

超新星SN1993JのX線スペクトル ～衝撃波加熱と長期変動～

宇野伸一郎

〈日本福祉大学情報社会科学部 〒475-0012 愛知県半田市東生見町26-2〉

e-mail: uno@handy.n-fukushi.ac.jp

超新星 SN1993J と聞いて、思い出す人はどのくらいおられるだろうか。おおぐま座の M81 銀河で爆発したのは 1993 年 3 月。小さな望遠鏡でも見ることできた数少ない超新星として、実際に目にした方もいらっしゃるのではないかとと思われる。本研究は、この超新星 SN1993J を X 線天文衛星「あすか」によって長期間観測し、その X 線放射の性質を明らかにしたものである。我々は本研究により、超新星爆発初期における衝撃波の形成と伝搬の様子を観測的に初めて明らかにすることに成功した。

1. はじめに

1.1 超新星とその観測

恒星は永遠に光り続けるものではなく、星自体が進化している。この進化をざっと振り返ると以下ようになる。まず、宇宙空間にある星間ガスが集まって重力により収縮し、星として光り出す。この時に光るエネルギー源は核融合反応だ。水素をヘリウムに、ヘリウムを炭素や酸素にと核融合し、エネルギーを発生してゆくことで、星は自分の重力と釣り合いを保ちながら進化してゆく。しかし、星のもつ燃料は有限であるため、核融合はいつまでも続かない。星の中心に鉄のコアができると、鉄は核融合でエネルギーを発生できないため、反応はそこで止まってしまう。そして、星の中心にある程度鉄が溜ると、星は自分の重力を支えきれなくなって、重力崩壊を起こす。そのときの衝撃波によって、星の外層は外に向かって吹き飛ばされることになる。これは、ひとつの星がまるまる吹き飛ばすという大爆発になる。この爆発を「超新星爆発」と呼び、それが観測されたものを「超新星」といっている。その爆発は、たったひと

つの星が、銀河全体と同じくらい、明るく輝くというすさまじいもので、放出される全エネルギーは 10^{53} erg にも達する。

この超新星爆発という現象は鉄より重い重元素の合成機構として、また銀河におけるエネルギー供給源のひとつとして重要な役割を果たしている。しかし、1. 初期の爆発エネルギーはどのように宇宙空間に広がってゆくのか。2. 衝撃波の構造はどのようなになっているのか、などといった根本的な問題は、未だに解明されていない。このため、超新星爆発を直接観測することは、天文学の基本問題を探る上で非常に大切なこととされている。

しかしながら、超新星の観測では近傍での出現頻度が少ないという難点がある。我々の銀河系内ではここ 400 年来、超新星爆発は観測されていない。このため、系外銀河の超新星を観測することになるのだが、今度は距離が遠くなってしまう。最近では、一年に発見される超新星の数は数十個程度にのぼるが、そういった中でも 1000 万光年より近いところで起きるものは数年に一度程度しかない。

さらに、衝撃波内部の構造を詳しく知るには、X 線による観測が不可欠なのだが、この X 線が観測

された超新星は数えるほどしかない。その中でも、近代天文学の技術を駆使した高エネルギー分解能、高空間分解能の人工衛星によって詳細に観測することができた例は SN1987A と SN1993J のたった 2 回しかないのだ。

これらふたつの超新星のうち、SN1987A は最も近い大マゼラン星雲で爆発したもので、これまで様々な研究が行われている。ただ、SN1987A からの X 線は、爆発後 131 日目になるまで検出されなかった。一方、SN1993J では、爆発後 6 日目には X 線が検出されている。

本研究では、この爆発 6 日目に X 線の検出された貴重な超新星 SN1993J の素性に迫った。

1.2 超新星 SN1993J

超新星 SN1993J は、1993 年 3 月 28 日に近傍（距離 3.6 Mpc）銀河 M81 中に出現した超新星である。折しも、X 線天文衛星「あすか」の打ち上げ後約 1 カ月という、絶妙なタイミングで起きたもので、急いで「あすか」を SN1993J に向けたものだ。

この超新星 SN1993J は、現代天文学が発達してから 2 番目という近距離で起きたもので、超新星爆発の初期段階を観測的に解明するための大変貴重な観測対象である。特に SN1993J からは、爆発初期（6 日目）に電波・X 線双方が検出されており^{1), 2)}、このような例は過去にはない。また、爆発 12 日目には CGRO という衛星に搭載された OSSE という検出器が軟 γ 線の検出に成功している。

1.3 何故 X 線による観測が重要か

ではここで、可視光でも見える超新星をなぜ X 線で観測するのかを記しておこう。それは超新星の輻射機構によっている。

超新星爆発の衝撃波は、星周物質と放出物質がぶつかり合うことによって生じている。この「星周物質」とは、超新星爆発を起こす直前まで、その星（赤色巨星）が出していた星風によってできている。また、「放出物質」は爆発した星の外層が飛

んで来るものだ。

超新星爆発を起こすと言われる赤色巨星の星風の速度は秒速約 10 キロメートル。これに対し、超新星の膨張速度は秒速 1 万キロメートルに達する。このため、強い衝撃波が発生し、その波にぶつかった物質は熱せられ、100 keV (10^9 K) もの高温になる。そこで、この衝撃波の様子を知るためには、この 100 keV といった高エネルギーの領域をカバーする波長での観測が必要となってくる。電磁波でいうと、X 線・ γ 線といったものが、この波長に相当する。このように、X 線は衝撃波形成の直接的な結果として発生すると考えられ、超新星爆発の初期段階での X 線放射の観測は、衝撃波形成を直接観測する手段となる。

1.4 衝撃波モデル

衝撃波形成については様々なモデルが提出されているが、本質的な部分は、Chevalier (1982)³⁾ が提唱した二重衝撃波のモデルに尽くされている（図 1）。爆発により放出される物質の速度は秒速 1 万 キロメートルに達し、爆発以前にあった星周物質との間で衝撃波を形成する（前方衝撃波）。その温度は、 10^9 K = 100 keV にも達すると予測される。前方衝撃波が形成されると、それによって衝撃波面は減速され、後から来た放出物質が追突することになる。これは第 2 の衝撃波（後方衝撃波）を形成する。後方衝撃波は、密度は高いが温度は前方衝撃波より 1/10 ~ 1/100 程度低いと考えられている。前方衝撃波と後方衝撃波の間は、衝撃波形成初期に、放射冷却によって冷えた冷たい殻状の物質（冷殻）があると考えられている。

1.5 本研究以前の X 線、 γ 線の報告

では、我々の観測結果に入る前に、これまで、X 線・ γ 線のバンドにおいて、SN1993J について、どのような観測がなされてきたかを短くまとめる。X 線付近のエネルギーバンドでは、爆発当時観測が可能だった 3 つの X 線 γ 線観測衛星 CGRO、

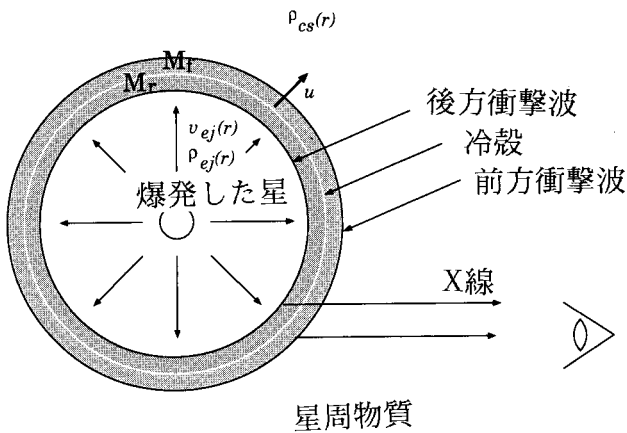


図1 超新星の衝撃波モデル

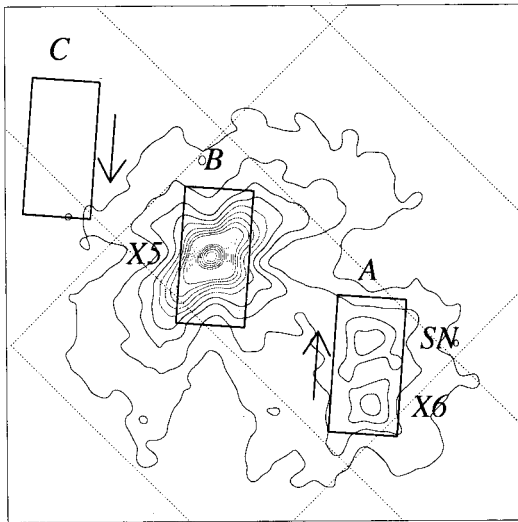


図2 「あすか」 SISによるSN1993Jのイメージ。爆発19日目。

ROSAT, そして, 「あすか」 が観測を行った。

まず, CGRO という衛星に搭載された OSSE という検出器は, 「あすか」 よりかなり高いエネルギー範囲 (50 keV–1MeV) で観測を行った⁴⁾。OSSE の報告によると, 爆発 12.5 日目の SN1993J のスペクトルは, 熱的な輻射を仮定すると 82 keV \pm 30 keV 程度であった。

またドイツの ROSAT という衛星は, 「あすか」

より低エネルギー側の 0.1–2.4 keV バンドに感度をもっており, その報告によると SN1993J 爆発初期には温度 7 keV 以上の熱的なスペクトルが観測されたそうだ。ROSAT は最初の 1 カ月程度はスペクトルの形はあまり変化が見られなかったとも言っている¹⁾。

「あすか」 は SN1993J の爆発直後からモニター観測を行っている。それらのうち最初の 7 回の観測については, 香村ら (1994)²⁾ に観測結果が発表されている。香村らは, 1. X線が「あすか」によって爆発 8 日後に観測されたと報告。2. 2–3 バンドのハードネスレシオからスペクトルを議論した。3. 「あすか」 の検出器のひとつ, GIS で鉄輝線を検出。低温成分の存在を示唆した。4. 光子数の比較からスペクトルがソフトになっていく (相対的に低いエネルギー側が強くなっていく) 様子を示した。などの報告を行った。

我々は, 香村らの方法を改善・発展させて解析を行い, 香村ら (1994) では得られなかった重要な観測結果を導くことに成功した。それは, 近傍の天体からの寄与を取り除いた SN1993J 単体の質の良い X線スペクトルの導出に成功したこと, およびスペクトル中の輝線構造を「あすか」に搭載された 2 種類の検出器で矛盾なく検出することに成功したことである。また, 香村ら (1994) の解析を行ったところに比べて観測装置の較正が進んでおり, これによる相違もあることを述べておく。

2. スペクトル (連続成分)

2.1 一次元投影法

図 2 に, 「あすか」 が撮影した SN1993J 及び近傍銀河 M81 の画像を示す。これは, 爆発 19 日後の画像である。図に見られるように, 「あすか」に

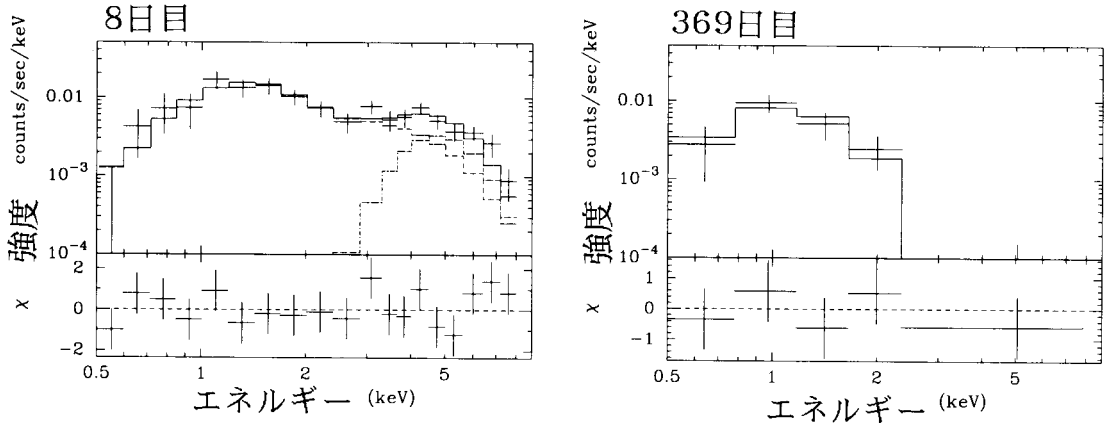


図3 一次元投影法で得られたスペクトルの例。左が爆発8日目、右が369日目。

よる SN1993J の画像は、X 線望遠鏡 (XRT) による像の広がり (PSF) のため、M81 中心核 X5 などと像が重なり合ってしまう。このため、これまでは SN1993J 単体のスペクトルを得ることは困難だった。本研究では香村らが行なった方法を系統誤差の詳しい検討などにより発展させ、過去 13 回の観測にわたる SN1993J からの X 線スペクトルを取り出すことに成功した。これにより観測史上初めて超新星の 0.5–8 keV のバンドのスペクトル変化を爆発直後から追うことができた。

スペクトル導出法の詳細は割愛するが、簡単にいうと、図 2 にあるように 3 つのボックス (A, B, C) をつくり、この中の情報を一次元に投影して、C をバックグラウンド、B を像の広がり (PSF) のモデル、として、A の投影データを他の星と分離する、という手法である。スペクトルは、この操作を統計が許す限り細かいエネルギービンで行ってゆくことで導いた。この一次元投影法によって、我々は、93 年春から 9 回の観測についてスペクトルを求めることに成功した。

2.2 モデルフィット

図 3 に一次元投影法で得られたスペクトルの例を示す。左が爆発から 8 日、右が 369 日後の

SN1993J のスペクトルである。一見しただけでその形が劇的に変わっているのがわかるだろう。これら得られたスペクトルは全て、中性元素による吸収を受けた巾関数 $E^{-\alpha}$ で再現することができた。その結果、爆発後 8 日目から 19 日目のスペクトルは、光子数の巾 α が 0.3–1.0 と非常に硬いものであることがわかった。その後、スペクトルは徐々に軟らかくなり、爆発後 369 日ごろには $\alpha = 4$ を越えるようになった。

2.3 ライトカーブと「ソフトニング」

上で見たスペクトルの変化をライトカーブで描いてみるとどうなるであろうか。図 4 に 0.5 – 2.0 keV (ソフトバンド) と 2.0 – 8.0 keV (ハードバンド) という 2 バンドのフラックスの時間変化を示す。

ライトカーブから、ソフトバンドの成分は最初のうちそれほど減衰せず、ハードバンドの方が急に減衰している様子がよくわかるだろう。ハード (エネルギーの高い) バンドが急に減衰し、ソフト (エネルギーの低い) バンドがそれほど減衰しないので、この様子を「ソフトニング」と呼ぶ。先に書いたように、超新星周辺は 100 keV という高温で、しかもあまり温度が下がらないことが知られ

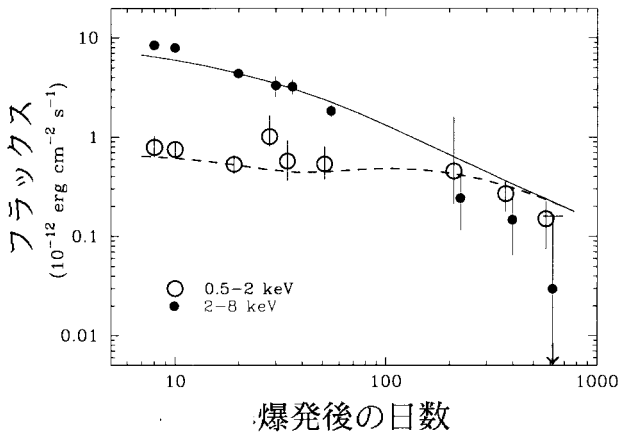


図4 SN1993Jの2バンドのライトカーブ。自己相似解モデルによって観測されたライトカーブを再現することができた。

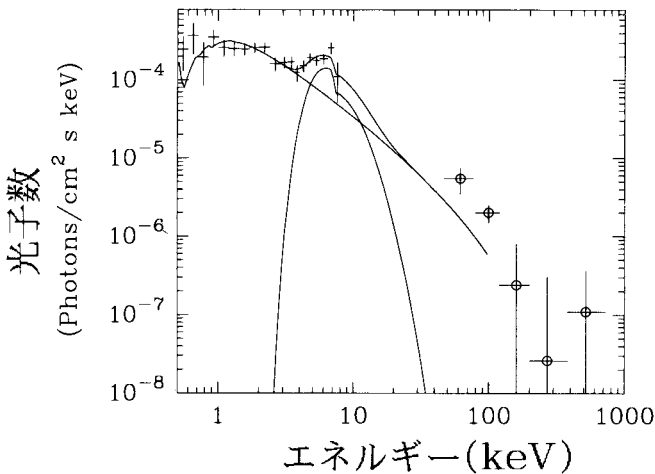


図5 OSSEと「あすか」の取得したSN1993Jのスペクトルと、あすかによるモデルカーブ。熱的なスペクトルを仮定すると、「あすか」の観測点は、軟 γ 線の観測と矛盾なくつながることがわかる。

ている。温度がほぼ一定で、強度だけ下がるのならば、スペクトルの形はそれほど変化せず、ソフトバンド、ハードバンドのX線強度は同じように減衰するはずだ。このため、この「ソフトニング」は何故起きたのかが大きな疑問点として現れてきた。

2.4 熱的な輻射

一般に超新星爆発からの輻射は熱的なものであ

ると考えられている。そこで、このことを要請し爆発初期のSN1993Jのスペクトルを、熱的な輻射（熱制動放射モデル）で再現するを試みた。しかしこれらのスペクトルは単成分の熱的な輻射では説明することができなかった。このため、熱的な輻射が2成分あるとして再現を試みたところ、今度は再現に成功した。そしてこの結果から、爆発初期のスペクトルは、 10^{23} 個水素原子/cm²の大きな水素柱密度を持つ吸収体により吸収された成分と、小さな吸収のみしか受けていない成分のふたつの成分を持たなければならないことがわかった。輻射体の温度については高吸収成分は2 keV以上、低吸収成分は20 keV以上という制限を得た。少なくとも、両方が低い温度（ \sim keV）ということは許されないのだ。

またSN1993Jのスペクトルが2成分の熱制動放射であるとする、「あすか」の結果はOSSEによる軟 γ 線の観測結果と矛盾なく接続することができた。図5にOSSEと「あすか」のデータ点、そして「あすか」によるモデルを同時に表示する。モデルのカーブが高エネルギー側（100 keV近辺）のOSSEのデータにスムーズに繋がる様子が見て取れるだろう。このように、OSSEのデータ点と矛盾が無かった事は、スペクトルが熱的なものであると考える、よいサポート材料である。

3. 鉄輝線

さて、これまでは一次元投影法による、スペクトル解析の結果であったが、ここにもうひとつの観測結果がある。それは、爆発初期のスペクトルを、近傍のM81中心核やX6といった星達と分離せずに、SN1993Jを中心とした丸い領域から選び出して導いたものである。一次元投影法は、SN1993J単体のスペクトルを求めるのに威力を発

揮するが、輝線などの細かい構造は検出できないのだ。円形領域のスペクトルを積算することで、他の星のデータが混ざったままではあるが、エネルギー分解能のよい情報を得る事ができる。この解析から、SN1993J 爆発初期のスペクトルには、6.7 keV 近辺に太い構造があることがわかった。

これまでの報告では、香村ら (1994) は観測装置のひとつである GIS のデータから、既に輝線を検出していたが、本研究ではデータ処理法を工夫することにより、もう一方の観測装置である SIS のデータからも輝線を検出することに成功した。

この輝線は、SN1993J もしくは、近傍の M81 中心核、X 6 のどれかから来たものである。そこでまず、この輝線が SN1993J から来たのかどうかを検定した。その結果、1. M81 中心核の出す輝線の強度は見積もられており⁹⁾、SN1993J の領域に洩れ込む量は、検出されたものより少ない。2. SN1993J が暗くなった後の X 6 のスペクトルには輝線が見られない。3. 輝線の強度は SN1993J と相関があるが、X 6 とは相関が無い。などといったことがわかり、輝線は SN1993J から来たものだと考えられる事がわかった。

この輝線はそのエネルギーから高電離した鉄イオンからのものと考えられる。このような輝線を出すプラズマの温度は数 keV から 10 keV と推定される。この温度は OSSE の観測が要請する温度に比べて 1/10 以上低い。このことは、OSSE が観測したものと別の低温の成分が存在する事を示している。

4. 議論：2 温度のモデル

では、以上の観測結果から、どのようなことが考えられるだろうか。X 線の連続スペクトルは吸収量の異なるふたつの熱的放射成分で説明できた。一方 OSSE の観測と鉄輝線の存在は温度の異なる (~ 100 keV と数 keV) ふたつの放射領域の存在を示していた。これらの観測結果はふたつの成分がそれぞれ前方衝撃波・後方衝撃波に伴うものであ

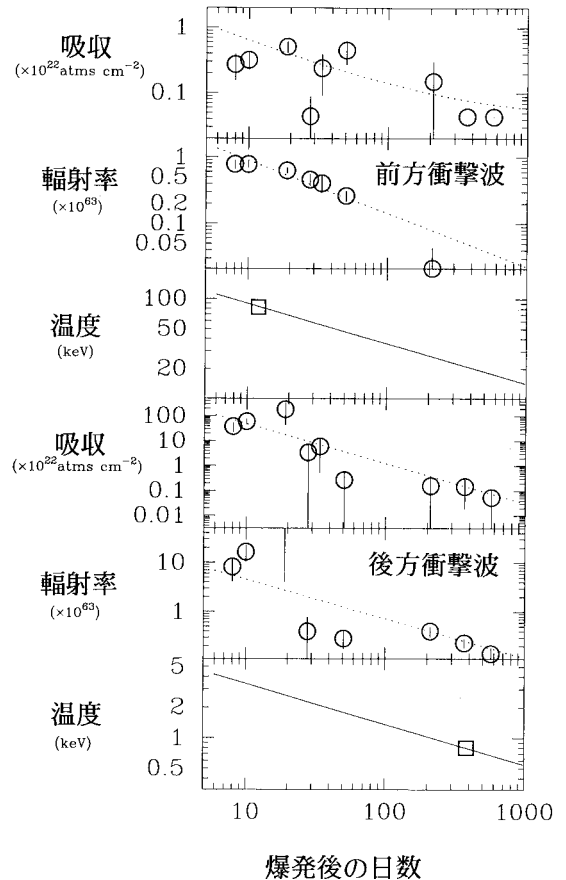


図6 自己相似解の衝撃波モデルによるフィットパラメータの時間変化。

ると考えると矛盾なく説明することができる。すなわち、前方衝撃波からの放射は、高温で吸収の少ないものであり、後方衝撃波からの放射は低温で大きな吸収を受けたものである。

我々は、前方衝撃波の温度として爆発 12.5 日後の OSSE の観測を、後方衝撃波の温度として前方衝撃波が十分弱くなったと考えられる爆発 210 日以降 3 回の「あすか」の観測をまとめたものを、それぞれ用い、この制限の中で長期のスペクトル変化が衝撃波モデルにより説明できるかを調べた。ここで、衝撃波モデルとしては Chevalier (1982) による自己相似解を用いた。これは、このモデルが単純でありながら本質を表しており、モデルパ

ラメータの意味がはっきりしているためである。我々は解から予想される温度変化を用いて、全ての観測されたスペクトルをフィットした。フリーパラメータは各成分の X 線放射光度、吸収量の時間変化である。その結果、このモデルにより観測されたスペクトルの変化が定性的に説明できることがわかった。図 6 に、フリーパラメータとモデルの時間変化を示す。

これらのパラメータを用いて、光度曲線の再現を行った。その結果が図 4 点線で、定性的によく再現できていることがわかる。特に、高エネルギーバンドの X 線強度が低エネルギーバンドに比べて早く減衰する点（ソフトニング）などをよく再現することができている。大きな疑問とされていた「ソフトニング」が起きた原因は、爆発初期には前方衝撃波が主に X 線輻射に寄与していたが、吸収体（冷殻）の厚さが減少することで、途中から後方衝撃波が輻射の主体となった、という事によるものとして説明できる。

この解析から、星間空間の物質の密度、衝撃波内に閉じ込められた冷たい物質の量などが求められた。超新星の放出物質の密度を観測的に求めたのはこの研究が初めてである。これらの値は、超新星のモデルと定性的に矛盾しなかった。

5. まとめ

本研究は、超新星爆発初期の X 線スペクトルとその時間発展を初めて明らかにした。それらは、星間物質と放出物質の間の衝撃波と、減速された放出物質と後方から追突する放出物質の間の衝撃波のふたつの衝撃波からの輻射として矛盾なく説明できる。これらの観測は、衝撃波そのものの研究のみならず、超新星爆発による物質とエネルギーの星間空間への還元などの研究にも重要な示唆を与えるものである。

謝 辞

本研究は、指導教官の榎野文命教授、満田和久助教授（共に宇宙科学研究所）をはじめとする多くの方々の御指導/御協力により完成することのできたものである。深く感謝する。また、「あすか」衛星に関わった全ての方々に感謝し、その努力に敬意を表する。最後に、私の論文に丁度よいタイミングで爆発してくれた SN1993J と、その情報を運んでくれた光子たちに「ありがとう」。

参 考 文 献

- 1) Zimmermann H.U., et al., 1994, Nature 367, 621
- 2) Kohmura Y., et al., 1994, PASJ 46, L157
- 3) Chevalier R.A., 1982 ApJ 259, 302
- 4) Leising M.D., et al., 1994 ApJ 431, L95
- 5) Ishisaki Y., et al., 1996, PASJ 48, 237

X-ray Spectrum of Supernova 1993J

~ Shock Heating and Long-Term Evolution ~
Shin'ichiro UNO
*Faculty of Social and Information Sciences, Nihon
Fukushi University 26-2 higasi haemi-cho handa,
Aichi 475-0012, Japan*

Abstract: ASCA observations of the supernova in M81, SN1993J are presented. Utilizing a one-dimensional image fitting, energy spectra of the supernova in 0.5 - 8 keV are obtained. The spectrum showed drastic softening with a power-law photon index of 0.3 to 4. The early-phase of spectra require two thermal emission components of different absorption columns, if they are fitted with thermal models. The properties of the two emission components are consistent with emissions from the front and reverse shocks of the supernova explosion. The drastic softening of the X-ray spectra is explained by decrease of the absorption column density of the reverse shock component, and the change of the major contributor to the soft X-ray band from the front to the reverse shocks.