

光赤外線大学間連携による超新星の追観測： 極超新星におけるヘリウムの発見



山中 雅之

〈広島大学宇宙科学センター〉

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

恒星が一生でたどりつく最期は、その初期質量によってほぼ決定づけられる。8-10太陽質量より重い大質量星はその最期に重力崩壊型超新星という華々しい爆発現象を引き起こす。その中でも、爆発の運動エネルギーが平均的なものに比べて、1桁大きい現象が極超新星である。極超新星は宇宙最大の爆発現象ガンマ線バースト（GRB）に付随して発見される場合もあり、宇宙物理学における重要な天体である。非常に重い大質量星に関連する現象であると考えられているが、親星（爆発する元の星）の直接同定はなされていない。SN 2016coiは17-18 Mpc程度の非常に近傍の淡い銀河に出現したGRBに付随していない極超新星である。われわれは、増光期から光赤外線大学間連携を通じて中小口径望遠鏡群によって可視近赤外線観測を実施した。得られた初期スペクトルは他の極超新星と同様に非常に大きな膨張速度を示し、さらに強いヘリウムによる吸収線を示した。これらの結果から、極超新星に至る親星は外層に多様性を示すことが示唆される。

1. 外層剥ぎ取り型超新星

超新星の観測的分類は、依然としてスペクトルに見られる吸収線の違いに基づく。1990年代初頭までは分類の表現に揺らぎは見られるものの、90年代後半以降は大枠として確立したと言える。この時期に出版されたFilippenko¹⁾を参照すれば、現在の超新星爆発に対して用いられる分類と矛盾なく理解できる。

スペクトルに水素が見られればII型、水素の線が見られずヘリウムが見られれば、Ib型、水素もヘリウムも見られなければIc型である。

大質量星は恒星内部の元素合成によって、爆発直前の段階で最内部で鉄が支配的となる。より外側の層にはより軽い元素が分布する。これがいわゆる“タマネギ構造”である。中心部で鉄が支配的となると、重力崩壊を引き起こす。

一方で外層に着目しよう。より重い恒星はより

明るく、自身の表面外層を強い輻射圧（光の圧力）によって吹き飛ばす。例えばII型超新星の外層は豊富な水素を持っているが、Ib型では外層が剥ぎ取れてヘリウム層が剥き出しになっている。

このとき、たいへん興味深いことが起こる。II型超新星の親星は赤色超巨星であり、水素層の半径がとても大きい。一方で、水素あるいはヘリウムが剥ぎ取られているようなIb/c型の親星は非常にコンパクトである。星の明るさは自身の半径の大きさで決まるために、小さな星は暗く検出が難しいのである。実際、II型超新星の親星は多く直接検出されているものの²⁾、一方でIb/c型は1例に限られる³⁾。極超新星では検出例がない。

2. 謎：極超新星の外層組成

さらに本稿で紹介する極超新星（hypernova）に触れる。極超新星の最も際立った特徴は、極め

表1 観測に用いた光赤外線大学間連携に属する望遠鏡群.

大学・天文台	望遠鏡	装置名	観測モード	夜数
北海道大学・名寄市立天文台	1.6 m ピリカ望遠鏡	MSI	撮像 (UBV RI)	21
県立ぐんま天文台	1.5 m 望遠鏡	GLOWS	分光 (R=600)	3
東京大学・木曾観測所	1.05 m シュミット望遠鏡	KWFC	撮像 (BV RI)	6
名古屋大学・南アフリカ天文台	1.4 m IRSF 望遠鏡	SIRIUS	撮像 (JHKs)	1
兵庫県立大学・西はりま天文台	2.0 m なゆた望遠鏡	MALLS	分光 (R=600)	4
兵庫県立大学・西はりま天文台	2.0 m なゆた望遠鏡	NIC	撮像 (JHKs)	4
広島大学・東広島天文台	1.5 m かなた望遠鏡	HOWPOL	分光 (R=400)	14
広島大学・東広島天文台	1.5 m かなた望遠鏡	HOWPOL	撮像 (BV RI)	17
広島大学・東広島天文台	1.5 m かなた望遠鏡	HONIR	撮像 (JHKs)	1
鹿児島大学・入来観測所	1.0 m 望遠鏡	赤外カメラ	撮像 (JHKs)	4
国立天文台・石垣島天文台	1.05 m むりかぶし望遠鏡	MITSuME カメラ	撮像 (g' RI)	28

て幅の広い吸収線を示すことである。あまりに広がった吸収線は非常に浅く、スペクトル全体の連続成分を大きく削るような構造を示す。これは超新星の膨張速度が極めて大きいことを反映している。また、極超新星は水素もヘリウムも見られないIc型のみである。光度進化と膨張速度から見積もられる運動エネルギーは 10^{52} ergと、典型的な超新星に比べて、1桁大きい。噴出物質の総質量は、 $10 M_{\odot}$ 以上のもも存在する。また、極大光度も典型的なものより明るい傾向にある。超新星の光度は、放射性崩壊元素 ^{56}Ni の質量が重要なパラメータとなっており、元素合成に使われるエネルギーが大きいことを意味している。

以上のことから、直観的には極超新星に至る親星の質量はIb/c型に比べてもさらに大きく、さらに外層の水素やヘリウムも完全に剥ぎ取られているような星であると考えられる。先行研究においては、平滑化させた極大付近のIb/c型超新星のスペクトルを極超新星と比較しても、ヘリウムが存在しないことを示唆すると結論づけられている⁴⁾。

果たして、外層にヘリウムが存在するのか否か。それを明らかにするには近傍で増光期に発見される極超新星を即応分光観測することが望まれる。

3. 15年来の近傍距離の極超新星

SN 2016coiは、世界時の2016年5月27.5日に

17 Mpcの近傍銀河UGC 11868の近くでASAS-SNグループによって発見された超新星である⁵⁾。ASAS-SNはアメリカオハイオ大学が率いている国際的な突発現象探索グループであるが、浅く広い領域を高頻度にサーベイしている。これによって、多くの増光間もない突発現象が発見されつつある。このASAS-SNの発見の6日前には17等程度の限界等級が決められている。その後、非常に初期の極超新星に類似していることが報告された⁶⁾。20 Mpc以内で発見された極超新星としては、SN 2002ap^{7),8)}以来の大物である。

超新星爆発は大きな速度で膨張し、時間経過とともに光球面が後退する。そのため、時間とともに内側の構造が見えるようになる。逆に言えば、より初期であるほどより外層に分布する元素を観測することが可能となる。われわれは、このようなことから、極超新星の最外層組成を明らかにすべく、光赤外線大学間連携グループ内で早期からのToO観測を要請した。SN 2016coiの観測に用いた望遠鏡・観測装置は延べ11にものぼる(表1参照)。

ここで光赤外線大学間連携について簡潔に紹介したい。2011年度に発足した中小口径望遠鏡をもつ大学によって結ばれた教育と研究に関する協力事業である。突発現象・変動現象を可視近赤外線波長域においてマルチモード・マルチバンドで同時に観測することが可能となり、国際的な競

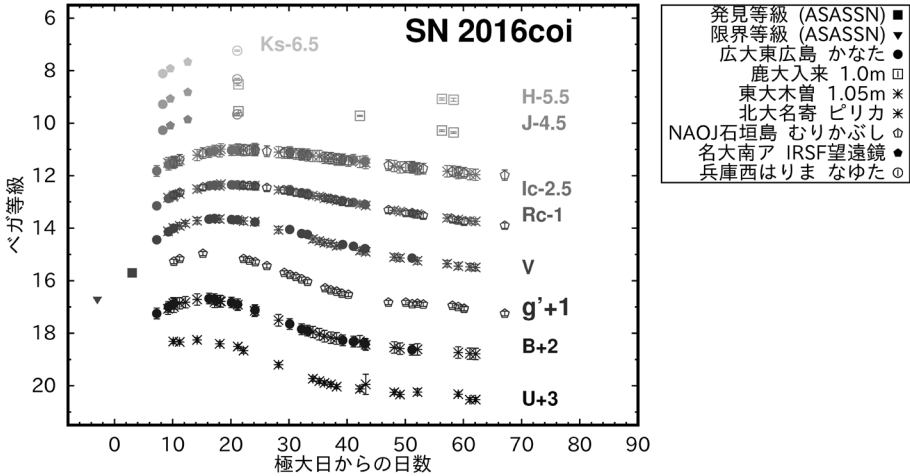


図1 光赤外線大学間連携を通じて得られた可視および近赤外線波長域の光度曲線。初期から密な観測の実現に成功した。爆発日は初期の増光曲線および、発見等級、発見前の限界等級から推定した。

争力も高い。超新星爆発においては、可視と同時に近赤外線データを欠損なく取得できる点が強みとなる。光赤外線大学間連携のこれまでの活動や成果については天文月報2016年2月号・3月号を参照いただきたい。

多数の望遠鏡および装置群によるシステムティックな観測によって、非常に密度の高い光度曲線およびスペクトル進化を得ることができた(図1, 図2)。今回のToO観測においてはデータ解析についても戦略的に進めた。広島大学かなた望遠鏡のデータについては、大学院生である中岡竜也氏が観測と同時に解析を進めた。その間、北海道大学ピリカ望遠鏡で得られたデータの測光解析は私が自ら行った。その他の装置で得られたデータについては、各機関の観測企画運営委員が中心となって解析を行った。これまでの経験によって、光赤外線大学間連携内所属の研究者および大学院生グループは強い結束力を培ってきた。観測と解析は滞ることなく、極めて理想的なタイムスケールで進められた。また、同時に共同研究者である国立天文台の田中雅臣氏、京都大学の前田啓一氏とメールベースでの議論を進め、おおよそ推定された爆発日から60日後の時点ではほぼ

方向性を定め、その後論文としてまとめた⁹⁾。

4. 強いヘリウム吸収線の検出

大学間連携で観測が開始され、得られた最初のスペクトルにおいて最も重要な科学的発見があった。極めて大きな膨張速度(〜18,000 km/s)のケイ素、酸素、そしてカルシウムが確認されるとともに、ヘリウムの吸収線が見つかったのである。酸素とカルシウムはあまりに大きな速度のため、一つにブレンドしていた。極超新星の特徴である。

可視光波長域に見られるヘリウムとしては、He I λ 5876, λ 6678, λ 7065の三つがよく知られる吸収線である。これらを同時に検出することができた。三つのヘリウムはケイ素とほぼ同程度の膨張速度であった。定義上、ヘリウムが見られる超新星は、Ib型である。そこで、ほかのよく観測されているIb型超新星との比較を図3に示す。SN 2016coiはヘリウムの吸収線がIb型に比べて明らかに短波長側にある。これは、ヘリウム層の膨張速度が大きいことを意味する。ほかの極超新星においては、He I λ 5876の疑いのある吸収線が僅かに見られるものの、この波長はNaID線の可

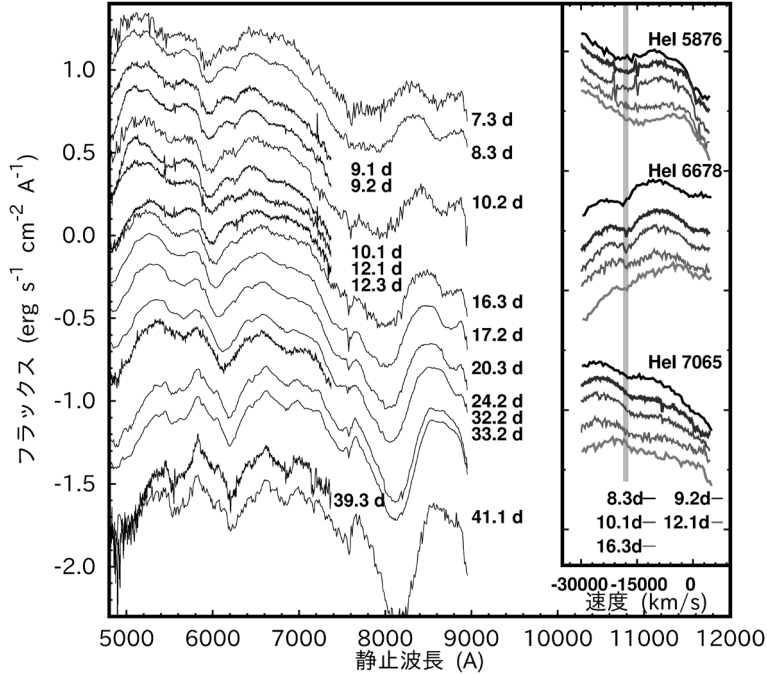


図2 SN 2016coiのスペクトル進化。これらのデータは、広島大かなた望遠鏡、兵庫県立大なゆた望遠鏡、そしてぐんま天文台 1.5 m望遠鏡によって取得されている。波長は母銀河の後退速度を補正済である。また、右上のボックス内には、波長を速度に換算した、ヘリウムの吸収線を示している。グレーの縦棒は、吸収線最小位置に対応する18,000 km/sを示している。

能性もある。また、He I $\lambda 6678$ や $\lambda 7065$ は非常に弱く有意に見えるとは言えない。

SN 2016coiにおけるヘリウムの検出をより確かなものとするために、さらに二つの解析を実行した。典型的なIb型超新星SN 2012au¹⁰⁾のスペクトルに対して、ガウシアン関数で吸収線の幅を平滑化(滑らかに)する操作を行った。さらに、吸収線位置もSN 2016coiと直接比較できるように波長は調節した。線速度はヘリウムを基準に合わせた。また、比較のために、ヘリウムが見られない典型的なIc型超新星SN 2007grを同じように平滑化した。それを示しているのが図4である。

これを見ると、SN 2016coiと平滑化し青方偏移したIb型SN 2012auはヘリウムの吸収線位置がすべてよく一致していることがわかる。さらに、それ以外にもSi IIの吸収線や全体的なプロファイルもよく似ている。一方で、Ic型SN 2007grを平滑化したものとは大きく異なる。特に、SN 2007gr

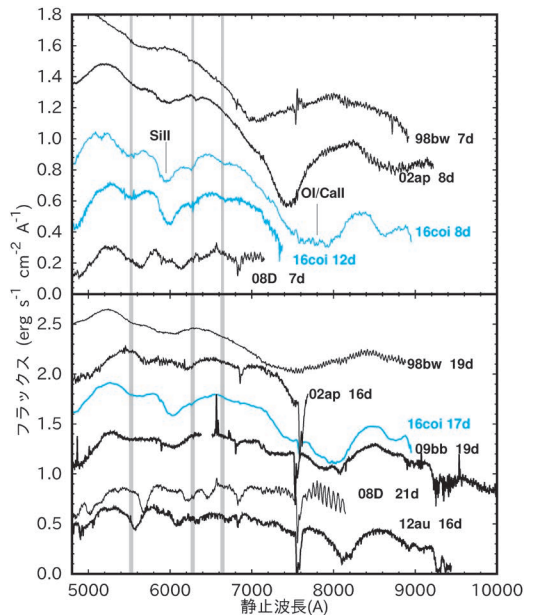


図3 他の極超新星やIb型超新星とのスペクトルの比較。上が爆発後1週間程度のもので、下側が極大光度付近のものである。グレーの縦線は、三つのHe Iを18,000 km/s青方偏移させた波長位置を示している。

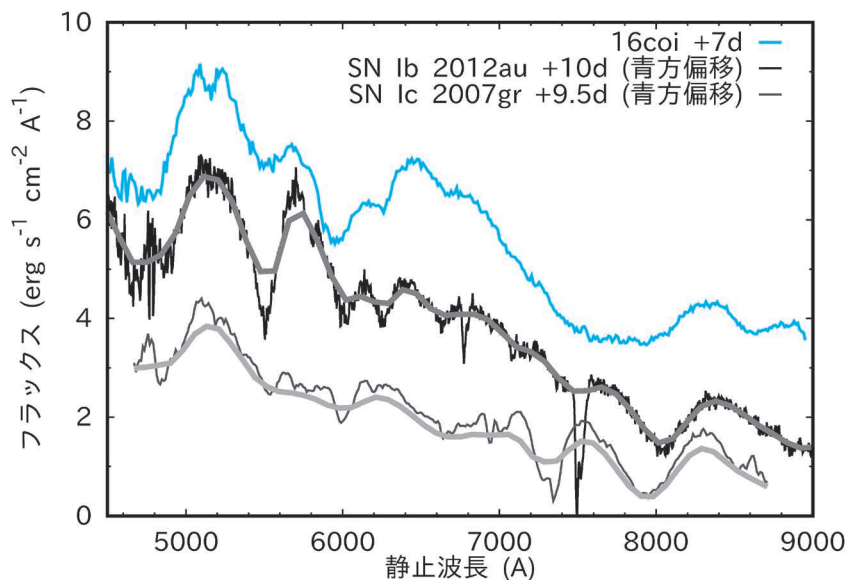


図4 SN 2016coiの初期スペクトルと平滑化したIb型超新星SN 2012au, Ic型超新星SN 2007grとの比較. これら二つのスペクトルは人工的に青方偏移させている.

のHe I $\lambda 6678$ の吸収線位置に対応する波長は逆に盛り上がってしまっている.

さらに、三つのヘリウムの吸収線強度比を再現するために、モデルスペクトルによるフィッティングを行った. 吸収線の深さは、温度や密度、不透明度などの物理量によって変化する. これらにそれぞれの元素の線速度をパラメータとして与え、スペクトルの計算を行った. その結果、三つのHe Iに加えて、Co IIやNa I D, Si IIIと言った吸収線による寄与もあることを確かめ、強度比をうまく説明することができた.

5. 膨張速度

一般的に、吸収線速度は異なる元素ごとにばらつきを示す. より大きな速度をもつ元素はより、外層に分布しており、最も遅い速度をもつ元素が光球面をトレースし、超新星の特徴的な速度であるとみなすことができる. 今回、われわれはSi II, Ca II, そしてHe Iの吸収線最小波長を測定し、線速度に換算した. 他のIb/c型超新星と同様、三つの中でSi IIが最も遅いことを確認し、これを膨

張速度として使うことを定めた. 比較サンプルとして、いくつかの極超新星やIb型超新星の速度も同様の方法で測った. その結果、極大光度付近では、SN 2016coiの膨張速度は $15,000 \text{ km s}^{-1}$ と、SN 1998bwやSN 2009bbといった極超新星と同程度であり、Ib型超新星に比べれば大きいことがわかった (図5参照).

6. 光度曲線

一般に、極超新星を含むIb/c型超新星の光度進化タイムスケールは多様性を示す. SN 2016coiは非常に初期に発見され、かつわれわれは初期から観測することができたので、増光時間 (推定された爆発日から極大光度までの日数) を精度良く 17 ± 3 日と求めることができた. SN 2016coiは、SN 1998bwとはほぼ同じ増光時間で、SN 2006ajに比べると1.4倍程長いことがわかった (図6参照).

一方で、絶対光度に注目すると、SN 2016coiは極超新星の中では比較的暗い位置づけとなる. 可視光域の放射を60%程度と仮定し、総輻射光

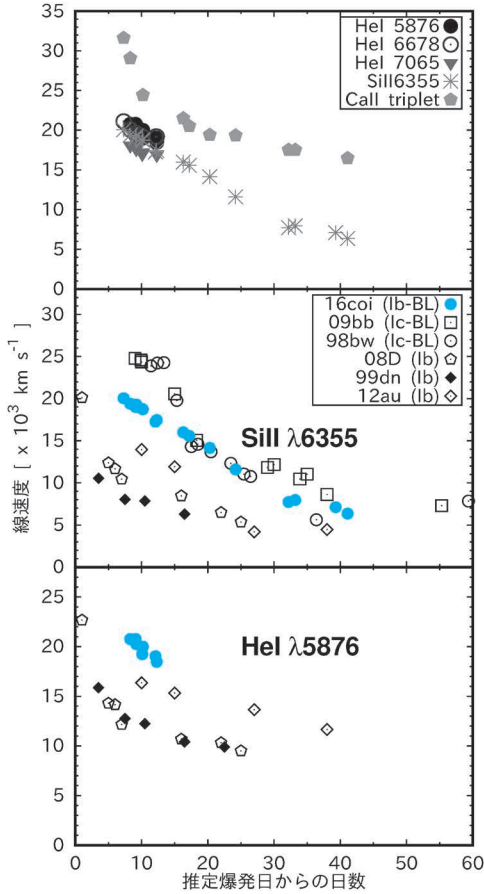


図5 線速度と推定爆発日からの日数の関係。(上) SN 2016coi の Ca II, Si II, He I の線速度。(中) SN2016coi の Si II と他の極超新星・Ib 型超新星との比較。(下) SN2016coi の He I と Ib 型との比較。

度を見積もると、 $3.2 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ 程度と求められた。これは典型的な Ib/c 型超新星の平均値に近いとわかった。

7. 噴出物質の質量と運動エネルギー

光度曲線のタイムスケールおよび膨張速度は、エジェクタの運動エネルギーと総質量で決まる。極超新星 SN 2006aj, Ib 型超新星 SN 2008D はライトカーブとスペクトルが理論的な計算によって求められ、観測との詳細な比較研究が出版されている^{11), 12)}。これらから推定した SN 2016coi のエ

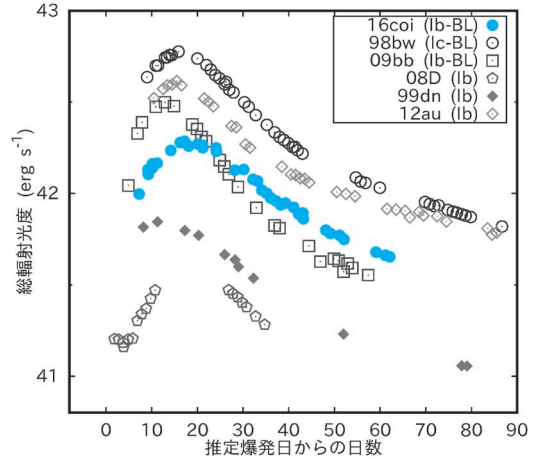


図6 可視光波長域の放射割合を60%と仮定した時の総輻射光度曲線。BVRIバンドのフラックスを積分して求めている。比較対象は極超新星とIb型である。極超新星の中では暗い。

ジェクタ質量は、 $\sim 10 M_{\odot}$ 、噴出物質の運動エネルギーは $3\text{--}5 \times 10^{52} \text{ erg}$ となった。爆発エネルギーが典型的な超新星より1桁大きく、極超新星であることに一致する。

8. 極超新星の親星外層に多様性が

SN 2016coi において得られた爆発パラメータは、極超新星に近いことを示す。さらに、初期スペクトルはヘリウムの吸収線を示し、外層にはヘリウムが含まれることを意味する。一般的には、極超新星はそのスペクトルにヘリウムは示さず Ic 型であるという共通見解がもたれている。

しかしながら、これまでの極超新星においてもヘリウムの検出が全く検討されてこなかったわけではない。SN 2009bb においてはモデルスペクトルとの比較によって、可視スペクトルに弱いヘリウムの検出が指摘されている¹³⁾。また、SN 2012ap においては、近赤外線スペクトルが得られており、He I $\lambda 10830$ 由来と考えられる吸収線が見られた¹⁴⁾。SN 2016coi と合わせて三つの天体の存在は、極超新星の親星に新たな多様性がある可能性を示唆している(図7参照)。

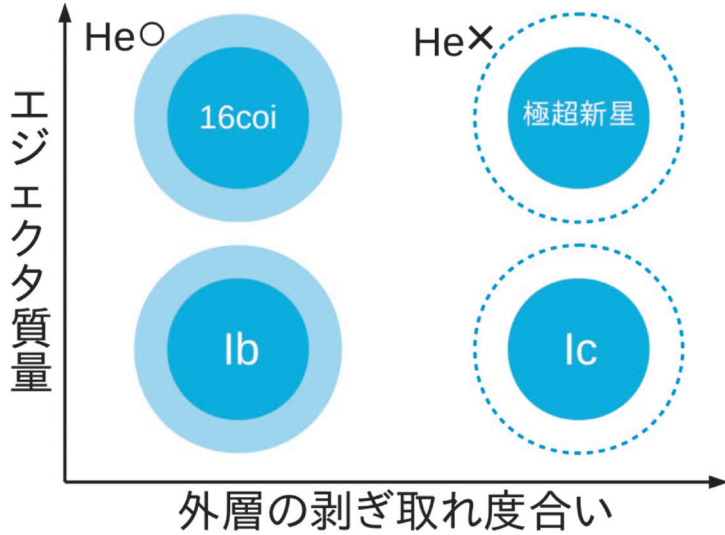


図7 噴出物質の質量と外層の剥ぎ取れ度合いの関係. 直観的には、より重い大質量星はその輻射圧で外層をより効率的に吹き飛ばすため、よりエネルギーの高い現象であるほど、より外層が剥ぎ取れているはずである。しかしながら、本研究における極超新星SN 2016coiにおけるヘリウムの発見は、こうした描像にインパクトを与える。

導入ですでに述べた通り、極超新星はそのスペクトルにヘリウムを示さないことから、これまでは親星外層はヘリウムをもたないものと考えられてきた。しかし、最近の恒星進化理論によれば、25太陽質量程度の親星の輻射圧でさえも、外層のヘリウムを完全に剥ぎ取ることはできないこと指摘されている¹⁵⁾。SN 2016coiにおけるヘリウムの発見は、これに一致する。多くの極超新星の親星がヘリウム層をもつかどうかはより多くの観測が必要である。

9. 今後の展開

超新星をはじめとする突発現象の探索網の発展が続いている。SN 2016coiはASASSNグループによって発見された超新星である。最近の高頻度新天体探索サーベイにおいて存在感を示しており、特に近傍超新星の発見で勢力を延ばしてきている。これら的高頻度探索によって、非常に初期の短期的増光・減光現象が検出され始めるなど、親星のごく近傍の星周環境に関する重要な情報を供給しつつある。これらは従来の恒星進化理論に

非常に大きなインパクトを与えるものである。ガンマ線バーストを付随しない極超新星ではこのような早期観測の例はない。親星と考えられる大質量星の周囲では強い星風による濃い星周環境が存在していると考えるのが自然である。東京大学で開発が進められている木曽シュミット望遠鏡の新装置Tomo-e Gozenによる高頻度広視野サーベイによって、このような超早期現象が捉えられると期待される。

また、本稿で紹介した早期スペクトルは、そのような非常に速いタイムスケールの現象に比べればやや緩やかなものであるものの、未発見の事象が多く眠る時間領域と言える。SN 2016coiの例では、推定爆発日から7日後からの観測に成功し、検出されたヘリウムの吸収線はその5日後（爆発後12日後）にはほとんど見えなくなっている。極大光度は爆発17日後である。今回のケースで言えば最初のスペクトルが極大到達の1週間-10日程度前に得られなければ、ヘリウムの発見は実現されなかった。観測所で早期観測の重要性を理解し柔軟な対応が可能となる観測人員が確保

されていること、装置望遠鏡が常に維持管理されていること、何よりそれらへアクセスできる体制が構築されていること、これらすべてをそろえることが早期観測を実現させる条件となる。光赤外線大学間連携においてはこれらすべて実現できており、ヘリウムの発見に至ったものと考えている。

SN 2016coiは極大で14.0等と、2016年に発見されたもので最も見かけの光度が明るい超新星の一つであった。現在の高頻度探索ではほぼ漏れなく発見されると見て良い。しかし、Tomo-e Gozenが本格稼働し、より早期に発見されるならば、その等級はより暗いはずである。SN 2016coiの発見等級が15.9等であるので、超早期の分光観測を実現させるには16等より暗い時期に、精度の良いスペクトルを得る必要がある。現状の光赤外線大学間連携内の望遠鏡群では最大口径は2.0メートルであり、集光力が不足している。京都大学が開発を行ってきた新3.8メートル望遠鏡による科学観測が本格的に開始されれば、超早期からの分光観測が実現できると強く期待したい。

謝 辞

本研究は、甲南大学平生太郎基金による助成を受けて行われたものです。また本研究は、光赤外線大学間連携を通じたToO観測で取得されたデータに基づいています。観測および解析に携わったすべての方に感謝いたします。また、データに対する理論的な解釈に関して共同研究者である国立天文台の田中雅臣氏と京都大学の前田啓一氏との議論がたいへん有益なものとなりました。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Filippenko, A. V., 1997, ARA&A, 35, 309
- 2) Smartt, S. J., 2009, ARA&A, 47, 63
- 3) Cao, Y., et al., 2013, ApJ, 775, L7
- 4) Modjaz, M., et al., 2016, ApJ, 832, 108
- 5) Holoien, T. W.-S., et al., 2016, ATEL, 9086, 1
- 6) Elias-Rosa, N., et al., 2016, ATEL, 9090, 1
- 7) Foley, R. J., et al., 2003, PASP, 115, 1220
- 8) Kawabata, K. S., et al., 2002, ApJ, 580, L39
- 9) Yamanaka, M, et al., 2017, ApJ, 837, 1
- 10) Takaki, K., et al., 2013, ApJ, 772, L17
- 11) Mazzali, P. A., et al., 2006, Nature, 442, 1018
- 12) Tanaka, M., et al., 2009, ApJ, 692, 1131
- 13) Piganata, G., et al., 2011, ApJ, 728, 14
- 14) Bufano, F., et al., 2012, ApJ, 753, 67
- 15) Yoon, S. C., et al., 2010, ApJ, 725, 940

OISTER Observations of SN 2016coi: Detection of the Helium

Masayuki YAMANAKA

*Hiroshima Astrophysical Science Center,
Hiroshima University, Higashi-Hiroshima,
Hiroshima 739-8526, Japan*

Abstract: The fates of massive stars in their stellar evolutions are dependent on their initial masses. Massive stars larger than $8-10 M_{\odot}$ reach the brilliant explosion as core collapse supernovae (SNe). A SN with ten times larger kinetic energy than a normal Type Ib/c SN is called 'hypernova'. A hypernova is often associated with the gamma-ray bursts (GRBs), and it is one of the most important explosion phenomena in the universe. It is thought to be related to the massive star, although the progenitor nature is unclear. SN 2016coi was discovered at the nearby faint galaxy at 17-18 Mpc, and it was not associated with GRBs. The early-phase spectra exhibited the very broad features, and this SN could be a hypernova. We performed the Target-of-Opportunity (ToO) observations of SN 2016coi through the Optical and Infrared Synergetics of Telescope for Education and Research (OISTER). The early-phase spectra exhibited the helium absorption lines with the very broad features. This indicates the diversity of the outermost layer of the hypernova progenitor.