

# 超新星からの X 線

小山 勝二

(1987 年 12 月 25 日受理)

## X-ray Emission from a Supernova

By

K. KOYAMA

**Abstract:** X-ray emission mechanisms from historical supernova remnants and SN1987A are described. In some cases, a supernova explosion produces a neutron star or a black hole. These objects provide us with a unique laboratory for the study of physics in extreme conditions. The thin thermal X-ray emission from a supernova remnant is an excellent tool for plasma diagnosis and for the study of nuclear synthesis.

星は宇宙空間のチリやガスが集まって誕生する。重力エネルギーが解放され内部が高温になると核融合反応が起こり大量の熱を放出する。一連の核融合反応が終了すると太陽のような軽い星は静かに消えて逝き白色わい星になる。中位の星は炭素や酸素まで核融合が進みその後急激に鉄にまで燃えるとき星全体を吹き飛ばすような大爆発をおこす。これを 1 型超新星と呼ぶ。重い星は鉄まで反応が進み最期に重力崩壊をおこす。外側は吹き飛び内に中性子星を残すような爆発になる。これを 2 型超新星と呼ぶ。更に重い星は外側を吹き飛ばし内にブラックホールを残す。これも 2 型超新星と呼ぶ。これら大爆発により空の一角がきゅうに明るく輝き新しい星が生まれたかに見えるため超新星と呼んでいるようだが、実は超新星とは新しい星ではなく古い星が核燃料を使い果たした後の最期の爆発に他ならない。

爆発のエネルギーは  $10^{51}$  エルグにも及ぶ。突然途方もない明るさで輝きだすためもし最も近い星 (約 4 光年) が超新星爆発を起こすと夜でも昼のように明るくなる。歴史のうえでは約 1 万光年遠方の記録が残っており 1054 年の蟹星雲や 1006 年の超新星は昼間でも見えたといわれている。大爆発のガスは高温になり大きく広がって巨大な火の玉を作り X 線を放出する。X 線観測から太陽系も 100 万年程前に起こった超新星のなか (100 万度のガスの中) にいることが分かってきた。

現在幾つくらい超新星の残骸は見つかっているのだろうか。表 1 に我々の銀河系内で確

表1 銀河系内の超新星残骸 (SNR)

Radio	146 個
Optical	43
X-ray	40 (+7? by Cinga)

表2 中心に中性子星を持つもの

Crab	パルス周期-33 ms
CTB 80	39
0540-69 (LMC)	50
Vela-X	89
RCW 89	150
G 109-1	6.9 s

認されている超新星残骸の数を示す。X線での本格的なサーベイを行なえばさらに多く見つかるはずである。事実ぎんが衛星は既にいくつかの候補をみいだしている (Koyama, private communication)。てんま衛星で発見された銀河面上の鉄ラインも未知の超新星残骸の集まりとして理解される (Koyama et al. 1986I, 1986II)。超新星残骸のサーチは超新星の発生頻度を評価する上で重要である。

超新星は大変劇的な事件のみならず、天文学、物理学にとって決定的に重要な意味を持っている。重要性は多岐にわたるが、ここでは2つのトピックスを取り上げたい。第一は超新星爆発によりときには中性子星やブラックホールが出来る、ということである。第二はいろいろな元素が作られ、宇宙空間にばらまかれることである。

中性子星やブラックホールは地上では実現出来ないような極限状態をつくり、X線観測により現代物理学の基礎、素粒子物理や相対性理論の裏付を与える事ができる。超新星が私達に与えてくれた貴重な、実験室と言える。表1のうち中心に中性子星が見つかったものを表2にしめす。今後のX線観測でもっと見つかるはずである。ぎんが衛星の主要なテーマであろう。

次に第二の問題、元素の話に移る。超新星で放出されたガスは周りのガスに衝突して高温プラズマを作り球状にX線を出す(図1のX線写真)。X線スペクトル中の特性X線の強さから元素の種類と量が推定できる。図2は、Tychoの超新星残骸からのX線スペクト



図1 チイコの超新星残骸のX線写真, 球状に広がった高温プラズマがはっきり観測されている。米国インシュタイン衛星による。

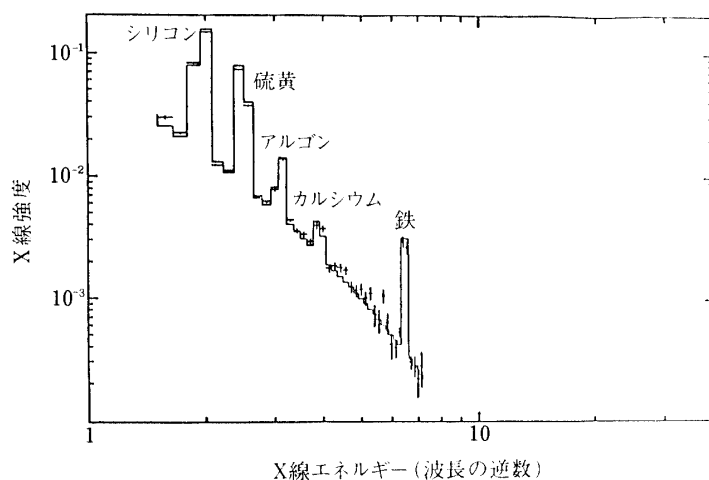


図2 タイコの超新星から X 線スペクトル，シリコン，硫黄，アルゴン，カルシウム，鉄，等主要元素の特性 X 線が観測されている。日本「てんま」衛星による。

表3 歴史上の超新星（銀河系近傍）

RCW 86	185 ?	thermal	II ?
SN 1006	1006	thermal	I
Crab	1054	pulsar (33 ms)	II
3 C 58	1181 ?	non thermal	II ?
CTB 80	1408 ?	pulsar (39 ms)	II
Tycho	1572	thermal	I
Kepler	1604	thermal	I
SN 1987 a	1987	pulsar ???	II

ルである。所々に突き出ているピークがそれぞれの元素に対応する特性 X 線で、この強から元素の量を、エネルギーから元素の種類や電離状態を知ることができる。Tycho の場合電離状態が非平衡であることが確認されそれを考慮にいれると重元素とくに鉄が over-abundant になっていることが観測的に初めて明らかになった (Tunemi et al. 1986)。表 1 に示した超新星残骸のうち X 線スペクトルが得られているものは、数例しかない。ぎんがの高い感度で多くの超新星残骸の X 線スペクトルが得られるだろう。いろいろな超新星残骸からの元素の量を計ることによって、元素がどのようにして合成されてきたかを知ることが出来る訳である。

今年 (1987 年) 2 月に我々の銀河系近くの超新星 (SN 1987 A) が出現した。大マゼラン雲の中、約 17 万年彼方である。表 3 に銀河系近傍の歴史に残された超新星のリストをしめす。SN 1987 A は Kepler 以来実に 383 年ぶりの事である。爆発の当初は放出された厚いガスに吸収され X 線は見えないが、ガスの膨張に従って段々晴れ初め超新星のなこのほう

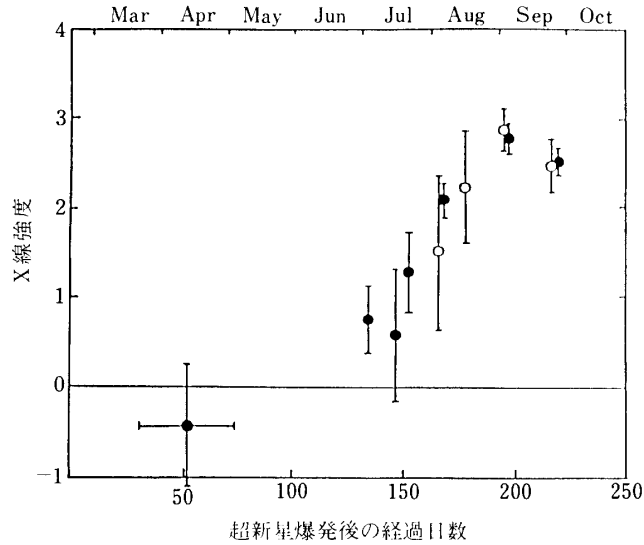


図3 SN 1987 A から X 線の強度変動, 日本「ぎんが」衛星による。

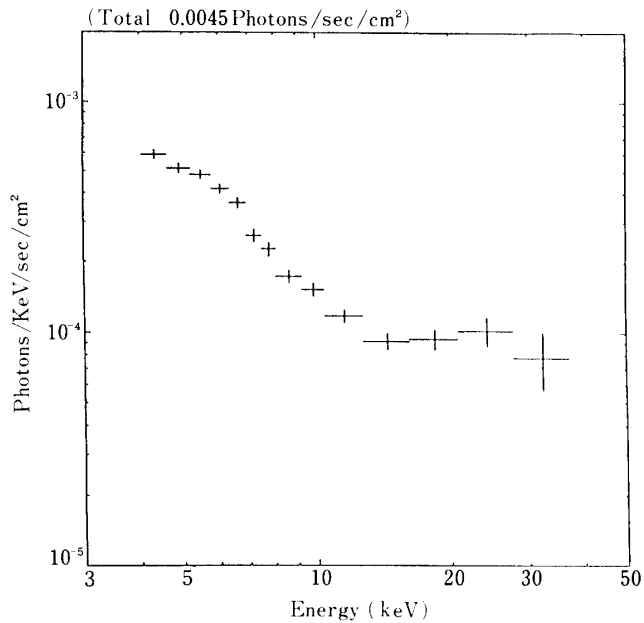


図4 SN 1987 A の X 線スペクトル. 「ぎんが」衛星による。

が見えだす。この時間から放出されたガスの量、即ち爆発のエネルギーが推定できる。この超新星からの X 線を日本の天文衛星「ぎんが」は世界で最初に発見した (Dotani et al. 1987)。続いてソ連のグループもこれを確認した (Sunyaev et al. 1987)。図3にぎんがによる X 線の強度変化をしめした。X 線スペクトルは図4にしめす。高エネルギー側は放射性同位元素 (Ni 56) からのガンマ線が散乱されて X 線になったものとして説明出来るようである (Itoh et al. 1987)。しかし低エネルギー側は puzzling である。放出ガスが既に

表4 “ぎんが”による超新星(残骸)観測の目標と意義

(1) New SNR探し	SNのrate : Galactic Ridge Emissionの起源
(2) スペクトル観測	Nuclear synthesis
(3) パルサー探し	Neutron star rate Neutron star physics
(4) SN 1987 aの監視	Total Energy Mass Nuclear synthesis Neutron star physics

thermalize しだしたのかも知れない (Masai et al. 1987).

SN 1987 A は大量のニュートリノを放出した (Hirata et al. 1987, Bionta et al. 1987). このことから内部に中性子星が作られた可能性が高い。生まれたてのエネルギー豊かな中性子星の素顔を我々人類はまだ見たことがない。それは高速回転パルサーとして X 線で見つけだせるだろう。回転スピード、その変化率、磁場の強さ、星震の有無、その頻度と規模等どれをとっても物理の本質にせまるほどに重要な課題といえる。放出されたガスは周りのガスに衝突してやがて高温プラズマを作る。高速電子は地上の実験室では実現できないようなゆっくりしたスピードで原子をイオン化してゆく。このような電離非平衡のプロセスは電子-原子の相互作用に関し我々にあらたな知見をあたえてくれよう。特性 X 線を検出することにより元素組成がわかる。高温プラズマになる時間は超新星残骸のなかの場所場所で異なる。逆に X 線スペクトルの時間変化を追っていくことにより元素組成の空間分布が分かって来るだろう。なか程重い元素が多いのだろうかそれともよくかき混ぜられているのだろうか。このように SN 1987 A の観測意義の大きさは計り知れない。神が私達に与えてくれた千載一遇のチャンスをのがすことなく出来得る限りの観測を進め情報を集めたいものである。

最後にぎんがによる超新星とその残骸からの X 線観測の意義と目標を表 4 にまとめておく。

#### 参 考 文 献

- H. Tunemi et al. *Astrophys. J.*, Vol. 306 248-254 (1987)
- K. Koyama et al. *Publi. Astron. Soc. Japan*, Vol. 38, 121-131 (1986 I)
- K. Koyama et al. *ibid* 503-509 (1986 II)
- T. Dotani et al. *Nature*, Vol. 330, No. 6145, 230-231 (1987)
- R. Sunyuev et al. *ibid* 227-229 (1987)
- M. Itoh et al. *ibid* 233-235 (1987)
- K. Masai et al. *ibid* 235-236 (1987)
- K. Hirata et al. *Phys. Rev. Lett.* Vol. 58, 1490 (1987)
- R. M. Bionta et al. *ibid* 1094 (1986)