

# 大マゼラン雲の超新星 SN 1987A

茂山俊和\*・熊谷紫麻見\*・伊藤真之\*\*・野本憲一\*・西村 純\*\*

1987年2月23日、大マゼラン雲に超新星が出現した(表紙写真)。超新星の名前は Supernova を表す“SN”の後に出現した年の西暦をつけて、最後にその年の何番目に現れたものかを大文字のアルファベットで示すことになっている。この超新星は 1987 年の最初に現れたので、SN 1987A と名づけられた。ところで、超新星は毎年 10 数個は見つがっている。SN 1987A が話題を集めるのは、いうまでもなく 383 年ぶりにわれわれの近くに現れた超新星だからである。これまでの超新星のほとんどが数千万光年という遠くの銀河のものだったのに比べると、SN 1987A は約 15 万光年というはるかに近いところに現れたのである。383 年前には望遠鏡さえなかったが、今では地上にある大型望遠鏡ばかりでなく、人工衛星や気球を使って様々な観測が行なわれるようになった。そのおかげで今までできなかった画期的な観測が初めてできたり、より詳しい観測ができるようになった。神岡と IMB での史上初のニュートリノ・バーストの検出(天文月報第 81 巻第 1 号 4 頁参照)は重力崩壊型超新星の理論の裏付けになったし、それによって超新星爆発が起こった時刻(1987年2月23.313日)を初めて分の精度で決定できた。そのほかにも、観測をしてみると、予想外の結果がいくつかあった。そして、SN 1987A がとても個性的な超新星であることがわかってきた。どう個性的なのか、今までの超新星の分類の話から始めよう。その後の章で、観測の話や、この超新星の爆発のモデルについて話を進めていくことにする。

## 1. 超新星の分類

超新星は I 型と II 型に分類される。I 型はスペクトルに水素のバルマー線が見られないもので、II 型はバルマー線が見えるものである。爆発のメカニズムからいうと、I 型は連星中にある酸素と炭素でできた白色矮星が熱核反応の暴走をおこして、爆発したものであり、II 型は太陽の 8 倍以上の質量をもつ星が重力崩壊を引金にして、爆発したものと考えられている。II 型は赤色超巨星が爆発したというのが定説であった。大マゼラン雲に現れた超新星は水素のバルマー線がみつがっているので、II 型超新星である。しかし、後で述べるように、この超新星は青色超巨星が爆発したものであることはほぼ間違

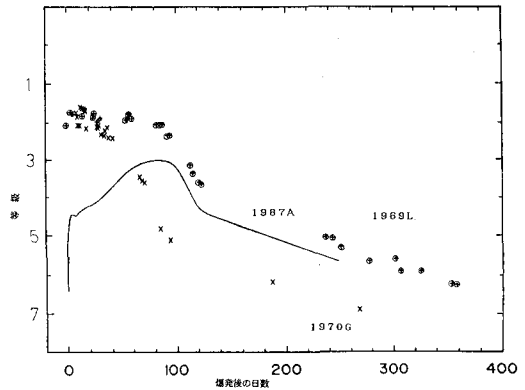


図 1 光度曲線。SN 1987A と他の II 型超新星との比較。横軸は爆発後の日数。縦軸は実視等級。実線が SN 1987A。+ と × は他の II 型超新星。(ハムイらによる)

いなく、さらに光度曲線をもみても、今まで観測された II 型超新星のどれとも似ていないきわめてユニークな存在である(図 1)。この超新星は、近くにあり、距離もかなり正確にわかっていることから、超新星爆発の際に何が起こるのか新しいことを次々と我々に教えてくれるだろう。そして超新星の教科書的存在になるかもしれない。

## 2. 光学観測と X 線観測

この超新星が最初に光学的にとらえられたのは、ニュートリノ・バーストからわずか 3 時間後のことで、写真上 6.4 等級になっていた。その後 1 日目から 10 日間ほど実視等級が 4.5 等程度であまりかわらない期間が続いた(この期間をプラトーと呼んでいる)。この明るさは典型的な II 型超新星のプラトーに比べると 20 分の 1 程度の明るさにすぎない。10 日目から 60 日目まで、光度は 1 日に 0.03 等の割合で徐々に増光してきた。今までの超新星でプラトーの後に増光したものはない。60 日目から約 30 日間、光度は 3 等級でほとんど変わらず幅の広いピークを形成した。その後の 1 カ月ほどの間にかなり急に暗くなったあと、120 日目以降は、1 日に 0.01 等級の割合でゆっくりと指数関数的に暗くなっていった。この暗くなっていく割合が放射性元素の  $^{56}\text{Co}$  が  $^{56}\text{Fe}$  に崩壊する半減期によく一致している。崩壊のときに放出される  $\gamma$  線が熱源となって、超新星を光らせていることはまちがいない。

こうして、超新星の内部には  $\gamma$  線源があることになっ

\* 東大教養 T. Shigeyama, S. Kumagai and K. Nomoto

\*\* 宇宙研 M. Itoh and J. Nishimura

Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud

た。そのうちに、この $\gamma$ 線やそれがX線にかわったものが出てくるはずだ。さらに、できたてのパルサーからもX線が出てくるだろう。超新星から出てくるX線や $\gamma$ 線を観測できる初めてのチャンスを生かすべく、日本の宇宙科学研究所のX線観測衛星“ぎんが”とソ連の科学アカデミーのX線衛星クバントの2つのグループがX線を待ち受けた。そして、“ぎんが”は8月中旬、初のX線をとらえたのである(図2)。その後の解析によると、SN 1987A からのX線は7月にはすでに受かっていた。8月中旬、9月初旬とX線の強度は増えていったが、その後は11月中旬までだいたい一定のままである。スペクトルはこれまで観測されたどのX線源のものより硬い。一方、クバントはやはり8月中旬にSN 1987A からのX線をキャッチした。このX線も非常に硬く、100 keV までのびている。

$\gamma$ 線の観測は、いくつかのグループが気球を使って行っている。今までのところ(11月27日現在)、超新星からの $\gamma$ 線を検出したという報告はなく、 $\gamma$ 線強度の上限値が報告されているだけである。(追記(その2)参照)

### 3. 爆発した星

爆発した星を同定できたのも初めてのことである。この星は、Sk-69° 202 という青色超巨星だった。光度は太陽のおよそ10万倍、有効温度が約15000 K だったことが過去の観測から知られている。したがって、半径はおよそ $3 \times 10^{12}$  cm である。

爆発を起こす前の星の明るさから、この星は主系列にいたときの質量が太陽質量の約20倍という大質量星だったことがわかった。このような大質量星が爆発する直前、その内部は化学組成の異なるいくつかの層からできている。大ざっぱに言って、内側から、鉄が多い $1.4M_{\odot}$ の層、ケイ素が多い $0.27M_{\odot}$ の層、酸素が多い $2.1M_{\odot}$ の層、ヘリウムが多い $2.2M_{\odot}$ の層、水素が多い質量 $M_{\text{env}}$ の外層(envelope)の5つの層からできている。すなわち、水素のないコアは $6M_{\odot}$ である( $M_{\odot}$ は太陽

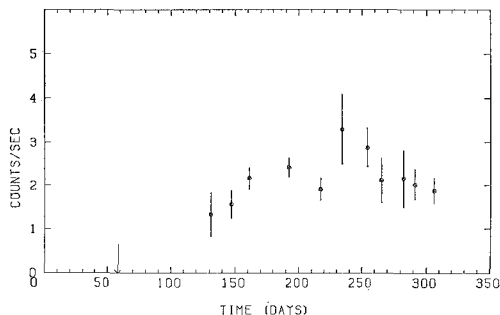


図2 “ぎんが”の観測による、10~30 keV のX線の強度変化。(ぎんがチームによる)

質量)。

水素外層の質量 $M_{\text{env}}$ は爆発するまでの進化でどれだけの質量が放出されたかで決まる。ところが、この質量放出の量は理論がまだ貧困なために推定がむずかしい。しかし、かなりの質量放出があったことをうかがわせる観測がある。超新星の周りのガスから放射されたと思われる紫外線の輝線が紫外線天文衛星 IUE によって観測されたのである。この輝線はほとんど窒素からのもので、窒素の量と炭素や酸素の量の比が太陽組成に比べてかなり大きいことを示している。それに加えて、超新星の周りがあるダストからと思われる赤外線も観測された。これらは、Sk-69° 202 がかつて、赤色超巨星になったときに恒星風によって水素の層のかなりの部分を失ったこと、それもCNOサイクルという炭素と窒素を触媒にして星の内部で起こる核反応サイクルでできた物質をも放出したことを意味する。ただ、なぜ赤色超巨星から青色超巨星へと収縮してきたのか、その理由はいままもって未解決の問題として残されている。

### 4. 爆発のモデル

このSk-69° 202 がどのような超新星爆発を起こしたのかをモデルをつくりながら考えていくことにしよう。

II型超新星爆発は鉄でできた星の中心核の重力崩壊を引金として起こる。中心部の密度が核物質の密度をこえると核子の間に働く強い斥力のために、重力崩壊が爆発に転じて、外に向かって衝撃波が伝わる。この衝撃波が星の表面に到達すると、星は急に輝きだし超新星になるというのが定説である。ところが、ここでも理論的にとりあつかうのがむずかしいために、重力崩壊が爆発に転じるメカニズムがもう一つはっきりしない。そのため、爆発のモデルを計算するにあたって、爆発のエネルギー $E$ や、爆発後にどのくらい重さの中性子星が残されるかということを仮定しなければならない。一応の標準モデルとして $E=10^{51}$  erg をとり、中性子星の質量を $1.4M_{\odot}$  とすることにしよう。外層の質量 $M_{\text{env}}$ も仮定するしかないので $6.7M_{\odot}$  とする。爆発のモデルが計算できてからSN 1987A の観測と比較することによって $E$ や $M_{\text{env}}$ の値に制限がつけられるのであろう。そうすれば、爆発のメカニズムや質量放出という現在の理論のウイークポイントになっていることがもっとよくわかるかもしれない。

そこで実際のモデル計算に入ろう。一番中心に爆発のエネルギー $E$ を与える。そうすると強い衝撃波が発生し、外側へ超音速で伝わっていく。中心付近では、衝撃波の後ろは高温高密度になって、激しい熱核反応が起こり、特にケイ素の層では放射性元素の $^{56}\text{Ni}$ が作られる。この衝撃波が表面に伝わるまでの間、各層の境界付近は

密度勾配が大きいので、衝撃波が反射したりして、星の内部の物質は複雑な運動をしている。層状に分布していた物質はかき混ぜられたにちがいない。中心付近にあった  $^{56}\text{Ni}$  も外層部にまで混ぜ合わされている可能性が大きい。

### 5. 光度曲線のモデル

衝撃波は、星の中を

$$t_{\text{prop}} \sim 2 \text{ 時間} (R_0/3 \times 10^{12} \text{ cm})(M/11.3M_{\odot})^{1/2} (E/10^{51} \text{ erg})^{-1/2}$$

だけの時間をかけて伝わり、半径  $R_0$  の表面に到着する。表面の温度は急に  $5 \times 10^5 \text{ K}$  くらいに上がり、超新星はまず強い紫外線を放射する。(超新星のまわりにあった星間物質は、数カ月後にそこに届いたこの紫外線を吸収し、あらためて紫外線や赤外線を放出したのである。)そして星は膨張し表面積をまして温度を下げ、可視光で輝き始める。ニュートリノの検出の3時間後に実視等級が 6.4 等になるためには、 $t_{\text{prop}}$  の式からわかるように、星の半径  $R_0$  は、赤色超巨星よりずっと小さくなければならない。このことだけからも、爆発した星が青色超巨星にまちがいないといえる。青い星が爆発した場合、半径の大きい赤色超巨星の爆発に比べて、内部の光がどんどん出てくるまでに、よけいに断熱膨張しなければならない。それだけ温度の下がり方も大きく、観測されたような比較的暗い超新星になってしまったのである。我々の標準モデルは図3のように光度曲線の急な立ち上がりとプラトーをよく再現することができる。

さらに膨張を続けると、星の中の温度の高い部分が透けて見えるようになってくる。このころになると、放射性元素の崩壊で出てくる  $\gamma$  線からの光がだんだんと表面に出てくる。どのようにして  $\gamma$  線が可視光へとかわっていくのだろうか。

$^{56}\text{Ni}$  が崩壊してできた  $^{56}\text{Co}$  は、 $\beta$  崩壊して  $^{56}\text{Fe}$  になるときに、数百~数千 keV のエネルギーの間でいくつかのエネルギーの line  $\gamma$  線を放出している。最も強い  $\gamma$  線は、847 keV のもので、以下 1238 keV, 2599 keV, 1772 keV, 1038 keV と続く。こうして発生した  $\gamma$  線は、超新星の膨張していく物質中の電子によりコンプトン散乱される。爆発から 200 日目以前では、ほとんどの  $\gamma$  線は、コンプトン散乱されてそのエネルギーの一部を失い、それを 40~50 回繰り返して 10~20 keV の X 線になる。エネルギーをもらった電子はまわりの物質を加熱し、X線の方は、鉄などの原子によって光電吸収され、再放出されて紫外線や可視光に変わるのである。

図4が我々の計算したモデルの光度曲線である。爆発から 25 日目までは衝撃波による加熱の効果で光っている。その後は放射性元素がどこまで混ぜられたかによ

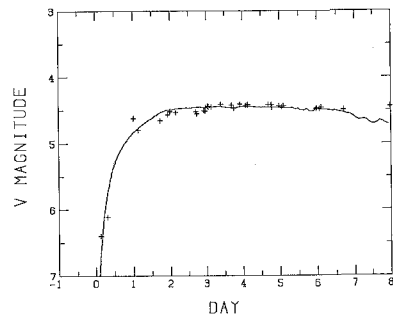


図3 SN 1987A の光度曲線。観測とモデルの比較。+が観測点。

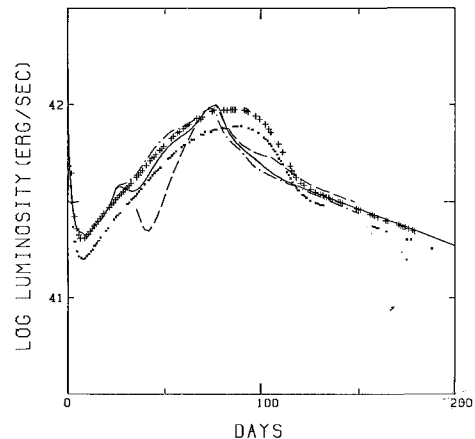


図4 SN 1987A の光度曲線。観測とモデルの比較。+と×が観測点。

て違いが現れる。 $^{56}\text{Co}$  が中心深くに集中していると、膨張の効果で一度暗くなってしまう(破線)。観測ではそのような減光はみられず、25 日目以降も明るくなり続けている。もし、 $^{56}\text{Co}$  が中心から  $6M_{\odot}$  近いところまで分布していると(一点鎖線)、 $^{56}\text{Co}$  の崩壊のときに出た  $\gamma$  線がエネルギーを失いながら拡散し光となって 25 日目までには表面に到達することができる。我々のモデルでは 75 日目ほどでピークに達する。その時の明るさは太陽の 2 億倍ほどである。

明るさのピークは爆発のエネルギーと  $M_{\text{env}}$  によって変わる。爆発のエネルギーを増やしたり、 $M_{\text{env}}$  を標準値より小さくすると、ピークの時刻が早くなりすぎて、ピークの光度も大きくなりすぎてしまう。早い時期に内部が透けて見えるようになり、熱源から出た熱が早く、熱いうちに表面に出てきてしまうからである。

計算した光度曲線と観測を比べると、ピークの幅がっていないことがすぐわかる。ピークの時期は、熱拡散のはやさ膨張のはやさが同じくらいになる。したがって、熱の輸送と物質の運動の微妙な関係から明るさが決まる。我々の簡単な輻射輸送モデルにはまだ改良の余地

があるということだろう。

120 日目以降、光度曲線は  $^{56}\text{Co}$  が  $^{56}\text{Fe}$  へと崩壊する半減期によく合う割合で下がっている。したがって、この超新星の熱源は  $^{56}\text{Co}$  で、その質量は約  $0.07M_{\odot}$  であることが一目瞭然である。この時期我々は、鉄が作られている現場を目撃していたことになる。このように、II 型超新星がどれだけ鉄を作るかがわかったのは、初めてのことである。

また、爆発モデルの  $E$  と  $M_{\text{env}}$  は  $E/M_{\text{env}}=1.5 \pm 0.5 \times 10^{50} \text{ erg}/M_{\odot}$  の程度であれば光度曲線や膨張速度などの観測事実を比較的良好に説明できることがわかった。

### 6. コバルトからの核 $\gamma$ 線と X 線

時間がたつにつれて、 $\gamma$  線が表面に出るまでの散乱回数が減ってくるので、高エネルギー X 線や、 $\gamma$  線の強度も増えてくる。このようにして、超新星の表面からは、核  $\gamma$  線を起源とした X 線や  $\gamma$  線が出てくるのである。

中心部にある  $^{56}\text{Co}$  の  $\beta$  崩壊で発生した  $\gamma$  線が、周囲の物質と相互作用しながら表面にでてくるまでの過程を、モンテ・カルロ法でシミュレーションしてみた。ただし、中心の  $^{56}\text{Co}$  の崩壊で出てくる  $\gamma$  線は、放出の確率が 10% 以上の、上記の 5 本の line に限った。実際、1 回の崩壊で放出される  $\gamma$  線は、2.88 個で、その平均のエネルギーは 1.24 MeV であるから、この 5 本を考えれば十分である。このシミュレーションをもとにして、スペクトルの時間変化を考えてみよう。

150 日目から 200 日目では、 $\gamma$  線はコンプトン散乱でエネルギーを失って水素の層に達するころには大部分が X 線になっている。この時期の X 線と  $\gamma$  線のスペクトルがどんな形になるか、シミュレーションの結果 (図 5) を観測と比べながら考えてみよう。光子のエネルギーが電子の静止質量に比べて小さいとき、光子が一回の散乱で失う平均のエネルギーは、はじめのエネルギーに比例している。そこで、表面に出てくる光子のスペクトルは、光電吸収の効かない 20 keV 以上で、エネルギーの約  $-1.4$  乗に比例している。この部分のスペクトルはクバントの観測と大変よくあっている。外側の層に重元素があるため、エネルギーが 20 keV 以下の X 線は、光電吸収を受けやすくなり、スペクトルの 20 keV 付近にはカットオフができる。また、ここに電離度の少ない鉄イオンがあるので、6.4 keV のところに、その特性蛍光 X 線がみられる。したがって、“ぎんが”の観測のような 10 keV 以下の軟らかい成分については、核  $\gamma$  線を起源としたモデルでは説明できない。これは何か他の起源による X 線、たとえば超新星の膨張している物質が、星間物質に衝突した時に出てくる熱輻射ではないかと思われる。

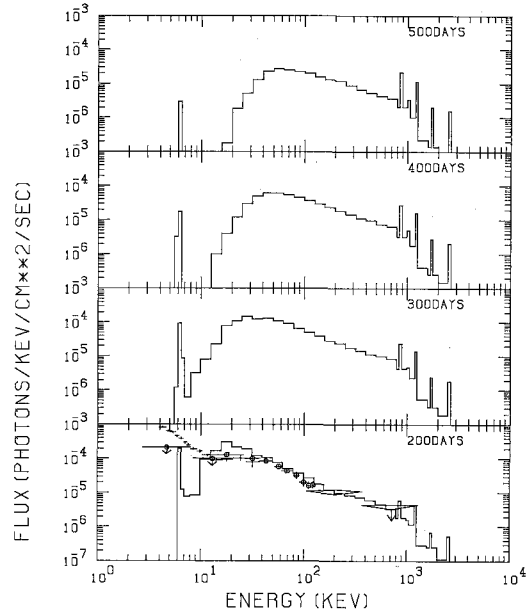


図 5 200 日から 500 日までの、X 線、 $\gamma$  線のスペクトル変化。200 日では“ぎんが”(堂谷らによる)、クバント(スニヤエフらによる)の観測と比較した。

200 日目以後は、コンプトン散乱の回数が減るので、 $\gamma$  線は低いエネルギーの X 線にならず、光電吸収を受けなくなる。高エネルギー X 線や  $\gamma$  線がふえ、スペクトルのピークはコンプトン散乱の回数だけで決まるので、時間の 2 乗に比例して高エネルギー側にずれてゆく。

超新星はどんどん膨張してやがて光学的に薄くなり、中心で発生した  $\gamma$  線はほとんどコンプトン散乱を受けずに表面に到達するようになる。ここでは  $\gamma$  線の線スペクトルがそのまま見え、X 線はもうあまり出てこない。

このような X 線や  $\gamma$  線の強度が時間とともにどう変化するかをまとめてみよう。10~30 keV の X 線および、最も強い 847 keV の  $\gamma$  線について、爆発後の光度曲線を描いてみた。図 2 は、“ぎんが”の観測による 10~30 keV の X 線の強度変化である。ここでは、光の観測から示唆された内部の物質の混合について詳しくみていくことにする。物質の混合がどの程度まで起こっているか、いろいろなモデルをつくって比較したのが図 6 である。“+”は“ぎんが”の観測であるが、はじめは、物質の混合を考えていなかったため、このように X 線が早く見え始めたことは、予想外であった。そこで、5. でも述べたように、中心から水素の層の途中まで、内部の  $6.0M_{\odot}$  を混ぜたモデルを採用してみた。 $^{56}\text{Co}$  が表面近くにある分だけ、X 線が早い時期から増光しはじめた観測を説明できることがわかった。

847 keV の  $\gamma$  線の強度は、中心にある  $^{56}\text{Co}$  の量と、コンプトン散乱の光学的深さで決まる。物質が膨張して

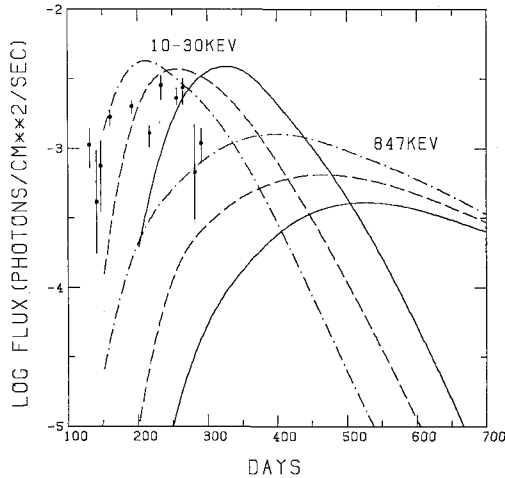


図6 シミュレーションによる、X線、 $\gamma$ 線の光度曲線。実線は、 $^{56}\text{Co}$ が中心にあるとき、破線はHe層までの物質を混ぜたとき、一点鎖線は $6M_{\odot}$ までの物質を混ぜたときのものである。

光学的に薄くなり、散乱が起りにくくなるにつれて、 $\gamma$ 線の強度が増えてくる。さらに時間がたつと、散乱は殆んど起らなくなり、 $^{56}\text{Co}$ の崩壊と同じ割合で減るようになる。

7. 今後の展開

現在までに超新星からのニュートリノ、可視光、紫外線、X線の観測が行われている。光度曲線のユニークさは、結局は爆発した星が青色超巨星だったということに帰着する。半径が小さかったためにプラトーが暗かった。そのために、ふつうのII型超新星では明るいプラトーに隠されて見ることのなかった、放射性元素による加熱の効果が見えたのである。可視光とX線の光度曲線は、この超新星で $^{56}\text{Ni}$ が作られたというモデルによって、統一的に理解することができる。今後 $\gamma$ 線が検出されれば、 $^{56}\text{Co}$ の存在が直接的に確認されることになる。4月にはアメリカのグループ、さらに秋には日本の釜江・西村グループによって、気球観測が計画されている。我々の予想どおりなら、超新星からのいろいろな核 $\gamma$ 線がほぼ確実に検出されるだろう。

こうしてみると、ニュートリノ、X線、 $\gamma$ 線と、日本の活躍が断然目をひく。我々も、“ぎんが”グループの仕事場にしょっちゅうおじゃまさせてもらい、大変エキサイティングな仕事をする事ができた。そのうちに、パルサーの兆候が見えてくるのだろう。3~5年先には、現在赤外線エコーを出しているダスト層に、爆発物質がぶつかって、強いX線と赤外線が放出されると予測されている。継続的なX線、 $\gamma$ 線の研究体制の充実がきわめて重要であることを、強調しておきたい。

追記: この原稿を編集部に送る寸前だった1987年11月25日の午前3時、テキサス大学のWheelerから野本の所に電話があった。「アンドロメダ星雲に超新星が出たというニュースが入った。日本ですぐスペクトルをとれないか。」すぐ岡山その他の天文台に連絡を取ったがすでにアンドロメダは沈みかかっていた。朝になると、ソ連からの報告として“11月21.8日、写真で11等級のpossible supernova in M31”を告げるIAUサーキュラーが東京天文台に届いていた。そして、岡山でも野辺山でも観測を準備しつつあったところへ、IAU電報が入った。「possible supernovaの近くには15等より明るい星はない。」その晩、木曾でとった写真にもそれらしきものはなかった。かくして“アンドロメダ超新星”は幻に終わったが、「すわ超新星」という時のよい予行演習になった。アンドロメダでも我々の銀河でもいつ超新星が出て不思議ではないのである。

追記(その2): 1987年12月11日付のIAUサーキュラーNo.4510によると、NASAの太陽観測衛星Solar Maximum Mission(SMM)はSN1987Aからのガンマ線を検出した。8月1日から10月31日の間のデータを足しあわせた結果、847keVと1238keV付近のフラックスの増加が有意に認められたという。 $^{56}\text{Co}$ の一部が我々のモデルで考えていたより、さらに表面近くまで混ぜられているのかもしれない。

☆ ☆

☆ ☆ ☆

