

4年たった超新星1987A

熊谷紫麻見*・茂山俊和*・山岡均*・野本憲一*

1. 超新星1987Aの出現

SN 1987Aが大マゼラン雲に出現してから、早くも4年が過ぎようとしている。この超新星は我々の銀河系に非常に近いところに出現したため、これまでに見つかったどの超新星よりも多くのことが観測され、その結果これまでの超新星爆発の理論の大筋が検証されるとともに、これまでに予想されていなかったことも発見された。

SN 1987Aはこの4年間ずっと、私たちにたくさんの話題を提供し続けてきた。ここではまず爆発後初めの2年間の研究成果を2.にまとめる。これについては、本誌1988年2月号「大マゼラン雲の超新星SN 1987A」、1989年6月号「超新星SN 1987Aの最近の話題」(また国内での成果のまとめと参考文献は文献1)に詳しいので、そちらを参照していただきたい。さらに、最近の話題を3.4.で、今後予想される展開を5.で述べる。

2. 最初の2年間

SN 1987Aはその爆発直後から、電波、赤外線、光、紫外線、X線、 γ 線、そしてニュートリノと、現在可能なあらゆる手段を用いて観測されてきた。その結果はすぐに電子メールやファックスでやりとりされ、時々刻々と変化する光度曲線によって理論の検証がほとんどリアルタイムで行われた時期もあった。

2.1 重力崩壊モデル

SN 1987AはII型超新星であった。II型超新星は、大質量星の中心に形成された鉄の中心核が重力崩壊を起こし、そこで解放されたエネルギーの99%がニュートリノとして星の外に直接放射され、その残りの1%が星の爆発のエネルギーになると考えられていた(図1)¹⁾。この理論は、KAMIOKANDEがSN 1987Aからのニュートリノを観測したことにより、見事に確認された²⁾。超新星からのニュートリノ観測は、もちろん世界初である。

2.2 青色超巨星の爆発

また、爆発前の星が同定されたのも、超新星では初めてのことである。この星は青色超巨星であることがわかり、私達を驚かせた。その後の理論的研究で、大マゼラ

ン雲内では重元素が少ないために、大質量星はいったん赤色超巨星になった後、再び収縮して青色になりうるということが確かめられた(図2)³⁾⁴⁾。また、超新星の周囲にあった星周物質からの紫外線が観測され、この観測の詳しい解析から、この星は過去に赤色超巨星であったこと、その時代に放出されたガスが超新星の光で電離されて紫外線を出していることがわかり、この進化の理論は裏付けられた。

2.3 特異な光度曲線と内部の混合

SN 1987Aは、爆発後の特異な光度変化でも私達を驚かせた。まず当初の予想ほど明るくならず、4.5等ほどの光度が1週間続いた。これは、半径の小さい青色の星が爆発したために、重力崩壊で発生した衝撃波のエネルギーのかなりの部分が爆発後の膨張に費やされたためと理解できた⁵⁾。

しかしその後2か月間は増光、1か月間は約3等の幅広いピーク、その後1か月で急激に暗くなるという光度変化は、これまでに観測されたII型超新星の光度変化とはまったく異なっていた(図3)。この間の超新星のエネルギー源は、爆発時に合成された放射性元素⁵⁶Niが崩壊するときに発生する γ 線による加熱であると考え⁶⁾、さらに超新星の内部で爆発の際に大規模な混合が起こり、その結果爆発前には星の外層にあった水素が中心付近にも多量に存在していたとすれば、光度曲線の幅広いピークは説明できることがわかった⁷⁾。

2.4 X線・ γ 線の光度変化と非一様な混合

超新星からのX線・ γ 線が観測されたのも、初めてのことである。この放射は、⁵⁶Niが崩壊してできた⁵⁶Coが、さらに半減期約77日で⁵⁶Feへと崩壊するときに発生する γ 線によるものである。X線・ γ 線ともに、初めの予想より半年も早く1987年8月に観測されたが⁸⁾、これも爆発前に起きた大規模な混合によって、⁵⁶Coが超新星の表面付近にも存在すると考えることによって説明できた(図4)⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

またX線は最初の観測の後、予想に反してその強度がほとんど変わらない状態が2年近く続いた。イタリアのグループのように、これはパルサーからのX線であるという主張もなされたが、私達はこれは超新星内部の物質混合が一樣でなく、重元素の多い領域や水素の多い領域がそれぞれ塊のようになっているためであると考え、ことでよく再現できることを示した(図4)¹²⁾。

* 東大理 Siomi Kumagai, Toshikazu Sigejama, Hitoshi Yamaoka, Kenichi Nomoto: The First 4 years of SN 1987A

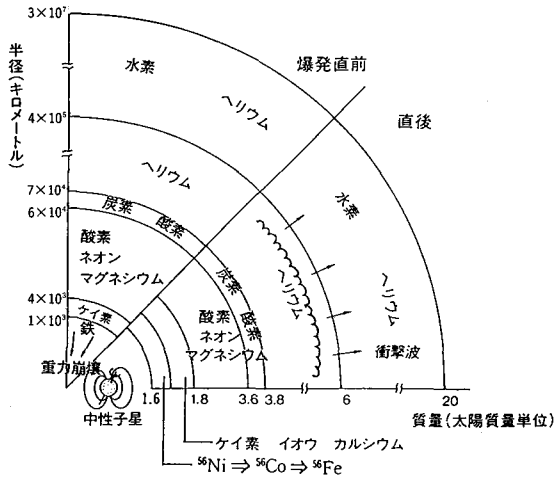


図1 爆発の直前と直後の超新星 1987A の中心部の様子。

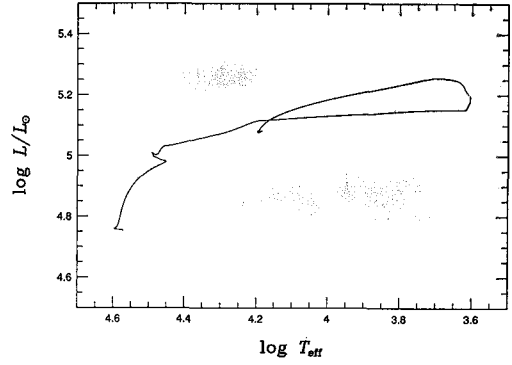


図2 SN 1987A となった星の HR 図中での進化⁴⁾。

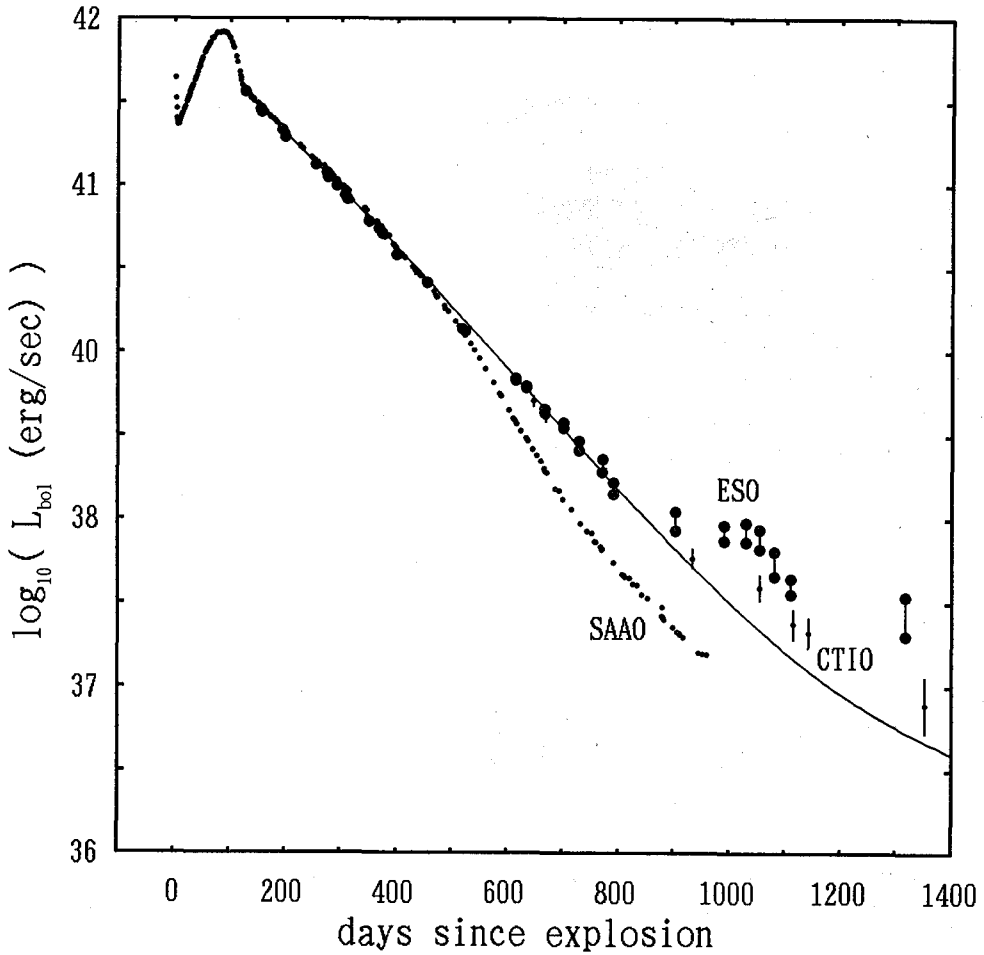


図3 SN 1987A の光度曲線。SAAO の観測は U バンドから M バンドまで、ESO, CTIO の観測は赤外線も含む。実線は ^{56}Co と ^{57}Co 起源の光の理論的強度である。

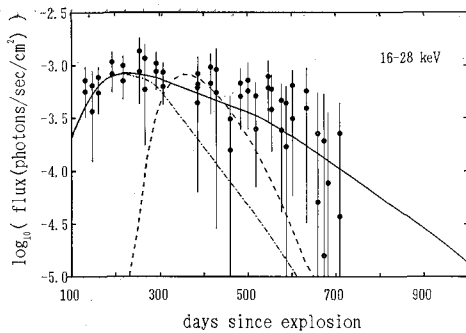


図4 SN 1987A の 16~28 keV の X 線の光度曲線。●は「ぎんが」の観測値で、点線、鎖線、実線はそれぞれ混合がない場合、一様な混合がある場合、非一様な混合の場合の理論値である¹²⁾。

3. 超新星内部の物質の混合

3.1 超新星爆発時の対流不安定

こうして、光度曲線の観測とその理論的モデルは、超新星内部で爆発的に大規模な物質混合が起こったことを強く示唆した。これは、このような観測結果がでるまではほとんど考えられていなかったことであり、超新星の理論的研究を大いに刺激した。

超新星の膨張が進んで、いろいろな元素の出す輝線が見えてくると、物質が混合されているもっと直接的な証拠がでてきた。赤外線観測された鉄イオン、コバルトイオン、ニッケルイオンの輝線のドップラー幅から、これらが 2000~3000 km/s の速さで膨張していることがわかった。⁵⁶Co の崩壊による γ 線もドップラー効果で幅を持つが、これを気球をあげて観測すると、やはりコバルトが約 3000 km/s の速さで膨張していることがわかった。一方、水素の膨張速度の最小値は 800 km/s と推定された。超新星物質は中心ほど遅く、表面ほど速く膨張しているから、こうした観測は明らかに、重元素が表面に、水素が中心部にそれぞれ運ばれたことを示している。

3.2 混合のメカニズム

このような超新星内部での非一様な混合の原因として考えられているのは、対流不安定によるものである¹³⁾。爆発前の星の内部は、中心から重い元素が層状に並んでいて、大ざっぱにいえば、高圧高密度の中心核(コア)と低圧低密度で水素の多い外層からできている。このような星の中を爆発で発生した衝撃波が通過すると、まずコアが加速され勢いよく外層にぶつかる。自動車に乗っていて急ブレーキをかけると前につんのめるように、減速されたコア中の重元素は、外へと向かう力を感じる。いわば、重力が外向きにかかる、つまり上下がひっくり返ったことになる。高密度のコアが“上”にいる状態は

対流不安定で、中心付近にあった重元素が表面付近へと“沈み”、表面付近にあった水素が中心付近に“浮き上がる”(図5)¹⁵⁾。こうして超新星の内部では物質が混合され、図6のような構造になることが数値シミュレーションで示された^{15),16)}。ただ、混合の度合いは観測で示唆されているものよりやや小さい¹⁵⁾。今後、3次元的效果¹⁷⁾や爆発自体の非球対称性¹⁸⁾の効果を調べる必要があるだろう。

4. 爆発後 500 日以降の光度曲線と固体微粒子の形成

爆発後 120 日目以降 250 日目までの観測による光の強度の上がり方は、⁵⁶Co の半減期とびたりと一致していた(図7)。爆発の理論計算からは、250 日目以降になると⁵⁶Co の崩壊のエネルギーのかなりの部分が γ 線・X 線として直接超新星から放射され(図7の $L_{X\gamma}$)、紫外から赤外までの光の強度はそれまでよりも速く下がるようになることが予想された。そして南アフリカ天文台(SAO)の観測による U バンドから M バンドまでの光の強度は、爆発後 450 日目まで理論計算で予測した通りの落ち方を見せていた¹²⁾。

ところがそれ以降は予想を大きく越えてさらに急激に

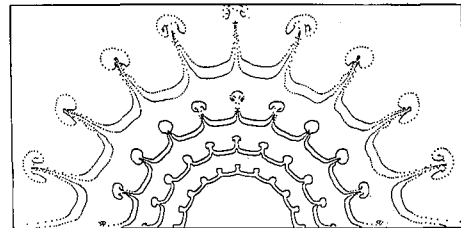


図5 爆発時の対流不安定が成長していく様子¹⁵⁾。

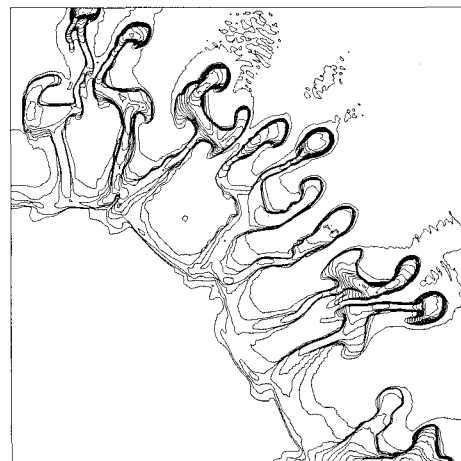


図6 爆発の際の対流不安定の成長の数値シミュレーション。等密度線が描かれていて、内側の重元素の層が外側へと伸びていることがわかる¹⁵⁾。

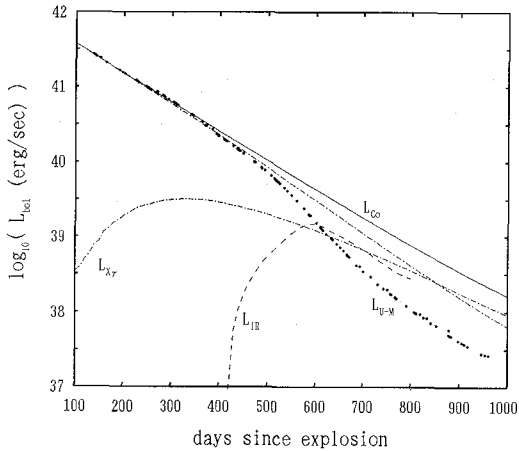


図 7 SN 1987A の U バンドから M バンドまでの ESO による観測と、理論の光度曲線。

下がり始めた。理論的モデルのごこかに欠陥があったの
 だろうか。そうではなかった。爆発後 450 日目頃から、
 超新星からの赤外線が急激に増光し(図 7 の L_{IR})、爆
 発後 600 日目頃には U バンドから M バンドまでの光
 の強度の約 80% に達していることが観測されたからで
 ある。この赤外線と U バンドから M バンドまでで観
 測されている光の強度の和は、ちょうど上の理論値に一
 致した。つまり、 ^{56}Co からのエネルギーの一部が今度は
 赤外線として放出されていたわけである。このことは、
 超新星の内部に固体微粒子が形成され、それによって
 ^{56}Co 起源の光の放射の一部が吸収されて、そのエネル
 ギーが熱輻射によって赤外線として放出されているとす
 れば、説明がつく。

固体微粒子は、超新星の内部が次第に冷却されて 1500
 ~1000K になった頃形成されることが、理論的に予測
 されていた¹⁹⁾。特に物質の混合があると重金属が酸素と
 混じりあい、酸化物の分子ができやすい。超新星物質の
 冷却にともなって、 Al_2O_3 、 Fe_3O_4 、 MgSiO_3 といった固
 体微粒子が形成され成長する。SAAO の観測で 500 日
 から 700 日目まで急に暗くなっていった時期が、この固
 体微粒子の形成・成長期間に当たる(図 7)。一方で、
 Mg, Fe, Si の輝線強度も減少しており、これは、これ
 らの原子が固体微粒子を形成したことを直接示してい
 ると考えられた。超新星でこのような固体微粒子形成が
 確認されたのは初めてのことであり、星間ダストの起源や
 隕石の同位体比異常等の問題に、新たな光を当てること
 ができるかもしれない。

5. 爆発後 900 日以降の光度曲線

固体微粒子が形成された結果、超新星からの光の大部分
 は遠赤外線て放出されることになった。1030日のスペ

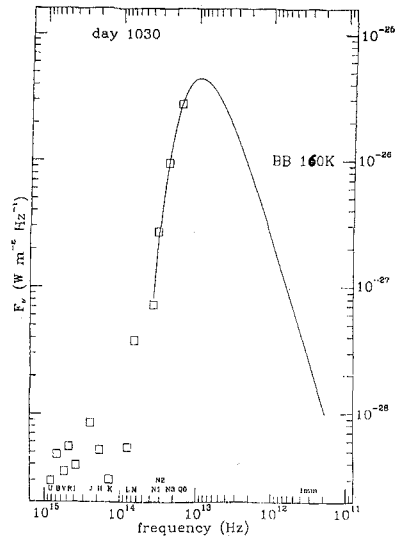


図 8 SN 1987A の爆発後 1030 日目の光学・赤外線スペ
 クトル。

クトルを黒体放射とすると、その有効温度は 160K とな
 る(図 8)。

爆発後 900 日以降の紫外線～遠赤外線 (20 μm まで)
 の光度曲線は、European Southern Observatory (ESO),
 Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO) の観
 測ともに、傾きが緩やかになってきている(図 3)。ESO
 と CTIO の観測値に違いがあって、その原因がまだ明
 らかになっていないのは困ったことだが、どちらの観測
 値をとるにしろ、 ^{56}Co の崩壊で放出される全エネルギー
 を越えており、SN 1987A に別のエネルギー源が存在す
 ることを意味している。

5.1 ^{57}Co の影響

その候補としてまず考えられたのは、爆発時に ^{56}Co
 と同時に合成される ^{57}Co である。 ^{57}Co は、量的には
 ^{57}Co の 1/240 と少ないが(標準モデル: 図 3 の実線)、
 ^{57}Fe へと崩壊する半減期が 270 日で ^{56}Co に比べて長い
 ため、爆発後時間がたつと ^{57}Co の影響が大きくなる。
 爆発後 800 日以降の光度では、 ^{57}Co からの寄与が ^{56}Co
 の 10% 以上になる。

元素合成の数値計算によれば、作られる ^{57}Co と ^{56}Co
 の比は、爆発前の条件によって多少違うが、太陽組成の
 $^{67}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ の比の 1~2.5 倍である(1.7 倍が標準モデ
 ル)²⁰⁾。SN 1987A の赤外線のコバルトの輝線強度の時
 間変化からは、 $^{56}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ の比は太陽比の 2 倍程度以下
 と推定され、またクバントによる 100 keV あたりの X
 線から求めた比の上限も 2 倍程度である。(ただしその
 誤差範囲は大きくて、もっと大きな比が許されるとい
 う人もいる。)

しかし図 9 からわかるように、ESO の観測を説明す

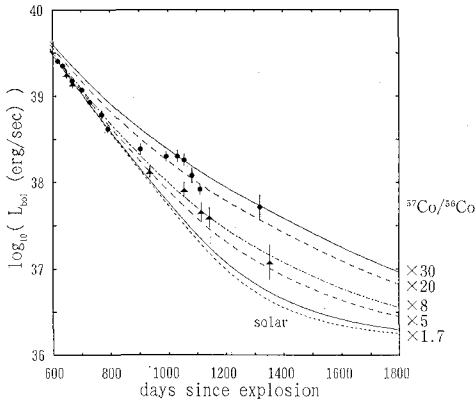


図9 SN 1987A の $^{56}\text{Co}/^{57}\text{Co}$ の、太陽組成の $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ に対する比を変えた時の理論的光度曲線と、ESO・CTIO の観測。

るためにはその値が太陽比の20倍以上、CTIOの観測でも5倍以上必要である。CTIOの人たちは、 $^{56}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ の比が太陽比の5倍だとしても、困るのは元素合成の理論屋だけだと言う。我々理論屋の方からすれば、 $^{57}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ の比がそれほど大きいと、 ^{58}Ni も大量に合成されて明らかにNiの輝線強度と矛盾するから、 ^{57}Co で光度曲線を説明するのは無理のように見える。

5.2 パルサーの存在

では、別のエネルギー源としてパルサーを考えたらどうだろうか。超新星爆発の際の重力崩壊で形成された中性子星が、どの程度の非熱的放射を出して超新星にエネルギーを与えているかは、中性子星の回転や磁場によるので何とも言えない。仮にパルサーがかに星雲のパルサーのようなX線・ γ 線を放射しているとしてみよう。光度曲線をESOの観測に強引に合わせるためには、パルサーの光度は 7×10^{37} erg/sec 程度、CTIOの観測をとると 2×10^{37} erg/sec ということになる(図10)。

このようなパルサーが存在すれば、そこからのX線が

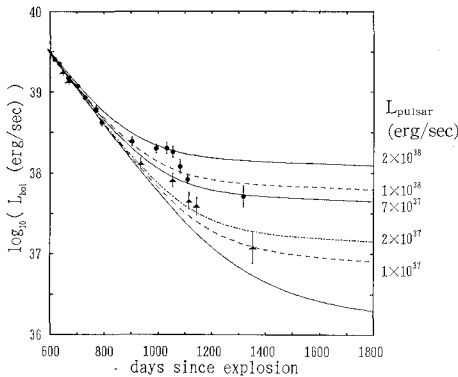


図10 SN 1987A の中心にパルサーがあると仮定し、そのエネルギー放射率を変えたときの理論的光度曲線と、ESO・CTIO の観測。

観測できないだろうか。SN 1987A からの ^{56}Co 起源の硬X線は、爆発後700日過ぎから 1×10^{-4} photons \cdot cm $^{-2}$ \cdot sec $^{-1}$ 以下になり、宇宙科学研究所の天文衛星「ぎんが」ではほとんど見えなくなってしまった。しかし、ESOの観測した光度が正しく、そのエネルギー源がパルサーならば、SN 1987A からのX線は再び強くなって、爆発後2000日程度になると観測可能になりそうである¹²⁾。それまで「ぎんが」が観測を続けて欲しいものだ。

5.3 ^{57}Co かパルサーか？

理論が予測していた超新星の生み出す2つの重要なもの、それは中性子星(あるいはブラックホール)と重元素である。SN 1987A は、ニュートリノ・バーストによって中性子星の形成を、光、X \cdot γ 線の光度曲線や輝線によって ^{56}Co その他の重元素の合成を見事に証明した。

では、900日以降の光度曲線は何を物語っているのか。もし ^{57}Co が本当に太陽組成の5倍以上もあるとすると、SN 1987A は非常に例外的な超新星ということになる。また ^{58}Ni が太陽比に近いのになぜ ^{57}Co が多くなりうるのか、元素合成理論の見直しが迫られる。いっそのこともっと半減期が長い ^{44}Ti (半減期47年)が予測の10倍以上合成されたと考えればよいという過激な論文すらでている。

^{57}Co が太陽比の5倍もあるかどうかは、昨年秋にブラジルでの放球に成功した日本の気球による硬X線観測によっておさえることができるはずである。 ^{57}Co の崩壊によって出てくる122 keVの核 γ 線の強度の観測(少なくとも上限)と予測(図11: ^{57}Co が太陽比の1.7倍としたもの)とを比べればよい。

中性子星からのエネルギー・インプットが超新星の光度に顔を出しているとすればどうなるか。ESOの光度曲線の形は、単純なパルサーモデルでは説明できない。爆発時に飛び散ることができなかったガスが中性子星のまわりにアクリションディスクを作っており、それが起こす変動を観測しているのかもしれない。この問題の決着は、超新星がさらに薄くなり、パルサーからの放射

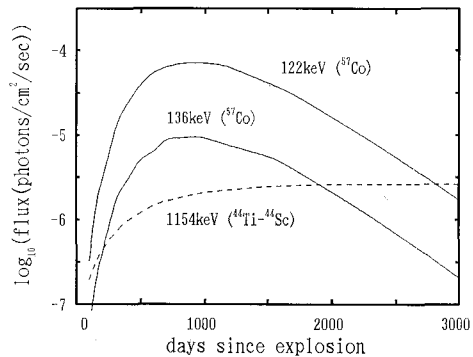


図11 ^{57}Co の崩壊から放射される核 γ 線の強度¹²⁾。

が直接観測され、パルス周期が測られるときにつくであらう。

6. 新たな問題と今後の展開

6.1 超新星のまわりのリング

最近になって、Hubble Space Telescope (HST) によって超新星のまわりに明るいリングが観測された(表紙の写真)。その半径は約 0.6 光年で、私たちはこのリングを斜めから見ていることになる。球殻ではなく「リング」であるという解釈は、そこから放射される紫外線の光度曲線の形からも支持された。このリング中のガスは、超新星からの初期の光で励起され、現在も輝線を放射しているのである。

2.2 で述べたように、このリングは爆発する前の星がいったん赤色超巨星へと進化した段階で星風として放出したガス(“赤い星風”と呼ぶことにしよう)でできている。その時にリング状にガスが放出されたということはあるだろうか。赤色超巨星のように半径の大きい星が、非常に速く回転して赤道方向からガスを放出することは、角運動量保存則からみてかなり考えにくい。そこで、赤い星風は球状に流れ出したとしよう。青色超巨星へと収縮してきたときに高速の(“青い”)星風が双極流的に吹き出して赤い星風を加速し吹き飛ばしたとすると、加速されなかった赤い星風がリング状に残されるということがあるかもしれない。実際リングの膨張速度は 15 km/s 以下と遅く、また双極流的星風の存在が ESO の地上観測で示唆されている。

SN 1987A の星周物質の形は、土星状星雲と呼ばれる惑星状星雲 NGC 7009 によく似ているといわれる。これも赤い星風と青い星風の相互作用によるものなのだろうか。とにかく HST は明るい天体のシャープな像を撮る上では極めて強力であることがこの超新星のリングではっきり示され、この発見は星からの質量放出機構や星風同士の相互作用に新たな問題を投げかけることとなった。

6.2 超新星とリングの衝突

表紙の HST による写真では、中心の超新星も分解され、そのだいたいの大きさがわかる。形がゆがんでいるのがリアルかどうかについては、今後の解析結果を楽しみに待つことにして、もう1つははっきりしていることは、このまま超新星が膨張していくと、6~7年後にはリングに衝突するということである²¹⁾。その時にはリングも超新星物質も、衝撃波によって激しく加熱され強いX線を出す(図12)²²⁾。これは宇宙科学研究所の計画している DUET やアメリカの AXAF など次世代のX線天文衛星の絶好のターゲットとなるであらう。このときにリング中に存在している固体微粒子が加熱されて強い

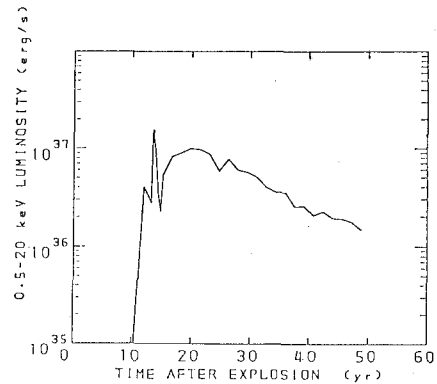


図12 超新星と星周物質との衝突によって放射されるX線光度の予測²¹⁾。

赤外線を放射するという予測もある²³⁾。

それ以前にも、星周物質との衝突が起こるかもしれない。実際に1988年1月には軟X線の強いフレアが観測された²⁴⁾、昨年7月からは超新星からの電波が観測され始め、その起源はともに塊状の星周物質との衝突と考えられている。

4年たった SN 1987A は、観測家には限界ぎりぎりの観測を要求し、理論家には新たな見直しを迫っているようである。観測は次第にむずかしくなっているが、誕生したてのパルサーや、昔の星風の様子を観測するのはいよいよこれからである。また新たな驚きをもたらされることは、まちがいないであらう。

本稿は、蜂巢泉、松田卓也、橋本正章、戎崎俊一、政井邦昭、伊藤裕、小笹隆司、長谷川博一、齋尾英行、加藤万里子の諸氏との最近の共同研究の成果に基づいている。ここに感謝したい。

参考文献

- 1) 科研費総合研究A「大マゼラン雲の超新星1987Aの総合的研究」(代表者 野本憲一) 成果報告書1990.
- 2) Hirata, K. *et al.* 1987, *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 1490.
- 3) Saio, H., Kato, M. & Nomoto, K. 1988, *Ap. J.*, **331**, 388; *Nature*, **334**, 508.
- 4) Yamaoka, H., Saio, H., Nomoto, K. & Kato, M. 1990, *IAU Symposium*, No. 143, p. 571.
- 5) Shigeyama, T., Nomoto, K., Hashimoto, M. & Sugimoto, D. 1987, *Nature*, **328**, 320.
- 6) Shigeyama, T., Nomoto, K. & Hashimoto, M. 1988, *Astr. Ap.*, **196**, 141.
- 7) Shigeyama, T. & Nomoto, K. 1990, *Ap. J.*, **360**, 242.
- 8) Dotani, T. *et al.* 1987, *Nature*, **330**, 230.
- 9) Itoh, M., Kumagai, S., Shigeyama, T., Nomoto, K. & Nishimura, J. 1987, *Nature*, **330**, 233.
- 10) Ebisuzaki, T. & Shibazaki, N. 1988, *Ap. J.*, **327**, L5.
- 11) Kumagai, S., Itoh, M., Shigeyama, T., Nomoto, K. & Nishimura, J. 1988, *Astr. Ap.*, **197**, L7.

- 12) Kumagai, S., Shigeyama, T., Nomoto, K., Itoh, M., Nishimura, J. & Tsuruta, S. 1989, Ap. J., 345, 412.
 13) Nagasawa, M., Nakamura, T. & Miyama, S. 1988, P.A.S.J., 40, 691.
 14) Ebisuzaki, T., Shigeyama, T. & Nomoto, K. 1989, Ap. J., 344, L65.
 15) Hachisu, I., Matsuda, T., Nomoto, K. & Shigeyama, T. 1990, Ap. J., 358, L57.
 16) Den, M., Yoshida, T. & Yamada, Y. 1990, P.T.P., in press.
 17) Yamada, Y., Nakamura, T. & Oohara, K. 1990, P.T.P., in press.
 18) Yamada, S. & Sato, K. 1990, Ap. J., 358, L9.
 19) Kozasa, T., Hasegawa, H. & Nomoto, K. 1988, Ap. J., 344, 325; 346, L81.
 20) Hashimoto, M., Nomoto, K. & Shigeyama, T. 1988, Astr. Ap., 210, L5.
 21) Itoh, H., Hayakawa, S., Masai, K. & Nomoto, K. 1987, P.A.S.J., 39, 525.
 22) Masai, K., Itoh, H. & Nomoto, K. 1990, ESO proceedings.
 23) 伊藤, 政井, 野本 1990, 日本天文学会秋季年会, P008.
 24) Masai, K. *et al.* 1988, Nature, 335, 804.

 お 知 ら せ

東京大学理学部天文学教育研究センター教官公募

公募人員: 助手 1名

専門分野: シュミット望遠鏡に関連した観測天文学

勤務地: 木曾観測所 (長野県木曾郡)

着任時期: 1991年4月1日以降のなるべく早い時期

提出書類: (1) 履歴書, (2) 研究歴, (3) 論文リスト,
 (4) 主要論文別刷り, (5) 研究計画

締 切: 1991年2月14日 (木) 必着

送付宛先: 〒181 三鷹市大沢 2-21-1

東大理天文センター 石田蕙一

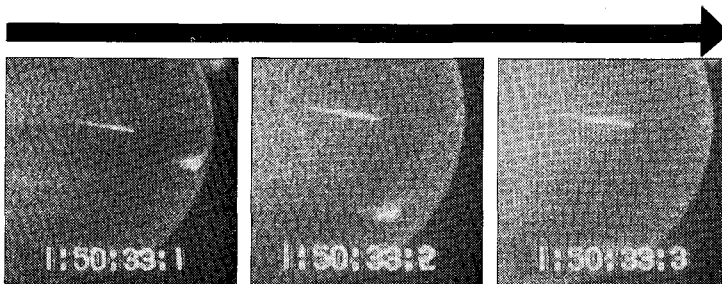
(封筒に応募書類と朱書きして, 簡易書留で
 お送り下さい)

問合せ先: 石田蕙一(電話 0422-41-3741 ダイヤルイン)



HAMAMATSU

イメージインテンシファイアで 流星を追う

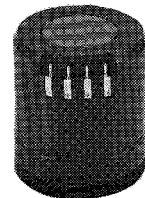


0.1秒ごとの流星のスペクトルをイメージインテンシファイアV3287Pと市販のビデオカメラによって観測しました。分光プリズムを通過した光は非常に微弱ですが、イメージインテンシファイアで増強しているため多数の輝線を認めることができます。

写真・資料ご提供 日本流星研究会 幹事 鈴木和博様

イメージインテンシファイア
V3287P

低価格を実現



レンズやビデオカメラへの接続が容易な
 筐体入りタイプも用意しております。
 お気軽にお問い合わせください。

浜松ホトニクス株式会社

電子管営業部 〒438-01 静岡県磐田郡豊岡村下神増314-5 ☎(0539)62-5245
 東京支店 ☎(03)3436-0491 大阪営業所 ☎(06)271-0441