に関連して、超新星の分野でもいくつかの可能性が考えられてきた。特に、太陽質量の150–250倍程度の超大質量星は電子陽電子対生成型超新星と呼ばれる核暴走爆発を起こすとされており、それに対応する超新星を特定できればそのような大質量星の存在を示すものである。これまで、数個の候補突発天体が提案されているが^{45), 46)}、確定というには程遠い。また、低金属星のなかに対生成型超新星の痕跡を示す候補が見つかったことは記憶に新しい⁴⁷⁾。宇宙初期では低金属のために質量放出が抑えられることもあり、高赤方偏移ではその頻度は大きくなるかもしれない。別の可能性として、第一世代星はさらに重い星かもしれず、そのような大質量星が超新

星を起こす可能性も提案されている⁴⁸⁾。TMTを用いてこれらの遠方・超大質量星の起こす超新星爆発を特定することで、第一世代星の性質が解明されることを期待している。

8. まとめに代えて

すばるHSCやLSSTなどによる2020年代の大規模サーベイ時代にTMTは究極の追観測リソースである。本稿で紹介したように、さまざまな「現在の」未解明問題の解決の決め手となるであろう。同時に、TMTが発見するであろうさまざまな新天体・新現象により、さらに多くの「将来の」未解明問題が提供されるであろう。

TMTは巨大な国際計画であり、その中で望遠鏡時間を獲得しフロンティアを切り開いていくためには十分な準備が必要である。そのためには既定路線を踏襲するだけではなく、新しいアイデアを常に出し続けることが重要であるというのが個人的な考えである。実際、本稿で触れた内容の多くは過去5年程度の間の進展を反映しており、5年後に書いたなら全く違うものになるであろう。本稿で全く触れていないこと、ISDTsやサイエンス検討班で議論にすら上らなかったことがTMTでのキラサイエンスになりうることは十分ありうるし、実際そうなることを期待している。

謝辞

本稿は、TMT ISDTs・時間軸天文学班やTMTサイエンス検討会恒星物理班の方々との議論をもとにしています。ISDTs時間軸天文学班国内メンバーである田中雅臣氏、富永望氏、およびTMTサイエンス検討会恒星物理班長の青木和光氏と班員の方々に感謝いたします。また、田中氏とともにISDTs時間軸天文学班のとりまとめを行っているG. C. Anupama氏に感謝いたします。また、TMTにおける超新星・突発現象サイエンスの検討には、多くの方との共同研究がもたっています。上記の方々のほかに、特に理論研究で野本

憲一氏, 守屋堯氏, 国内の超新星追観測で中心となり活躍されている川端弘治氏, 山中雅之氏の名前を挙げさせていただきます。紙面の都合上名前を挙げられないすべての共同研究者の方に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) National Research Council, 2010, *New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics*, The National Academies Press
- 2) <http://www.tmt.org/about-tmt/international-science-development-teams/time-domain-science>
- 3) TMTサイエンス検討会, 2011, TMTで切り拓く新しい天文学
- 4) Tanaka M., Hotokezaka K., 2013, *ApJ* 775, 113
- 5) Kasen D., et al., 2011, *ApJ* 734, 102
- 6) Kawabata K., et al., 2010, *Nature* 465, 326
- 7) Nomoto K., 1982, *ApJ* 253, 798
- 8) Iben I., Jr., Tutukov A. V., 1984, *ApJ* 284, 719
- 9) Folatelli G., et al., 2012, *ApJ* 745, 74
- 10) Maeda K., et al., 2010, *Nature* 466, 82
- 11) Childress M., et al., 2014, *MNRAS* 437, 338
- 12) Kasen D., 2010, *ApJ* 708, 1025
- 13) Yamanaka M., et al., 2014, *ApJ* 382, L35
- 14) Tominaga N., et al., 2011, *ApJS* 193, 20
- 15) Bersten M. C., et al., 2012, *ApJ* 757, 31
- 16) Patat F., et al., 2007, *Science* 317, 924
- 17) Dilday B., et al., 2012, *Science* 337, 942
- 18) Milisavljevic D., et al., 2014, *ApJ* 782, L5
- 19) Mattila S., et al., 2005, *A&A* 443, 649
- 20) Maeda K., et al., 2014, *ApJ* 794, 37
- 21) Maeda K., et al., 2008, *Science* 319, 1220
- 22) Seitzzahl I. R., et al., 2014, *ApJ* 792, 10
- 23) Sinnott B., et al., 2013, *ApJ* 767, 45
- 24) Rest A., et al., 2011, *ApJ* 732, 3
- 25) Krause O., et al., 2008, *Nature* 456, 617
- 26) Smartt S. J., 2009, *ARAA* 47, 63
- 27) Van Dyk S. D., et al., 2013, *ApJ* 772, L32
- 28) Folatelli G., et al., 2014, *ApJ* 793, L22
- 29) Suzuki N., et al., 2012, *ApJ* 746, 85
- 30) Cooke J., et al., 2011, *ApJ* 727, 35
- 31) Foley R., Kirshner R. P., 2013, *ApJ* 769, 1
- 32) Maeda K., et al., 2011, *MNRAS* 413, 3075
- 33) Wang X., et al., 2013, *Science* 340, 170
- 34) Patel B., et al., 2014, *ApJ* 786, 9
- 35) Quimby R. M., et al., 2014, *Science* 344, 396
- 36) Horiuchi S., et al., 2011, *ApJ* 738, 154
- 37) Moriya T., Maeda K., 2014, *ApJ* 790, L16
- 38) Cooke J., et al., 2012, *Nature* 491, 228
- 39) Tanaka M., 2012, *MNRAS* 422, 2675
- 40) Mattila S., et al., 2012, *ApJ* 756, 111
- 41) Yonetoku D., et al., 2004, *ApJ* 609, 935
- 42) Galama T. J., et al., 1998, *Nature* 395, 670
- 43) Pian E., et al., 2006, *Nature* 442, 1011
- 44) Murase K., et al., 2006, *ApJ* 651, L5
- 45) Woosley S. E., Blinnikov S., Heger A., 2007, *Nature* 450, 390
- 46) Gal-Yam. A., et al., 2009, *Nature* 462, 624
- 47) Aoki W., et al., 2014, *Science* 345, 912
- 48) Ohkubo T., et al., 2006, *ApJ* 645, 1352

Transient Science with TMT

Keiichi MAEDA

Department of Astronomy, Kyoto University

Abstract: Time domain astronomy is an inflating field of study where researchers seek for the so-far unexplored regimes in the transient research in depth, distance, and in time scale. TMT will be an ultimate resource of follow-up observations in the time domain astronomy era. Its light-collecting power is essential for spectroscopic follow-up of transients discovered by 4-8 m class telescopes, and its quick, time resolved, and spatially-resolved observation capability will expand the horizon in the transient science. In this review, I will summarize the expected TMT's irreplaceable contributions to the field, through observations of nearby objects and distant ones.