

# M 51 に出現した Ic 型超新星 1994 I

山 岡 均

〈九州大学理学部物理学教室 〒810 福岡市中央区六本松 4-2-1〉

e-mail: yamaoka@rc.kyushu-u.ac.jp

大マゼラン雲の超新星 1987 A 以来、超新星の発見・研究は飛躍的に進んでいます。日本国内でも、多くのアマチュアによる超新星探索が行なわれていること、また発見後の継続的な観測が多数行なわれるようになったことなど、大きな変化がありました。今回は、りょうけん座の銀河 M 51 に出現した超新星 1994 I の研究を通じて、国内外での観測や、得られた新たな知見を紹介します。

## 1. 超新星 1994 I の発見

超新星の出現は、他の突発天体である新彗星や新星などと同じく、前触れのない現象である。将来的には、大質量星の中心で起きる鉄コアの重力崩壊が放出するニュートリノを検出し、重力崩壊で生まれる衝撃波が数日かかって星表面に達して超新星として明るく輝きはじめる前に警報を流すことができると考えられているが、少なくとも現状では超新星の予報となるものは存在しない。

したがって超新星は、次のふたつのパターンのどちらかで発見されることになる。すなわち、毎日のように決まった銀河を地道に観測して、新たな光点が現われていないか確認を繰り返す手法と、シュミットカメラなどで広視野写真を撮って、写野内に写った多数の銀河を検査して見いだす手法とである。

後者は、全天サーベイなどの他の目的で撮影した写真から偶然発見されることが多く、必ずしも撮影後すぐに検査されるというわけでもない。また、無名の暗い(遠い)銀河の暗い超新星である例がほとんどと言っていい。逆に、前者の場合は、明るい(近い)銀河を選んで観測しているから、明るい超新星が発見される期待が大きい。また、爆発後かなり早い時期に発見され、増光していくようすが見られることも多い。超新星に限らず天体

現象の理解には、できるだけ長期間の、できるだけくわしい観測が不可欠であるから、前者の手法によって発見される超新星は、超新星研究に大きな貢献を果たすことになる場合が、後者に比べて極めて多い。

超新星 1994 I は、この前者のパターンで発見されたものだ。母銀河である M 51 は、どなたもご存じの通り、「子持ち銀河」の名で親しまれている立派な渦巻銀河で、その姿は非常に印象的だ(図 1 左)。有名な銀河だから、多くの超新星探索者がチェックリストに入れていたようで、この超新星は、発見報告日である 1994 年 4 月 2 日(世界時)中に、全世界で 7 件の独立発見が報告されている。3 月 31 日に撮影された写真から独立発見した 1 人を加えて、8 チームが発見したことになる(表 1)。眼視と CCD による発見が 3 件ずつ、写真によるものが 2 件だが、眼視・CCD のものは観測から報告、掲載がスムーズなのに比べ、写真観測では現像や確認観測に時間がかかって、どうしても一歩遅れてしまうようだ。広い視野を撮影して探す必要がある新星とは違い、系外銀河をチェックすることで発見が期待できる超新星の場合、写真探索は多少不利なことは否めない。超新星の研究は、特に爆発直後が情報不足で今後の観測に期待が高まっていることもあるので、探索を志す方々には、発見後観測が速やかにできる眼視・CCD の利用を



図1 (左)渦巻銀河 M 51, 「子持ち銀河」の愛称で親しまれている。©日本天文学会「遙かなる宇宙へ」より。  
 (右)M 51 の中心核付近に出現した超新星 1994 I (矢印)。  
 提供：西はりま天文台/PAONET。

お勧めしたい。

また、この超新星の独立発見は、4件がアメリカ、4件が日本のものだった。非公式にはハンガリーやイギリスのアマチュア天文家の独立発見が報じられたのだが、いずれも国際天文学連合 (IAU)からは独立発見と公告されずじまいになった。日本やアメリカでは、発見報を速やかにIAUに伝える体制が確立されているが、独立発見が認

められなかった報告は、うまくIAUに届かなかったのであろう。

日本の発見者のうち、最初の通報者の串田麗樹さんは、1991年にはM 84銀河の超新星1991bgを、さらに1995年にも超新星1995Dを発見されている名うての超新星ハンターだ。この超新星1994Iの発見では、日本天文学会の天体発見功労賞を受賞している。また、藤田康英さんは、久万高原天体観測館という町立の天文台の館員で、日常の天体観望会やプラネタリウム投影のかたわら、超新星探索にいそしまれている方である。1980年代後半から自治体が設置する天文台は急速に増えたが、超新星を発見したのは自治体立の天文台では日本初である。改めて快挙を称えたい。

表1 超新星1994Iの独立発見者。報告掲載は、独立発見が認められてIAUサーキュラーに載った日付で、その順に並べた。

発見者	発見時刻 (UT)	方法	報告掲載
Puckett, Armstrong	4月2.17日	CCD	4月2日
Johnson, Millar	4月2.19日	眼視	〃
Berry	4月2.21日	CCD	〃
串田 (山梨)	4月2.66日	眼視	〃
Schwaar	4月2.27日	眼視	4月4日
藤田 (愛媛)	4月2.62日	CCD	〃
佐々木 (茨城)	3月31.58日	写真	4月7日
米沢 (奈良)	4月2.57日	写真	〃

## 2. タイプ分類と測光観測

超新星が発見されたら、まず最初に、その超新星がどのタイプに属するかが調べられる。超新星のタイプ分けは、主に分光観測によって行なわれる。可視光の領域全体をカバーする程度の広い波長域でスペクトルを撮り、顕著なラインから決めるのである。水素のラインがあればII型でなければI型、さらにI型はいくつかのラインの有無で細分類される。ところが、この分類は、超新星が最も明るい極大期のスペクトルを基に定められたものなので、1994 Iのように極大前増光中に発見された超新星のタイプ分類は、これまでに観測例が少ないこともあって混乱することが多い。

まず、発見報と同じサーキュラーに、パロマー山5m望遠鏡による分光観測が報告されている。この観測では、顕著なラインは見られず連続スペクトルに近いという内容だった。これではタイプは決められない。素早いことに発見翌日の4月3日には、Schmidtらによって別の分光観測が行なわれ、広がった水素のラインの存在が指摘された。つまりこの超新星はII型だというのである。ところがさらにその翌日、カリフォルニア大学のFilippenkoたちの分光観測では、水素のラインはあっても非常に弱いもので、ヘリウムのラインが目立つように見えたとの報告がなされた。この特徴は、水素のないI型の中でも、Ib型と分類されるものに合致する。これを受けてSchmidtたちは5日に再度分光観測を行なって、II型であるとした前の報告を取り消した。勇み足であったわけだ。

さらに話は続く。セロ・トロロ天文台のPhillipsは、過去に出現した超新星との比較から、超新星

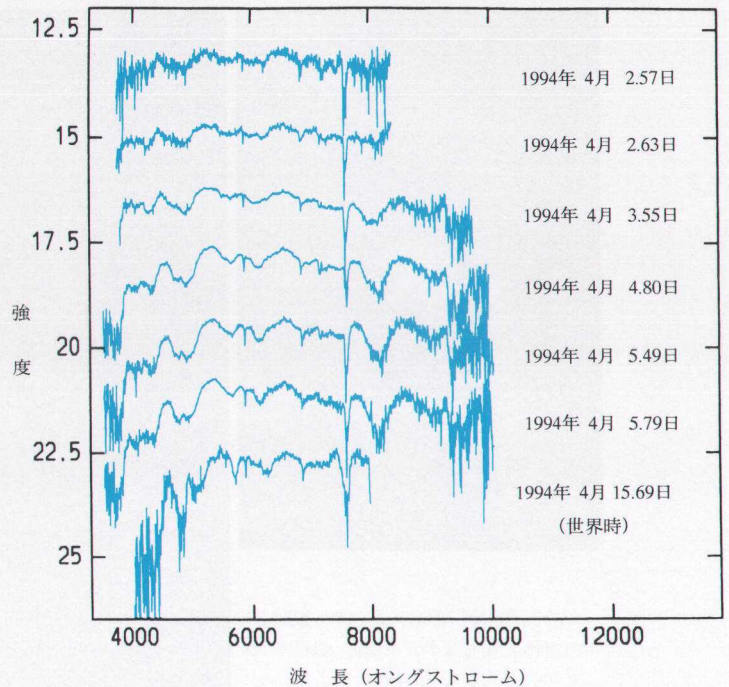


図2 超新星1994 Iのスペクトルの変化。国立天文台岡山および京都大学大宇陀観測所での観測。II型やIa型の超新星だと、もっと深いラインが見られるが、この超新星はのっぺりしている<sup>3)</sup>。

1994 Iは、ヘリウムのラインも弱いIc型ではないかとコメントした。9日には別のグループが、特異なIa型とされる過去の超新星との類似を指摘し、さらに混迷は深まった。

この混乱は、テキサス大学のグループが11日に発表した報告で、広い波長域でIc型のスペクトルと基本的に合致することを示し、最終的な結論を見た。発見からわずか10日間にさまざまな観測および憶測が飛び交い、非常にエキサイティングな状態だったといえる。Ic型という分類が提唱されてからまだ10年ほどで、過去の観測の蓄積がなかったこともあるが、先陣争いのすさまじさが顕著に現われた10日間であった<sup>1),2)</sup>。

もちろん、日本の観測家も手をこまねいていたわけではない。発見当日の4月2日から、国立天文台岡山の188cm望遠鏡がこの超新星に向けられ、分光観測が行なわれた(図2)<sup>3)</sup>。岡山の望遠鏡をはじめとしたプロ用の望遠鏡は、主にあらか

じめプロポーザルを出しておいて、認められた人が数日交替でそれぞれの目的の観測を行なうという使われ方をしているため、その観測者がたまたま分光観測をしている時でなければこのような観測はできにくい。この点でも好運に恵まれた超新星であった。

分光観測と並んで重要な超新星の観測は、超新星の明るさの測定(測光)である。いくつかの天文台で測光観測が行なわれたが、日本でも大阪教育大学の60cm望遠鏡で継続的な測光がなされている(図3)<sup>4)</sup>。図1(右)を見てもわかるように、この超新星は銀河バルジのすぐそばに出現したため、超新星に銀河本体の光が重なり、等級決定は困難だった。大阪教育大学のグループは、銀河の輝度分布を再現する2次方程式を求めて差し引くという工夫で、この困難を切り抜けている。その後このグループは、超新星1995Dや1995alの測光観測も手掛けている。同一の望遠鏡で長期に渡って超新星の測光観測を行なうと、標準星の整合性を保て、他の望遠鏡とのフィルターや受光素子の違いを整約する際の困難が避けられるため、光

度変化を精度良く追うことができる。これまではプロポーザル制のために使える望遠鏡がなかったこの種の観測が、日本国内で定期的に行なわれるようになったのは喜ばしい限りである。

### 3. 超新星1994Iの起源

ここまで観測家の大活躍を紹介してきたが、われわれ理論家も傍観していたわけではない。超新星発見後まもなくから、この超新星のスペクトルや光度曲線を説明するモデル作りにおおわらわとなったのである。

Ib型の超新星は、外層部を失った大質量星が、進化が進んで中心に鉄コアができ、熱源を失って重力崩壊して爆発したものであると考えられているが、Ic型については諸説ありはっきりしていなかった。この超新星1994Iの場合、発見の翌日に電波を放出しているのが観測され、超新星のまわりに星周物質があることがわかった。この星周物質は、爆発前の星が星風として放出したものと考えられる。すなわち、Ic型超新星も、外層を失った星の爆発ではないかと推論できる。

観測データが出そろうにつれ、光度曲線の変化が速いことが次第に明らかになってきた。毎日のように電子メールで新しい測光観測の結果が届き、それをプロットした光度曲線を更新していたのだが、発見後9日目の4月10日には実視等級Vが極大に達し、その後の減光も非常に速かった。発見前の写真などから、爆発が起きたのは3月30日以前ではないこともわかり、爆発から極大まで10日あまりという制限がついたことになる。白色矮星の爆発と考えられているIa型超新星でも、爆発から極大までは20日ほどかかるし、減光もこれほどは速くない。これをどう解釈すればよいだろうか。

超新星が光るエネルギー源は、爆発の際に合成された放射性物質の崩壊で生まれる $\gamma$ 線である。 $\gamma$ 線が可視光として見えるには、超新星爆発で飛び散り膨張している物質の中で散乱されて、熱化

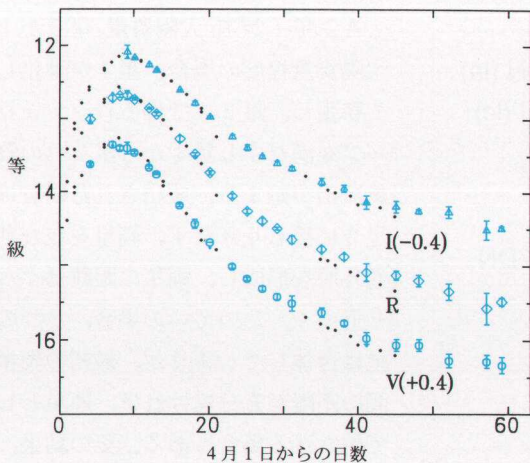


図3 超新星1994Iの光度変化。青色の大きいマークで描かれているのが大阪教育大学のグループによる観測で、小さい点は他のグループの観測。V等級とI等級はそれぞれ重ならないように縦にシフトしてある<sup>4)</sup>。

されなければならない。したがって、散乱してくる物質の量が少なくてすぐ薄くなってしまいうような場合には、散乱される $\gamma$ 線の割合が速く少なくなることになる。つまり、光度の落ちが速いのは、放出物質が少ないからだと考えられる。光度の落ち方は極大付近のピークの幅で表されるが、その幅は、ほぼ放出物質の質量に比例するのだ。

白色矮星の爆発だと、太陽質量の1.4倍の物質が放出される。それよりも放出物質が少ないとすると、大質量星の爆発とは考えにくい。しかし、生まれたときには中心部では鉄コアができるくらい重い大質量星(太陽の12倍以上)であったとしても、進化の過程で外層部を失えば、超新星爆発時の放出物質の量は少なくなる。それも、水素外層を失っただけでは足りず、ヘリウム層まで失ったとしなければこの光度の落ちは説明できない。こう考えて爆発モデルを作ってみると、図4に示すように、太陽の2.1倍の質量の炭素・酸素コアだけになった星(生まれたときに太陽の15倍の質量を持っているとこの大きさの炭素・酸素コアが得られる)が爆発すれば、中性子星となるコアを除いた放出物質の量は太陽質量の0.7倍程度となり、観測で得られた光度曲線を良く再現すること

ができる。ヘリウムのラインが弱いのも、ヘリウム層を失った星の爆発というモデルと整合する。超新星1994Iは炭素・酸素コアだけになった星の爆発だったのだ。

このモデルおよび光度曲線、そして次の章で紹介する超新星親星の進化過程をまとめて、われわれのグループは、超新星発見から1か月の5月3日に、論文を投稿した<sup>5)</sup>。理論家も負けてはいないというところである。

#### 4. 超新星が属する系の進化と運命

超新星1994Iの親星のような炭素・酸素コアだけの星というのは、どのようにして形成されるのだろうか。太陽の50倍以上の質量の星なら話は別だが、この親星のような太陽の10~20倍程度の質量の星では、星風による質量放出ではここまでやせ細ることはまず考えられない。したがって、この星は連星系を成していて、相手の星との相互作用で外層を失ったと考えるのが妥当である。

この連星系はどのような進化経路を経てきたのだろうか。連星系の誕生時に重いほうを星1、軽いほうを星2とすると、以下の3通りの進化経路が考えられる。

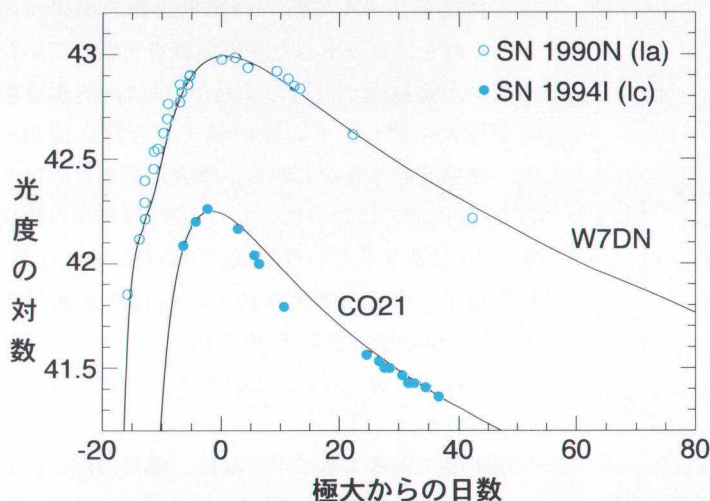


図4 超新星1994Iの理論的光度曲線。Ia型超新星(上)と比較しても急激な光度変化を、炭素・酸素コア星の爆発モデル(実線)は良く再現している<sup>5)</sup>。

A: 星1が15太陽質量、星2が1太陽質量程度の場合。星1が進化して膨張し、星2とで作るロッシュローブを満たすと星1から星2への質量流出が始まる。放出された物質は星2に積もりきれず、両星を包む共通外層を形成し、両星の距離はぐっと近づく。たいていの場合、2つの星は合体してしまうが、最初の両星間の距離が充分遠ければ、連星として生き残る場合もある。その結果、4太陽質量のヘリウム星と1太陽質量の主系列星が残る。さらにヘリウム星が膨張し、前と同様にヘリウム外層を失って、炭素・酸素コア星と

なる。

B：星2がもう少し重い（5太陽質量程度）場合。最初の質量交換では共通外層はできず、星2には星1からの物質が積もって重くなる。両星距離はそれほど近づかないまま、星1が超新星爆発を起こして中性子星が残る。あとはAの場合と、星1と星2の役割をひっくり返した経過をたどる。

C：星1、2ともに8太陽質量程度の場合。先に星1が進化して膨張し、外層を失って白色矮星になる。Bの場合と同様、星2は星1からの物質降着で重くなる。あとはBと同じ。

このような経路をたどる星系の数を、適当な仮定をもとに推定してみると、炭素・酸素コア星の爆発は、普通のII型超新星(水素外層を持つ星の爆発)の1割ほどの頻度で起きることになる。これは、観測されているIc型超新星の割合とほぼ一致していて、モデルと矛盾しない<sup>5)</sup>。モデルの正当性の傍証と言えるだろう。

炭素・酸素コア星爆発後の連星系の運命も気になるところだ。爆発直前の両星は非常に接近しているから、軌道速度も大きく、鉄コア付近での爆発の非対称性によって中性子星に付加される速度では系は壊れないことが期待される。そこで、爆発前の両星間の距離をどちらかがロッシュローブを満たしているものと仮定して計算してみると、伴星が中性子星や白色矮星なら、ほとんどの場合で期待通り系が生き残ることがわかった。高密度星どうしの近接連星系の誕生である。ところが伴星が主系列星の場合、非常に近くで爆発する超新星の放出物質の直撃を受けて遠ざかる向きの速度が伴星に与えられ、系が壊れてしまう。くわしい解析には、放出物質の衝突の詳細を調べる必要があるが、系が壊れてしまうという結論は変わらないようだ<sup>6)</sup>。

近年、近距離銀河に超新星が出現するたびに、それまで知られていなかった超新星の性質が観測され、それを理論的に説明することで超新星現象

の理解が深まるということが繰り返されてきている。超新星1994Iがもたらした新しい知見は、今後の超新星研究のみならず、星系の力学的進化や銀河の化学的力学的進化など、いろいろな分野につながるものである。単独天体の現象としては最も明るい超新星は、宇宙を照らす道しるべとなる、と言ったら手前味噌に過ぎるだろうか。

参 考 文 献

- 1) IAU circular, 5961~5972
- 2) 加藤太一 1994, 天文月報, 87(8), 345
- 3) Sasaki M., et al., 1994, PASJ, 46, L187
- 4) Yokoo, T., et al., 1994. PASJ, 46, L191
- 5) Nomoto, K., Yamaoka, H., et al., 1994, Nature, 371, 227
- 6) Yamaoka, H., 1995, in IAU Symp. 174, Dynamical Evolution of Star Clusters, in press

Type Ic Supernova 1994I in M51

Hitoshi YAMAOKA

Department of Physics, Faculty of Science, Kyushu University Ropponmatsu, 4-2-1, Ropponmatsu, Chuo-ku, Fukuoka 810

Abstract : After Supernova (SN) 1987A in Large Magellanic Cloud, the discovery of supernovae and successive research have excitingly progressed. Especially in Japan, the supernova search is preformed by a large number of the amateur astronomer, and the continuous observations come to be done by professionals. In this article, focusing on SN 1994I in M51, the new findings by the supernova observations and theories are presented.

