

# 超新星 SN 1987A の最近の話題

山田良透\*・田光江\*\*

## 1. はじめに

超新星 1987A がマゼラン雲で爆発してから早くも2年がたった。この間、この超新星は多くの人々の注目を集めている。超新星は1年間に10数個から20数個も見つかっているが、この超新星 1987A が特に話題になっているのは、言うまでもなく我々の銀河系の近くで見つかったからである。大マゼラン星雲までの距離は約15万光年であり、我々の銀河系から一番近い銀河 M31 (アンドロメダ星雲) までの距離約210万光年に比べ一桁も近く、肉眼で見える超新星の出現は実に383年ぶりである。

昔と違って科学技術の飛躍的な向上により、これまで出来なかった観測手段による観測やより精度の高い観測が可能になった。KAMIOKANDE による世界初の超新星からのニュートリノバーストの観測、天文観測衛星「ぎんが」によるX線の観測や、日本、ニュージーランド、オーストラリアの共同研究である JANZOS グループでの TeV, PeV 領域の超高エネルギー  $\gamma$  線の同時観測など、日本の研究者が大いに活躍している。また、超新星 1987A の出現以来、理論家と観測家とが活発に意見を交換しながら超新星の本質に迫ろうと研究を続けるという体制を築いたことは、理論と実験とが分かれてしまった物理学の分野での研究のあり方としても画期的なことである。

最近の観測では ejecta 内でかなりの程度の物質混合 (mixing) を起こしているらしい証拠がいくつかある。この物質混合がいつどのような機構でどの程度起こったのかは、爆発前の星 (progenitor) の構造、爆発機構、ejecta の安定性等の理論に関係しており、この点は現在ホットな議論が展開されている。約1年ほど前に茂山らが本誌上で超新星 1987A をとりあげたが (第81巻第2号, 36頁), その後長沢らにより世界で初めての3次元の超新星爆発シミュレーションが行われ、ejecta が金米糖状に密度分布にむらをもっていることが示唆された (図1)。これは、球対称な構造はある主の不安定性を持つことを示しているが、このような不安定性の発生や成長は物質混合と密接な関係にあり、観測的にも物質混合を示唆する証拠が数多くある。さらにこの不安定性の問題自身が物理的に非常に応用範囲が広いことから、い

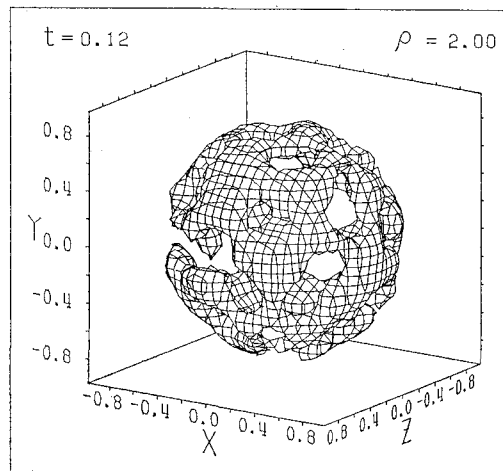


図1 超新星爆発の3次元シミュレーション結果の1例。爆発してショックが ejecta を通過した後の等密度面を示す。(長沢, 中村, 観山の論文より引用. Publ. Astron. Soc. Japan 40, 691-703 (1988))

いろな分野の研究者から注目を集めている。

この他にも質量放出や元素合成、パルサーなどの超新星残骸等興味深い話題が数多くあるが、ここでは上に述べた ejecta 内の物質混合を示す観測とこれを説明する理論モデルを中心に、最近1年間の超新星 1987A に関する話題を紹介する。

## 2. X線, $\gamma$ 線の観測

超新星が爆発すると、中心部で発生したショックは星の中を物質を加熱しながら外向きへ伝播する。ショックによる加熱で、中心近くでの温度は  $^{56}\text{Ni}$  等を生成するに十分な程度にまで上昇する。ここで生成した  $^{56}\text{Ni}$  は放射性崩壊をして約7日の寿命で  $^{56}\text{Co}$  になり、 $^{56}\text{Co}$  はさらに約111日の寿命で  $^{56}\text{Fe}$  になる。 $^{56}\text{Co}$  が崩壊するときには 847 KeV, 1238 KeV, 2358 KeV などの  $\gamma$  線が放出されるので、この  $\gamma$  線が ejecta の中で数回のコンプトン散乱によりエネルギーを下げた(コンプトン退化)硬X線,  $\gamma$  線として観測される。

このシナリオ自身は定性的にはかなり以前から知られていたものである。さっそく理論家はこのシナリオに基づいて今回の超新星ではいつどのくらいの強さのX線が観測されるかを計算し、約1年後に「ぎんが」の観測限界に近い量のX線が観測されるという予想がなされた。

しかし予想に反し、実際の観測はこれよりはるかに早く

\* 京大理 Yoshiyuki Yamada, \*\* 京大教養 Mitsue Den: Current Topics on SN 1987A

爆発後約半年で「ぎんが」は X 線を観測した。この事は何を意味するのだろうか？

物質と X 線や  $\gamma$  線等の宇宙線の反応は column density という量に依存する。これは、宇宙線が通り抜ける物質の層の単位面積当りに何グラムの物質が存在するかを表す量で、普通  $\text{g/cm}^2$  を単位として表す。column density が大きすぎると、放出された  $\gamma$  線は物質を通過する間にエネルギーを失い、やがて吸収を受けて ejecta の外へは出て来られない。一方 column density が小さすぎると十分なコンプトン退化を経られず、 $\gamma$  線はあまりエネルギーを下げずに地球に到達してしまう。「ぎんが」は数 KeV から数 10 KeV の X 線が観測可能であるから、1 MeV 程度の  $\gamma$  線が「ぎんが」で観測されるためには、約 50 回程程度のコンプトン散乱によって X 線領域までエネルギーを下げなければならない。この過程のためには適度の column density が存在し、今の場合には約  $10 \text{ g/cm}^2$  である。column density は ejecta の膨張により減少するので X 線や  $\gamma$  線の強度は初め増大して ejecta が最適な column density になったところで極大に達し、その後次第に減少していく。ejecta の column density の変化は爆発モデル、特に爆発前の星の質量と爆発エネルギーに依存し、この 2 つの量は他の観測的証拠から分かっている。従って column density の時間変化も大体おさえられていると言ってよい。今  $^{56}\text{Co}$  がほぼ中心部に分布していると仮定すれば、ejecta の層全体の厚さが約  $10 \text{ g/cm}^2$  になる時期が最も多くの硬 X 線が観測される時期ということになり、これが約 1 年なのである。

この予想に対し、「ぎんが」は約半年後に X 線を観測したわけだが、この矛盾は  $^{56}\text{Co}$  が ejecta のかなり外側にまで混ざられているという解釈をすることで解決できる。ejecta の外側の方に存在する  $^{56}\text{Co}$  にとっては ejecta の外向きへの column density は小さい。つまり  $^{56}\text{Co}$  が ejecta の外側にまで混ざられているということは実質的に column density を小さくしたことに相当する。従ってこのような  $^{56}\text{Co}$  から放出された  $\gamma$  線はあまり吸収を受けず、適当にエネルギーを落として X 線として早い時期に観測されることになるのである。当初「ぎんが」チームは、超新星からの X 線の強度が時間が経ってもあまり減少しないと発表していた。X 線強度が時間変化をしないという理論的モデルをつくることは可能ではあるが、かなり人為的に ejecta の物質分布を仮定しなければならず不自然であると思われていた。

ここで最近の観測データについて少し触れておこう。1989 年初めの「ぎんが」チームの発表によると、観測している X 線の強度は、爆発後半年あたりから減少し始めてはいるが極めてゆっくりとしており、1988 年 1 月に比べて同年 12 月には約 1/3 から 1/5 程度に減少してい

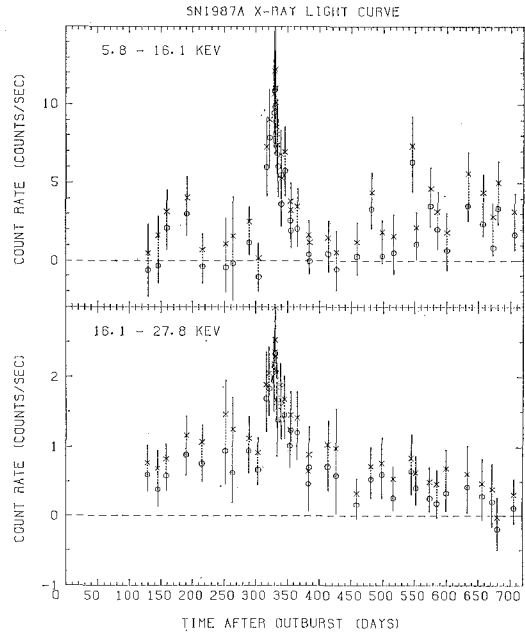


図 2 「ぎんが」による超新星 1987A からの X 線の強度変化の観測。「ぎんが」チームによる

る (図 2)。一方 X 線の観測は、ソ連の宇宙ステーション「MIR」に乗っている「Kvant」によっても行なわれており、この衛星は 20 から 120 KeV の範囲の X 線を観測できる。彼らは最近、その領域の X 線は、同じく 1988 年 1 月に比較して同年 12 月には約 1/6 に減少していると発表した。この結果は、「ぎんが」の観測と一応合っているといえる。この X 線強度の減少率は単純なモデルから予想されるよりは小さいが、不自然な仮定をなくともモデル計算から許容される範囲である。しかし不運(?)なことに大マゼラン雲には強い X 線源が多くあり、それらの寄与を分離する過程などでデータ解析には不定性が伴う。「ぎんが」及び「Kvant」の観測は多くの理論家が注目している。今後も両グループの活躍に期待したい。

### 3. 光度曲線の異常

超新星は、非常に明るく輝くことがその特徴の一つである。爆発当初から可視光の時間変化は観測され続けているが、超新星 1987A は可視光においてもユニークな特徴を見せている。光度については、ほかの超新星に比べて低かったのだが、これは爆発前の星が赤色超巨星ではなく青色超巨星であり、半径が小さかったことで説明できる。しかし光度曲線については、多くの理論家がこの超新星の爆発モデルをつくり光度曲線を再現しようとしたが、爆発後約 50 日目から始まり 100 日後程度まで続く、非常に長いプラトーを与える超新星 1987A の光

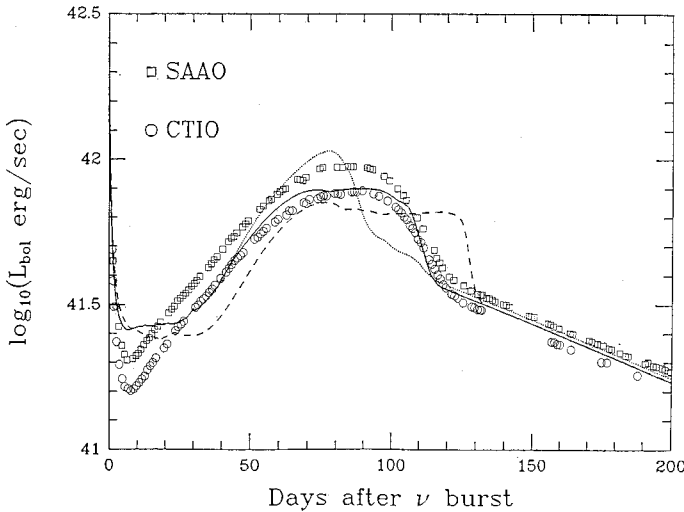


図3 超新星 1987A の光度曲線。観測とモデルの比較。□は SAAO, ○は CTIO の観測, 点線, 波線, 実線は茂山らの理論曲線。(茂山らによる)

度曲線を説明することはできなかった。

最近, 茂山らはこの機構を明らかにした(図3)。彼らの計算によれば, 爆発前には星の外層部分に存在した水素がプラトーになる以前に光球面よりも内側まで混ぜられていると, この様なプラトーが実現する。プラトーの持続時間は水素が混ぜられた程度に依存して決まる。

星の光度  $L$  は, 光球の温度  $T$  と半径  $R$  により  $R^2 T^4$  の依存性を持つ。今の場合, 光球はほぼ電離水素が再結合により水素原子になるところ (recombination front = 再結合前線) としてよい。温度が 5000 K あたりまで下がると, 水素はイオン化出来なくなり, 不透明度は急激に下がって, 効率よく星の中のエネルギーを持ち出すことが出来る。この再結合前線の半径は茂山らの計算によればプラトーの間は一定である。ejecta 中の物質は膨張しているから再結合前線からどんどん外へ流れていることになる。プラトーは光球の内側に水素がある間持続する。プラトーが超新星爆発後約 100 日程度まで持続したことから計算すると, 爆発前には ejecta の内側から  $6 M_{\odot}$  より外の部分にしか存在しなかった水素が爆発後には内側から約  $1 M_{\odot}$  の所にまで混ぜられていることが解る。またこれも ejecta 内の mixing が起こっていたことを示唆しているのである。

#### 4. そのほかの観測

最近, 赤外から  $\gamma$  線までの広い波長域で, 線スペクトルの幅が測られている。これは, 物質の混合に対しては今までの二つよりも直接的な証拠になる。この観測によると, 爆発前はほぼ中心部にあったと思われるニッケル, アルゴン等の物質は, ドップラー幅にして約 5000 km/s という非常に広い幅を持って分布している。この速度がすべて ejecta の膨張に由来するとすれば, 爆発

前は中心部から約  $M_r=0.1 M_{\odot}$  より内側に存在した物質が, 現在は殆ど ejecta の一番外側にまで混ぜ合わされていたことを示している。最近筆者の一人は中村らと  $^{58}\text{Co}$  からの  $\gamma$  線の線スペクトルのモデル計算をおこなった。コバルトからの 1238 KeV の  $\gamma$  線の線スペクトルの観測と, コバルトを中心から約  $6 M_{\odot}$  まで混ぜた場合に期待されるモデル計算例を示す(図4)。詳細は省略するが, 中心付近の速度の小さいコバルトよりも速度の大きいコバルトが多く存在しているらしいことを図から読み取ることが出来る。また, 酸素の禁制線の線スペクトルの観測によれば, ejecta は約 20 個程度の塊に分裂しているらしいことを示唆するスペクトルの形状を示している。このことは, 長沢らの数値計算結果とよく一致している。

さらに, ejecta が透き通ってくればいろいろな元素の line スペクトルが観測されて ejecta 内の物質の密度分布や速度分布に対する情報が得られるであろう。物質混合と ejecta の分裂に関する情報は, すぐに ejecta の安定性や物質混合の情報とつながるので非常に興味深い。このような物質混合を引き起こす不安定性の問題は, 星の物理のみにとどまらず, 航空機, プラズマなどショックと流体の安定性に関連するいろいろな現象に関わっている。

#### 5. 不安定性——三次元シミュレーション及び摂動計算

では, このような物質混合の原因は何であろうか? もし, 進化の途中でこのように大きな物質混合が起こったとすると星の進化自体が非常に変わったものになってしまう。このような混合は爆発時に発生するショックの前後, またはショックが ejecta を通過してしまった後になんらかの不安定性が発生したと考えるのが自然である。

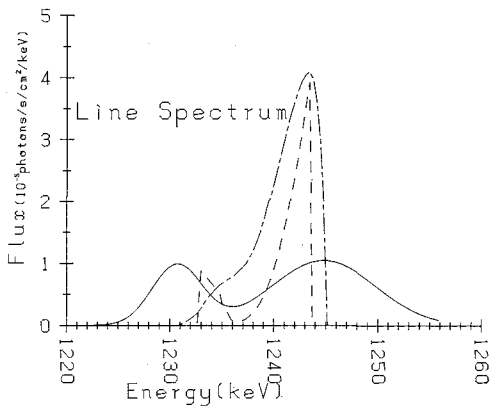


図 4  $^{60}\text{Co}$  から放出される  $\gamma$  線の線スペクトルの観測と理論計算の比較。実線は 1988 年 1 月の観測結果をガウス曲線で fitting したもので、破線と一点鎖線はモデル計算。破線は  $^{60}\text{Co}$  を球殻状に分布させたもの、一点鎖線は  $^{60}\text{Co}$  を中心付近で一様密度に分布させたもの。

今回の超新星爆発後約 1 年たって、長沢らにより初めて粒子法による 3 次元爆発シミュレーションがなされた。これによると、超新星爆発の殻は不安定であり、ejecta の膨張速度が半径に比例する「一様膨張」の段階に入るまでに ejecta は塊状のあるいは金米糖のような形状になって、7 個から 10 個に分裂する。この爆発から一様膨張の段階にはいるまでの間に、かなりの程度の物質混合が起こることが予想される。超新星爆発が起こると、ejecta は球殻状に分布して膨張していく。このような物質分布には Rayleigh-Taylor 不安定や対流不安定が生じ、これが成長して分裂することは予想されていたが、実際に数値シミュレーションによってこれが示されたのは初めてである。現在我々は、メッシュ法による同様の計算を始めており、また Bentz や Müller のグループでもこれに追隨してシミュレーションを始めている。これから幾例かの計算結果ができれば、実際に何が起きているのかも徐々に明らかになるだろう。

一方摂動法による超新星爆発殻の不安定性の解析も進められている。線型解析により、不安定性の発生が Rayleigh-Taylor 不安定と対流不安定のどちらに起因するのか、それはいつ起こるのか、それはどんな時間スケールで成長するのか、そして特徴的な波長はどれぐらいなのか等をより詳しく調べることが出来る。超新星爆発殻の場合、ショックが通過する前とその直後、そして一様膨張とおよそ三つの特徴的な段階に分けられ、各々が揺らぎの振舞いは異なる。恐らく揺らぎは、ショックの通過の際に対流不安定により不安定性が励起されて急激に立ち上がり、その後の一様膨張の段階では Rayleigh-Taylor 不安定も加わってゆっくりと成長する。従って、観測から要求されるようなかなりの物質混合を起こすのは、シ

ョックが抜ける前でなくてはならず、かなり速い時間スケールの不安定性の成長が必要となる。もしくは、もし成長が緩やかなものであれば、爆発する以前に初めから非一様になっていなければならない。また特徴的な波長としては、非球対称性のモードを球関数  $Y_{lm}$  で展開して表現すると  $l=10$  程度が最も成長が速く、超新星爆発殻は円周の 10 分の 1 程度の大きさに分裂することが予想される。この摂動計算の結果も長沢らの数値計算の結果を支持している。

さらに問題になるのは、このような不安定性の種は何かということである。星の固有振動のようなものが不安定性の成長で増幅されたのか、もしくは回転や、伴星があつてそれによって球対称からのずれの様なもの誘起されたのか等が考えられるが、これについては今のところ明らかではない。

## 6. パルサー活動など

さらに時間がたつて殻が晴れ上がると内部で活動を始めているパルサーが観測される筈である。このパルサーは、パルサーの誕生、パルサー活動、粒子加速など興味深い数々の問題に解決の鍵を与えてくれるものと期待される。パルサーの活動に関してはまだ不明なことが多い。例えば非常に高速に回転するパルサーは、ゆっくり回転するパルサーとして誕生したものがなんらかの方法で加速されたものなのか、まだ若くて余り活動が衰えていないものなのか分からない。また粒子加速がパルサーの進化の何時ごろのステージから始まるのかも、そしてパルサーの磁場がどの様に進化するのも明かでない。いろいろな理論があることはあるが、どれが実際の状況を表しているのかを決めるにはやはり観測が必要である。今回の超新星は、そのような観測を可能にするものとして期待されている。

ejecta がまだ厚いときはこのようなパルサー活動により相対論的に加速された粒子と磁場が ejecta 内に閉じ込められてキャビティーを形成すると考えられる。このとき内部からは圧力がかかり、これがキャビティーを形成している ejecta の不安定性の一つの要因にもなる。パルサーの周りの粒子加速の理論も昔からいろいろ提唱されている。実際に高エネルギーの宇宙線は存在し、 $10^{17}$  eV 程度まで粒子を加速できる候補はパルサーくらいしか考えられないが、観測的決め手に欠けるのが現状であった。

光度曲線はプラトーの終わりから 100 日程度までは  $^{60}\text{Co}$  をエネルギー源とする指数関数的減少を示していたが、爆発後 600 日くらいから光度の減少率が下がりだしたという報告もある (図 5)。これは、 $^{60}\text{Co}$  以外に新たなエネルギー源が見え出した証拠とも考えられる。も

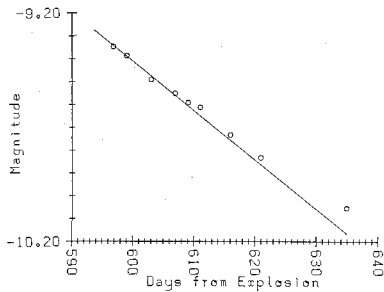


図5 ○はCTIOによる最近の超新星1987Aの光度の観測(Iバンド)。実線はそれ以前の観測データから予想される直線。

もちろん光度曲線のこの変化が何かの揺らぎであるか、新たなエネルギー源であるかを定めるにはもう少し観測をする必要がありそうだが、もし新たなエネルギー源だとするとそれはパルサー活動である可能性が大きい。さらに最近、可視域での観測から約0.5ミリ秒のパルス成分が観測されている。1987A超新星からのパルサー活動がいよいよ見えだしたのではないかと期待される。

7. まとめ

今回の超新星は、まだまだ多くの話題を提供してくれそうである。いままで非常に注目されていた<sup>56</sup>Coは半減期が短いのでこれからは強度が減少する。それにかわってこれからは<sup>57</sup>CoからのX線、γ線が注目されるだろう。これを狙った日本チームの気球観測は既にテストフライトを終えている。超高エネルギーの宇宙線はこれから地上からだけでなく大気の影響を避けることが出来る飛行機などを利用した観測も計画されている。X線やγ線の観測ではパルサーのタイミングを観測することも既に始められている。赤外線観測のグループも、超新星残骸の中でのダストの形成などに注目している。このように、可能な限りの全波長域でいろいろな視点からの観測が計画され、既に幾つかは実行に移されている。理論の側からも、今回の超新星を機会に超新星の研究は非常に活発になった。今までは星の研究の一部門であった超新星が今や天体物理学の中の一つの分野になった観がある。コンピューターの発展にともない二次元、三次元でのシミュレーションも盛んになってきた。最近注目されている ejecta の非一様性を解明するためにはどうしても球対称ではなく、二次元三次元計算が必要である。

超新星は非常に様々な現象と関連している。爆発当初は神岡でニュートリノが観測されたことで話題を呼んだ。超新星からのニュートリノは星の物理だけでなく高密度物質の物性なども深い関係があるからである。その後、X線が観測されたことで、ejecta からのX線、γ線の放出機構に関連した話題が注目を集めた。X線、γ

線放出の様子は ejecta の状態を反映しているが、この時には物質混合の可能性ということが議論された。昨年1月にはX線とTeV領域のγ線とで同時にフレアが観測され、超新星の周りにこの星が青色超巨星や赤色超巨星だった時代の名残が残っていると、爆発直後に盛んに議論された“何故青色超巨星が爆発したのか”という点も再び話題となった。最近、line spectrum の観測や長沢らのシミュレーション結果を受けて ejecta の分裂とか不安定性の成長ということが注目されているが、いまだ誕生したばかりのパルサーが話題となるうとしている。

この超新星で教訓的なことは、理論家と観測家、星の研究者と宇宙線の研究者、そのほかの多くの分野の研究者が、分野の壁を越えて一つの問題を解決しようと活発に議論してゆくことによって、それまで分からなかった多くのことが解決できたということであろう。分野を越えたノウハウの交換により、自分の分野に閉じこもってはいけなくなってきた研究が可能になった。そして、理論研究者の立場で言えばこれまでの理論研究はとかく観測によらない不変な理論が良いとされてきたのが、この超新星に関しては観測との協同により正否が判断され得る理論の重要性が認識された。この教訓は今後の天体物理学の発展に絶えず生かされるであろう。

お知らせ

山田科学振興財団派遣援助申込について

山田科学振興財団から、来日援助・派遣援助についての新しい要項が届きましたのでお知らせします。

援助名	募集開始	締切日
来日 (1990年4月～ 1991年3月分)	1989年4月1日	1989年11月30日
長期間派遣 (1990年4月～ 1991年3月分)	1989年4月1日	1989年11月30日
短期間派遣	出発月の4カ月前の15日が締切日 (例: 1989年10月出発の場合) 1989年6月15日が締切日)	

研究援助候補推薦要項及び推薦書用紙は1989年9月頃届きます。

- 募集開始 1989年9月
- 推薦期限 1990年3月31日

申込手続き等については、日本天文学会(0422-31-1359)までお問い合わせ下さい。