

# 超新星は「丸くない」: 超新星爆発の謎をその形状から探る



前田 啓一

〈東京大学数物連携宇宙研究機構 〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: keiichi.maeda@ipmu.jp

超新星および極超新星の爆発機構の謎を解く鍵はその爆発構造にあります。理論的には球対称からのずれを引き起こす機構が重要であると考えられていますが、それを支持する観測的証拠はほぼ皆無でした。私たちは、超新星からの放射の多次元理論計算とすばる望遠鏡による観測を組み合わせることで、超新星爆発の形状を突き止めました。超新星は一般に「丸」からずれた爆発を示し、とくに双極的な爆発からの予想とよく一致します。また、エネルギーの大きい極超新星は、通常の超新星よりもより非対称な構造を示しました。本稿では、これらの研究成果について解説します。

## 1. 超新星とガンマ線バースト

太陽の約8倍以上の質量をもつ星は、その生涯の最期に重力崩壊を起こします。中心部に中性子星（あるいはブラックホール）が形成され、外層部は宇宙空間に吹き飛ばされます。これが超新星の起源であると考えられています。爆発から数週間経過した時点での最大光度時におけるスペクトルにより超新星はタイプ分類されます。上で述べた「重力崩壊型」超新星はII型、Ib型、Ic型に大別され、それぞれ水素外層をもつ巨星、水素外層が進化の過程ではげたヘリウム星、ヘリウム外層までもはげてしまった酸素・炭素星が爆発したものであると考えられています<sup>\*1</sup>。星の進化過程で作られた酸素などの元素に加え、超新星爆発時には大量の鉄やさらに重い元素が生成され、これは現在の宇宙における多くの元素の起源として重要です<sup>2</sup>。超新星において解放されるエネルギーは銀河

形成にも影響を与えてきたと考えられています。

超新星はガンマ線バーストと密接に関係することが知られています。「長い」ガンマ線バーストは数秒程度（あるいはそれ以下）だけ輝くガンマ線突発天体ですが<sup>2</sup>、その短いタイムスケールゆえに位置の特定ができず、したがって他の波長での対応天体が長い間見つかりませんでした。1997年以降ようやく他波長でのフォローアップが可能となり、1998年にはガンマ線バーストGRB 980425とIc型超新星1998bwが同じ場所で同時に起こったことが明らかにされました<sup>3</sup>。その後いくつも見つかったガンマ線バーストと起源を一にする超新星のはしりと言えます<sup>4,5</sup>。現在まで、ガンマ線バーストに付随する超新星は主系列時の質量が太陽の30倍以上という大質量星を起源とし、爆発エネルギーが通常の超新星の10倍以上であり、タイプはIc型であることが知られています。これらは、そのエネルギーの大きさから超新星の

<sup>\*1</sup> 物理的な起源からは、「重力崩壊型」と「核反応暴走型」に分けられます。すでに確立しているタイプ分類としては、後者はIa型、前者はそれ以外の超新星に対応します。

上をいく爆発、「極超新星」と呼ばれます<sup>6)</sup>、\*2。

## 2. その爆発機構の謎. 鍵は爆発構造

実は、超新星と極超新星に関して、重要な未解決問題があります。「重力崩壊からどのように爆発に転じるか」は未解明であり、天体物理学上の重要な問題の一つです。中性子星形成に伴い約  $3 \times 10^{53}$  エルグの重力エネルギーが解放されますから、このうち約 1% を外向きの運動エネルギーとして外層に渡すことができれば観測されているような超新星（通常のもので  $10^{51}$  エルグ程度）を説明できますが、ここに困難があります。重力エネルギーの 99% 以上はニュートリノとして宇宙空間に持ち逃げされてしまい、外層部にはほとんどエネルギーが伝わらないのです。「球対称」を仮定したほぼすべての理論計算において、中性子星形成の際に発生した衝撃波が鉄コアを突き抜けることができずに途中で停滞してしまうことが示されています<sup>10)</sup>。

この問題に関して、理論研究者の間では、「球対称を破る」機構が本質的であることが定説になっています。近年、停滞衝撃波が流体不安定性により「丸」からずれて揺れ動く過程でニュートリノの吸収効率が増加し爆発に転じるというアイデアが提出されています<sup>11)–13)</sup>。詳細はまだ今後の理論研究を待たなければいけません。少なくとも 2 次元軸対称を仮定した計算では軸方向に沿って揺れ動くモード、したがって双極的な爆発を起こすモードが発達することが知られています。また、非常に強い磁場と速い回転がある場合には、重力エネルギーをいったん回転エネルギーに変換し、磁場の巻き込みを介して双極的な爆発を起こすという提案もあります<sup>14), 15)</sup>。

## 双極的な爆発

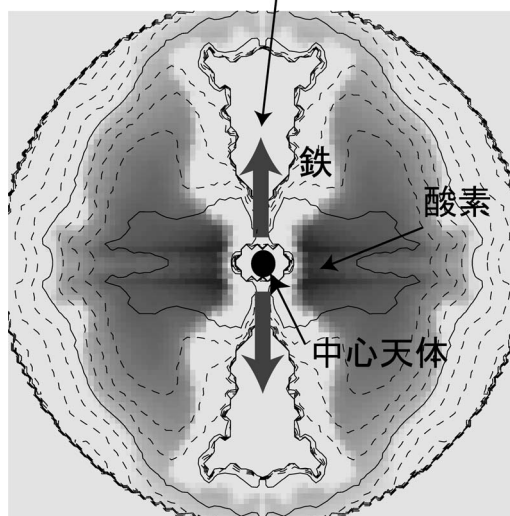


図1 双極的な超新星爆発モデルの例<sup>17), 18)</sup>。等高線は密度構造、グラデーションは酸素密度分布を表す。極方向の酸素が存在しない領域は、強い衝撃波により核反応が進み  $^{56}\text{Ni}$  (後に鉄に崩壊) が主成分となっている。

ガンマ線バーストに関して言えば、大質量星の重力崩壊に伴いブラックホールが形成され、さらに外層から落ちてくる物質が降着円盤を形成する、この降着円盤の回転エネルギー（あるいはブラックホールの回転エネルギー）が解放され非常に細い光速ジェットを生み出すというモデルが支持を集めています<sup>16)</sup>。この場合、それに付随する極超新星はやはり方向性をもった双極的な爆発になることが予想されます。

以上のように、超新星、極超新星ともに、「丸くない」ことが爆発を起こすための重要な要素であると考えられています。図1に、双極的にエネルギーが解放された Ic 型超新星モデルにおける爆発後の形状の計算例を示します<sup>17), \*3)</sup>。ある方向に

\*2 ただし、通常のガンマ線バーストよりも低エネルギーの放射が卓越した GRB 060218 に付随した超新星 2006aj は、通常の超新星と極超新星の中間的な性質を示しました<sup>7)</sup>。これは、他のガンマ線バーストと爆発機構の異なるものである可能性が提示されています<sup>8), 9)</sup>。

\*3 まだ爆発機構の詳細は未解明ですので、このようなモデルでは爆発が起こったと「仮定」して、人為的に爆発エネルギーを手で与えることで超新星爆発をシミュレートしています。

エネルギーが集中して解放された場合、その方向には強い衝撃波によりもともとの親星の主成分である酸素がばらばらにされ、最終的に $^{56}\text{Ni}$ が生成されます<sup>17), 19)-21)</sup>。この方向では強い衝撃波のために密度も小さくなります。一方、弱い爆発を起こす赤道方向ではほとんど核反応は起こりません。赤道方向は密度が高く、酸素がドーナツ状に分布するという特徴的な構造が現れることとなります。このような形を観測的にとらえることができれば、これは双極的な丸くない爆発機構の強い観測的証拠となります。

### 3. 超新星での多次元輻射輸送計算

超新星爆発の「形」をとらえることは、実は観測的には非常に難しいことです。撮像によりその構造を空間分解できる超新星は、例外的に大マゼラン星雲で発生したSN 1987Aがあるのみです<sup>22)</sup>。そのハッブル宇宙望遠鏡による画像はこれが回転楕円体のような構造をもっていることを明らかにしていますが、この一例だけで強い証拠とすることはできないでしょう。私たちは、年間数百個発見される系外超新星、少なくともその一部について爆発構造を引き出し、超新星爆発の「一般的な」形を得ることに目標を設定しました。

系外超新星は最低でも約10メガパーセクの遠方で発生している天体ですから、既存の可視観測装置では空間分解できません。したがって、私たちは「点源」から「空間情報」を引き出さなければいけません。この目的のために、私たちは当時未開拓の分野であった超新星における多次元輻射輸送の問題に取り組み、2006–2007年に一連の論文を発表することができました<sup>23)-26)</sup>。

今回ターゲットとするIb型およびIc型超新星においては、具体的には以下のような諸過程を解くことに帰着します。爆発の際に作られた $^{56}\text{Ni}$ が

崩壊し $^{56}\text{Co}$ となり、さらに崩壊し $^{56}\text{Fe}$ となります。この際に数MeVのガンマ線が放出され、これは主にコンプトン散乱を受け最終的に熱的電子の熱源となります。爆発後数カ月程度までの比較的「初期」においてはこの熱的電子と輻射はカップルしています。この状況での放射は電子散乱およびライン吸収を受け、光学的に厚い膨張物質からの放射に特徴的な熱的連続成分とP Cygni形状のラインを形成します。爆発後200日程度たつと膨張に伴い密度が減少し、光学的に薄くなります。この「後期」においては輻射と電子は切り離され、熱的電子により励起された禁制線を中心とするスペクトルを形成します。後期においては、局所非平衡の効果も重要になります。

### 4. 極超新星の爆発構造

私たちは図1のモデルをもとに、多次元の輻射計算を行って期待される観測量を引き出しました。図2に、極超新星1998bwの観測との比較を示してあります。初期の観測を比較的良好に説明できる球対称な極超新星モデルですが、後期の光度を説明できないこと、後期のスペクトルで最も強い輝線である[O I] 6300, 6363 Åが観測に比べ非常に太くその形状がフラットトップになってしまうこと(観測は鋭いピーク)の2点で観測とうまく合いません。一方、双極爆発モデルを軸に近い方向から見た場合には、初期から後期まで観測をたいへんよく説明できているのがわかると思います。

私たちは、極超新星1998bwの観測結果を初期から後期まで初めて矛盾なく説明できただけでなく<sup>\*4</sup>、一般に超新星が「丸くない」場合にどのような観測量と爆発を特徴づける物理量が結び付けられるかを明らかにしました。この問題は、球対称を仮定したモデルでは、「放出物質質量」(以下 $M_{\text{ej}}$ )「爆発エネルギー」( $E_{\text{K}}$ )「生成・放出された

\*4 これは、超新星研究の分野で、多次元輻射計算モデルを観測と詳細に比較した世界初の研究でもあります。

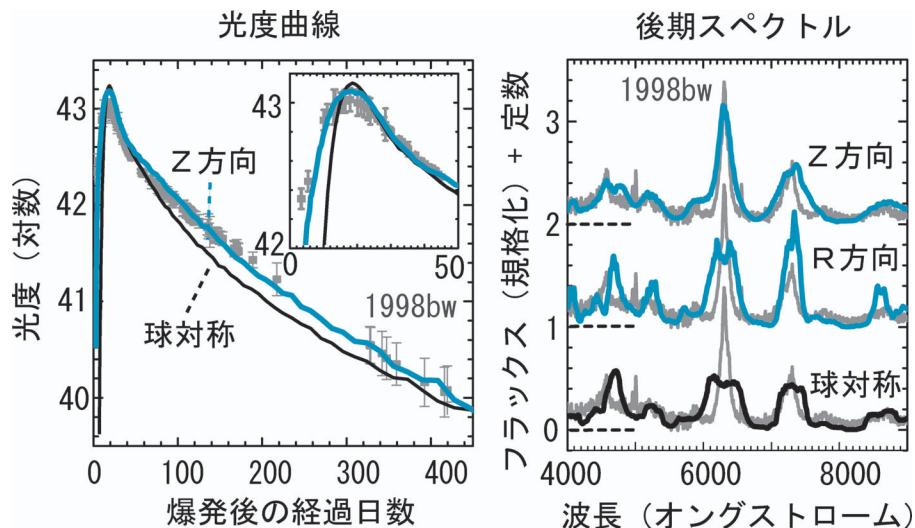


図2 多次元輻射計算と極超新星 1998 bw の観測の比較<sup>23), 25)</sup>. 観測データ<sup>27)</sup>は灰色, 双極爆発モデルは青, 球対称モデルは黒で示してある. 左図は可視域での光度曲線, 右図は爆発後約1年経過した後の後期スペクトル. 右図で, 上から図1の双極爆発を極方向 (Z方向) から見た場合, 赤道方向 (R方向) から見た場合, 球対称爆発を見た場合が示してあり, 比較のためそれぞれ異なる定数がフラックスに足してある.

$^{56}\text{Ni}$  質量」( $M(^{56}\text{Ni})$ ) の三つを求めることに帰着します<sup>\*5</sup>. 一方, 観測量として「光度曲線のタイムスケール=光子拡散タイムスケール」( $t_d$ : 主に  $M_{ej}$ ,  $E_K$  に依存)「吸収線から測った膨張速度」( $v$ :  $M_{ej}$ ,  $E_K$  に依存)「最大光度」( $L_{\text{peak}}$ :  $M(^{56}\text{Ni})$  に依存)が独立に得られ, 初期観測のモデル・フィットから, 球対称モデルは原理的には一意に決まることとなります.

一方, 「丸くない」爆発の場合はそうはいきません. この場合, 仮に爆発構造が一つの特徴的なパラメーターで表されるとしても<sup>\*6</sup>,  $M_{ej}$ ,  $E_K$ ,  $M(^{56}\text{Ni})$  に加え, 「形状」と「視線方向」を独立に決める必要が生じます. この場合, 初期の観測だけもってきても答えは得られません. 求めたい量五つに対し独立な観測量が三つだけしかありませんし,  $t_d$  と  $v$  は形状と視線方向にも依存することになるからです. 私たちは, 初期観測量に加え爆発後1年ほど経過した時点での「後期光度」と「後期スペクトルにお

ける輝線形状」を用いることで爆発モデルが一意に決まることを示しました. 特に, 輝線形状については, これはほぼ爆発形状と視線方向で決まってしまう, 他の物理量にはよらないことが後で重要になってきます.

この考えを極超新星 1998bw にあてはめて私たちの得た解答は, 双極的な爆発を軸に近い方向から見たというものでした. また, 爆発のエネルギーは,  $(10-20) \times 10^{51}$  エルグと求められ, 「球対称を仮定+初期観測のみ」で求めた場合より2-3倍小さい値が得られました. これは, 初期観測のみを考えた場合, 観測を説明できるモデルが「形状」「視線方向」に対して多数存在しうるからです. 双極的な爆発では, 軸から見た場合には  $v$  は球対称を仮定した場合よりも大きくなりますし,  $t_d$  は短くなります. これは, 球対称モデルでエネルギーを大きくした場合の振舞いとほぼ同じになります. 私たちは, このような縮退があることを

\*5 他の基本的な物理量はこれから推定することができます. 例えば, 星の進化的理論をかませることで親星の主系列星質量に換算することができます.

\*6 図1のモデルでは, 解放されるエネルギーの「軸集中度」で表されます.

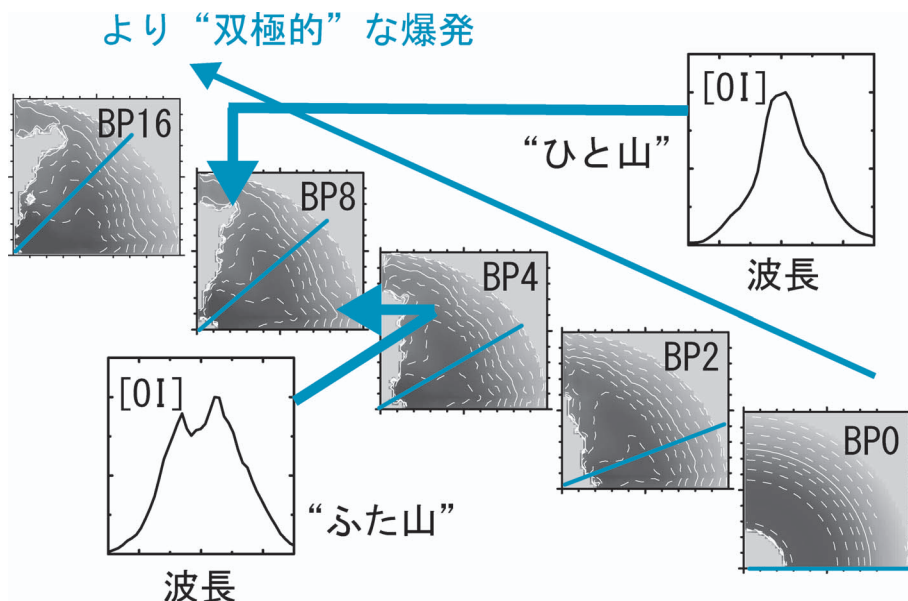


図3 双極爆発モデル(図1)で中心天体からのエネルギー解放の軸方向集中度<sup>17)</sup>(図中の「BP」と観測される後期[O I] 6300, 6363 Å輝線形状の関係<sup>23)</sup>。爆発を軸方向から見た場合に「ひと山」、赤道方向から見た場合に「ふた山」となる。「ふた山」に見える角度範囲はより双極的な(より軸方向集中度が大きい)場合ほど大きくなる。

明らかにし、さらに後期観測を用いることでこの縮退が解けることを示しました。

## 5. すばる後期スペクトル観測と典型的な爆発形状の特定

前章で、後期「輝線形状」は「爆発形状」「視線方向」にのみ依存し、他の特徴(エネルギー等)にはほとんど依存しないことを述べました。特に、[O I] 6300, 6363 Åは一般に後期スペクトル中で最も強い輝線であり、かつ他の輝線とのブレンドがほとんどないという性質をもつために、爆発形状を求めるうえで理想的な観測対象となります。ドーナツ状に分布した酸素が一樣膨張し、かつ光学的に薄くなっていると、酸素輝線は、爆発軸に近い方向から見た場合には「ひと山」、赤道方向から見た場合には「ふた山」となるという特徴的な振舞いを示します。爆発形状が丸からずれてより双極的になるほど、ふた山として観測される角度範囲は広がります<sup>23)</sup>(図3)。

この特徴的な振舞いの発見は、後期スペクトル観測のみから爆発形状を見積もる可能性を提示しました。爆発形状を求める場合、前述の極超新星1998bwの場合のように、初期から後期にわたる観測データと詳細なモデル計算の比較を行えばよいのですが、これは観測的にも理論計算的にも非常にコストがかかります。したがって、多くの超新星に対し「典型的な」爆発形状を求めることは膨大な時間がかかることとなります。一方、一つの超新星に対し後期スペクトル観測を1回だけ行えばよいとなれば、これは現実的なタイムスケールでの研究となります。

私たちは、このアイデアをもとに、すばる望遠鏡、FOCASを用いた後期分光観測を推進しました<sup>28)</sup>。Ib型およびIc型超新星は放射性崩壊を熱源とし、かつ崩壊からのガンマ線吸収効率率は時間とともに低下しますので、時間とともに減光します。最大光度時には銀河の明るさにも達する超新星も、1年後には6-7等級程度暗くなります。比

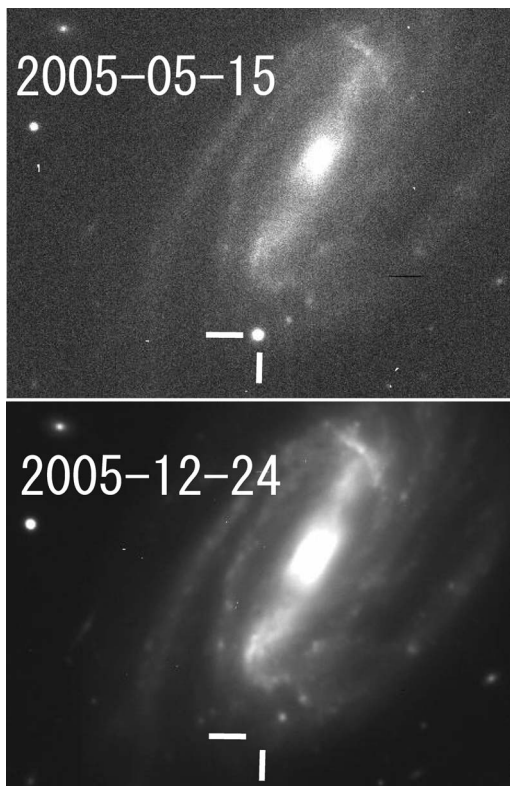


図4 すばる望遠鏡+FOCASで観測した超新星の例 (Ib型超新星 2005bf)。上図は最大光度の約一週間後の「初期」撮像<sup>29)</sup>、下図はそれからさらに200日以上経過した後の「後期」撮像観測<sup>30)</sup>。「後期」には超新星が非常に暗くなり、この図ではほとんど写っていない (copyright: 国立天文台すばる望遠鏡)。

較的近傍、数十メガパーセクの距離の超新星でも22-23等級程度まで暗くなってしまいます。したがって、「すばる」等の8メートル級の望遠鏡の出番となります (図4)。

結果として、2007年までで、15個のIb/c型超新星の後期スペクトル観測を行うことができました (図5)。それまでこのような観測は数例しか発表されていませんでした。私たちは、すでに発表されていた3例の超新星を加えた18個の超新星のうち、約3割で「ふた山」の構造が見られることを発見しました。このような「ふた山」構造は「丸い」超新星では絶対に現れない特徴ですから、

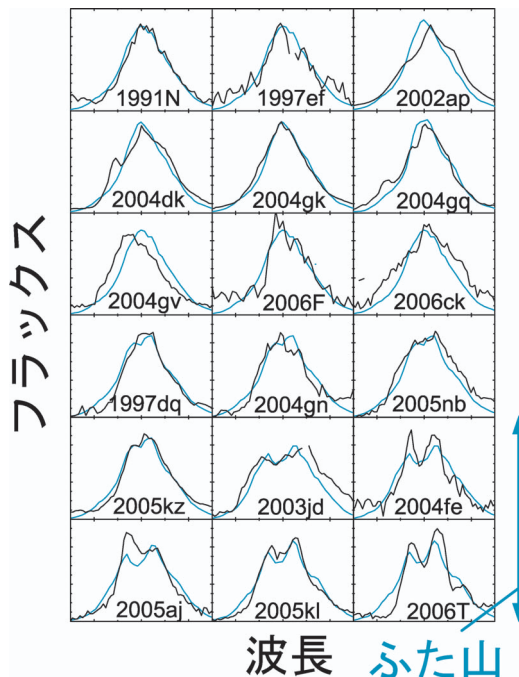


図5 18個の (Ib型およびIc型) 超新星の後期スペクトル<sup>28)</sup>。15個はすばる望遠鏡とFOCASによる観測結果。観測が黒線、モデルが青線で示してある。約3割の超新星が「ふた山」の [O I] 6300, 6363 Å 輝線を示した。

これは爆発の形状が一般に「丸くない」という直接的な証拠です。

さらに、典型的な爆発形状を引き出せるかが問題となります。図3に示したように、丸くない双極的な爆発は、視線方向により「ひと山」あるいは「ふた山」の輝線を示します。球からのずれが大きい場合ほど、「ふた山」として見える角度範囲が広がります。視線方向はランダムのはずですから、一つの超新星を見たときに「ふた山として見える確率」は、爆発形状のみで決まってしまう。したがって、多くの超新星を観測した場合、「ふた山で観測された個数/全超新星数」という個数比は平均的な爆発形状だけで決まってしまう観測量となります。これは、輝線形状は形状と視線方向で決まりますが、視線方向がランダムで決まるために、多くの超新星を用いれば視線方向への依存性が統計的に消せる、ということと同義で

す。私たちが詳細な観測との比較から求めた極超新星 1998bw の爆発形状 (図3の「BP8」と記されたモデル) からは、6~7割程度の超新星が「ふた山」を示すことが予想されます。これは、観測値 (約3割) に比べると有意に大きい値です。一般の超新星の典型的な爆発形状は、「丸」からはずれていますが、極超新星ほど極端ではないことが示されました (図3の「BP2」と記されたモデルの形状が観測をよく説明できます)。

以上の結果は、二つの意味で重要です。(1) そもそも超新星が一般に「丸くない」爆発であることを示した点。これは、近年の理論研究の方向、球対称からのずれが本質的な効果を生むというアイデア、が正しいことを観測的に初めて検証した例になります。(2) 一般の超新星と極超新星はその爆発形状に有意な違いがあること。この二つの爆発機構が本質的に異なること (例えば中性子星形成とブラックホール形成という異なる過程) はこれまで類推されてきましたが、その観測的証拠としては初めてのものであると言えます。

## 6. 今後の展望

今回解説した一連の研究のキーワードは、「超新星の爆発構造」と「後期観測」です。これらは、10年前においてはまともな観測的研究対象となっていないでしたが、現在ではさまざまな研究グループにより精力的に研究される分野に発展したと思います。この分野において、私たち日本の研究グループはいわば開拓者であり、現在でもイニシアチブをもって世界をリードできる位置にいるのではないかと思います。

「爆発構造」という面では、後期観測による爆発形状の研究は現在世界中で精力的に行われていますし、さらに偏光分光観測を用いた別のアプローチによる研究も進んでいます<sup>31)</sup>。超新星からの偏光は1%のレベルなので、通常の分光観測の百倍の光子が必要になり、8メートル級の望遠鏡を用いても比較的初期の明るい時期の観測、したがっ

て比較的表面付近での非対称性の研究が主になりますが、視線方向に垂直な方向の構造 (軸対称からのずれ) という、分光観測では得られない情報を与えます。これは、分光観測による最深部の構造の研究と相補的に爆発形状に迫る強力な観測手法です。

「後期観測」という面では、爆発形状にとどまらずその有用性が認識されてきました。すばる望遠鏡が端緒を切った近年の観測例の増加により、それまで知られていなかった特異な超新星が数多く発見されています。爆発機構の情報を残す最深部からの光をとらえるという手段は非常に強力であるため、それが天体物理の観点から非常に重要な知見をもたらすことも多々あります<sup>32)</sup>。

本稿で述べた重力崩壊型超新星爆発の研究に加えて、私自身が最近力を入れて進めているのは、「後期観測」を用いた「Ia型超新星の爆発構造」と「宇宙論への応用」です。白色矮星の核暴走爆発であるIa型超新星に関しては、理論的にそもそも特に方向性のあるゆがんだ構造が必要とされないこともあり、私たちが重力崩壊型超新星にあてはめたような研究は全くなされていませんでした。しかし、私たちは観測データを詳細に調べることにより、爆発の最深部が片側に偏った構造をしていることを明らかにしました<sup>33), 34)</sup>。これはIa型超新星爆発の標準理論に変更を迫るものと言えます。私たちは、この「偏った」爆発というアイデアにより、それまで未解明であったIa型超新星の示すスペクトルの多様性の起源までも統一的に説明することに成功し、これはIa型超新星研究における大きな進展となったと思います<sup>35)</sup>。この研究に関しては、ページの制限もありますのでまたの機会にぜひ寄稿させていただきたいと思います。現在私たちはこのアイデアを推し進め、後期観測の推進により爆発機構を特定し、Ia型超新星が宇宙論研究で有用な標準光源となっている物理的理由までも突き止めてしまおうという野心的な試みを行っています。

## 謝 辞

本稿は筆者が東京大学総合文化研究科宇宙地球部会在籍時に着手してから、ドイツ・マックスプランク研究所、東京大学数物連携宇宙研究機構と籍を移しながらまとめた研究結果をもとにしたものです。筆者が東京大学理学系研究科天文学専攻に大学院生として在籍時に理論研究の基礎をたたきこんでくださった野本憲一氏に感謝いたします。観測に関して全く知識・経験のなかった筆者に一から観測の指導をしてくださり、実地での観測でもリーダーシップを発揮してくださった川端弘治氏に感謝いたします。また、常に入念に観測準備をしてくださり、筆者の無理な観測要望にも柔軟に対応をしていただいている服部堯氏およびすばる望遠鏡スタッフの方々に感謝いたします。本稿のもとになった研究は、上記の方々以外にも、田中雅臣氏、家正則氏をはじめ多くの方々との共同研究です。また、蜂巢泉氏や柴田大氏等、多くの研究者からさまざまな議論による刺激を受けたことが今日の筆者の研究の基礎になっています。この場で皆様に感謝いたします。本研究に関し、筆者は日本学術振興会および文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラムより援助をいただいています。

## 参 考 文 献

- 1) 野本憲一編, 2007, 元素はいかにつくられたか—超新星爆発と宇宙の化学進化— (岩波書店)
- 2) 井岡邦仁, 2006, 天文月報 99, 220
- 3) Galama T. J., et al., 1998, Nature 395, 670
- 4) Hjorth J., et al., 2003, Nature 423, 847
- 5) Stanek K. Z., et al., 2003, ApJ 591, L17
- 6) Iwamoto K., et al., 1998, Nature 395, 672
- 7) Pian E., et al., 2006, Nature 442, 1011
- 8) Mazzali P. A., et al., 2006, Nature 442, 1018
- 9) Maeda K., et al., 2007, ApJ 658, L5
- 10) Liebendörfer M., et al., 2001, Phys. Rev. D 63, 103004
- 11) Blondin J.M., Mezzacappa A., DeMarino C., 2003, ApJ 584, 971
- 12) Foglizzo T., et al., 2007, ApJ 654, 1006
- 13) Iwakami W., et al., 2009, ApJ 700, 232
- 14) LeBlanc J. M., Wilson J. R., 1970, ApJ 161, 541
- 15) Takiwaki T., Kotake K., Sato K., 2009, ApJ 691, 1360
- 16) MacFadyen A.I., Woosley S. E., 1999, ApJ 524, 262
- 17) Maeda K., et al., 2002, ApJ 565, 405
- 18) Mazzali P. A., et al., 2005, Science 308, 1284
- 19) Nagataki S., et al., 1997, ApJ 486, 1026
- 20) Maeda K., Nomoto, K., 2003, ApJ 598, 1163
- 21) Tominaga N., et al., 2007, ApJ 657, L77
- 22) Wang L., et al., 2002, ApJ 579, 671
- 23) Maeda K., et al., 2006, ApJ 640, 854
- 24) Maeda K., 2006, ApJ 644, 385
- 25) Maeda K., Mazzali P. A., Nomoto K., 2006, ApJ 645, 1331
- 26) Tanaka M., et al., 2007, ApJ 668, L19
- 27) Patat F., et al., 2001, ApJ 555, 900
- 28) Maeda K., et al., 2008, Science 319, 1220
- 29) Tanaka M., et al., 2009, ApJ 699, 1119
- 30) Maeda K., et al., 2007, ApJ 666, 1069
- 31) 田中雅臣, 2010, 天文月報 103, 53
- 32) Kawabata K., et al., 2010, Nature 465, 326
- 33) Maeda K., et al., 2010, ApJ 708, 1703
- 34) Maeda K., et al., 2010, ApJ 712, 624
- 35) Maeda K., et al., 2010, Nature 466, 82

## Supernovae Are Not Round: A Key to the Explosion Mechanism

Keiichi MAEDA

*Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (IPMU), University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan*

**Abstract:** The shape of supernovae is a key to solving a long-standing mystery regarding their explosion mechanism. Asymmetric explosions, although theoretically suggested in recent years, have not been identified observationally. We tackled the problem by a combination of multi-dimensional radiation transfer calculations and intensive observations with the Subaru telescope. We have shown, for the first time, that supernovae are generally asymmetric, likely bipolar. A hypernova, which is a supernova more energetic than ordinary ones, shows a larger degree of asymmetry.