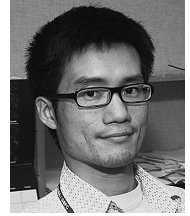


X線でとらえた超新星残骸の膨張

勝田 哲

〈X-Ray Astrophysics Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center, Code 662,
Greenbelt, MD 20771, U.S.A.〉
e-mail: satoru.katsuda@nasa.gov



高い空間分解能をもつX線天文衛星「Chandra」と「XMM-Newton」は、打ち上げ後の数年間にほとんどの明るい超新星残骸を観測した。今年で衛星打ち上げから10年経ち、初期の頃の観測と時間をあけた再観測を比較することにより、超新星残骸の膨張が詳細に観測できるようになってきた。その観測の困難さから、膨張率はこれまであまり注目されなかったのだが、しかしそれゆえ、超新星残骸を理解するうえで新たな切り口となる。本稿では、われわれが世界に先駆けて観測した結果を紹介する。

1. はじめに

宇宙は誕生以来、時々刻々変化し続けている。とは言え、ほとんどの天体は、われわれからすると途方もないような長い時間をかけてゆっくりと姿を変えているので、われわれが直接的に変化の現場を見られる場合はそう多くはない。とりわけ、天文学的な距離にある天体の運動（固有運動）をとらえられるケースは極めてまれである。

そのような静的な宇宙の中で、夜空に突如明るく輝き出す星「超新星」は、天変として昔から人々の高い関心を集めてきた。世界各地でその出現の記録が残されており、古くは中国の歴史書に記された2世紀の超新星から、ヨハネス・ケプラーに観測された西暦1604年の超新星まで数例の目撃例がある。

超新星は新しくできた星のように考えられていたが、後の研究により、実はその正反対で星が一生の最後に華々しく飛び散る大爆発現象とわかった。その莫大な爆発エネルギーのため、爆風波が何万年にもわたって周囲の星間空間に広がり続ける。その様子、まさにダイナミックに変化する宇

宙の一端が、ここ数年、X線で詳細に観測できるようになってきた。本稿では、われわれが観測した最新の結果を紹介する。

2. 超新星爆発とその残骸

超新星爆発には2種類ある。一つは太陽質量の8倍以上の重い星の爆発で、重力崩壊型と呼ばれている。このような重い星の内部では、核融合反応が進み鉄のコアが形成され、そのコアが重力でつぶれる。その結果、中心にコンパクト星（中性子星かブラックホール）を残す一方で、星を形成していた大半の物質が外に飛び出してくる。もう一つは白色矮星の爆発で、炭素爆燃型と呼ばれる。連星系にある炭素と酸素を主成分とする白色矮星に相手の星からガスが降り積もり、縮退した電子で支えられる最大の質量（チャンドラセカル質量）に近づいたときに、炭素の暴走的な核融合反応が起こり、白色矮星が木端微塵に吹き飛ばす爆発である。重力崩壊型とは違い、爆発の後にコンパクト星を残さない。

どちらの種類の爆発でも、周囲に飛び散る星の破片（以下爆発噴出物と呼ぶ）の運動エネルギー

(E) は、 10^{44} J とすさまじい。これは 2008 年の世界全体の消費電力に換算すると 10^{21} 年分、または太陽が一生 (100 億年) かけて放射するエネルギーに相当し、われわれの想像を絶する。それほどのエネルギーをもつ爆発噴出物は、高速で周囲の星間ガスを掃き集めながら膨張する。膨張速度はごく大雑把には、爆発噴出物の質量 (M) をチャンドラセカール限界質量とし、すべての噴出物が同じ速度をもつと仮定して、 $8,500 (E/10^{44})^{0.5} (M/1.4M_{\odot})^{-0.5}$ km/s と計算できる。周囲の星間空間の音速はせいぜい 20-30 km/s 程度なので、爆発噴出物の速度はそれに比べてはるかに速い。したがって、爆発噴出物が掃き集める周囲の星間物質の先端には強い衝撃波 (これが爆風波である) が形成され、そこへ取り込まれた星間物質は高温に加熱される。このようにして宇宙空間に高温プラズマ球ができ、そこからは主に X 線が放射される。われわれはそれを超新星残骸として爆発後数万年以上にわたって観測できる。

3. 超新星残骸の力学的進化

超新星の爆風波は周囲の星間物質を掃き集め高温に熱しながらものすごい勢いで周囲に広がっていく。ここでは爆風波がどのように広がっていくのか、すなわち超新星残骸の力学的進化を概観する。

a) 自由膨長期 ($R \propto t$)

掃き集められた星間物質量が爆発噴出物量に比べて小さい時期は、噴出物は減速を受けずにほぼ自由膨張する。したがって星間物質中を進む爆風波、つまり超新星残骸の半径 (R) は減速せずに以下のように時間 (t) に比例して大きくなる。

$$R \propto t$$

このとき、爆発噴出物は断熱膨張のため急激に冷える。

b) 爆発噴出物駆動期 ($R \propto t^{8/9, 4/7, \text{ or } 4/5}$)

爆発の数日後には掃き集めた星間物質の量が無視できなくなり、爆発噴出物は減速され始める。

そのため、星間物質に減速された外側の爆発噴出物に、減速されていない爆発噴出物が内側から追突して衝撃波 (内部衝撃波) を生じる。内部衝撃波に突入した爆発噴出物は再度高温に熱せられ、X 線を放射するようになる。爆風波と内部衝撃波は、ほぼそれらの半径の比を保って自己相似的に膨張することが知られている。爆風波は次の式に従って広がる¹⁾。

$$R \propto t^{(n-3)/(n-s)}$$

ここで、 n は爆発噴出物の外側の密度分布の冪、 s は星間物質の密度分布の冪である。重力崩壊型と炭素爆燃型で、 (n, s) はそれぞれ (11, 2), (7, 0) と期待されている。 $s=2$ は、爆発前に恒星風が吹いた後の空洞の環境を示し、 $s=0$ は恒星風の影響がない一様密度の環境を示す。結局、 R と t を結び冪 (膨張指数 m ; $R \propto t^m$) は重力崩壊型爆発に対して 8/9、炭素爆燃型爆発に対して 4/7 が得られる。最近、炭素爆燃型でありながら恒星風の影響を受けた環境下で爆発する超新星が見つかってきているが^{2), 3)}、その場合は 4/5 が期待されることになる。

c) セドフ期 ($R \propto t^{2/5}$)

掃き集めた星間物質の質量が爆発噴出物の 10 倍にもなると、今度は爆発噴出物の影響がほとんど無視できるようになる。このとき、爆風波は一樣媒質中に起こった点源爆発による衝撃波の伝播と見なせる。断熱膨張を仮定した場合の厳密な自己相似解がセドフ⁴⁾とテイラー⁵⁾により独立に得られており、

$$R \propto t^{2/5}$$

に従うことが知られている。このときには内部衝撃波は超新星残骸の中心に到達し、すべての爆発噴出物は再加熱されて高温プラズマ状態となっている。

d) 雪かき期 ($R \propto t^{1/3 \rightarrow 1/4}$)

衝撃波加熱された星間物質と爆発噴出物は、両者ともに X 線を放射する。そのため、徐々にエネルギーを失い、爆風波の伝播は断熱膨張を仮定す

るセドフ期の自己相似解からずれていく。放射冷却は爆風波直後の密度の濃い部分で顕著であるため、爆風波直後に冷たく密度の高い球殻が形成される。その後しばらくすると超新星残骸の膨張は、

$$R \propto t^{1/3}$$

で落ち着く⁹⁾。このとき、球殻の内部には、密度の低い爆発噴出物が詰まっている。このガスは高温だが密度が低いため、放射冷却の影響をほとんど受けず高温高压を保っている。そのため、球殻は内部のガスの圧力で膨張していると見なせる。また、球殻があたかも雪かきをするように周囲の星間物質を掃き集めるのでこの時期を「圧力駆動雪かき期」と呼ぶ。内部の圧力が低下すると、球殻は運動量保存則に従って膨張するようになる。この状態を「運動量保存雪かき期」と呼び、超新星残骸は

$$R \propto t^{1/4}$$

のように膨張する。

e) 消滅

爆風波速度が星間空間の音速程度になると、超新星残骸は周囲の星間物質に紛れその進化を終える。

以上に見たように、超新星残骸は段階を経て力学的に進化する。その進化段階は膨張指数に特徴づけられる。 $R \propto t^m$ の両辺の対数を取って時間で微分すると

$$m = (dR/dt)/(R/t)$$

が得られるので、膨張指数は結局、現在の爆風波速度 (dR/dt) と平均の爆風波速度 (R/t) の比であることが判る。

現在の速度は、超新星残骸を2度観測することで測定できる。平均の速度は、超新星残骸の年齢が判っている場合に限って計算できる。このようにして、膨張指数を測定することで、残骸の力学的進化段階を探ることができる。

4. X線天文衛星「Chandra」, 「XMM-Newton」の登場

現在の膨張速度は原理的には2度観測すれば測定できるが、現実的には簡単ではない。というのも、いくら超新星残骸の膨張速度が速いとはいえ、残骸までの距離を考えると、どんな超新星残骸でも1年あたりにせいぜい1秒角以下の膨張しか期待できないからである。そこで、これまでは望遠鏡の角度分解能の優れた可視光や電波領域でのみ膨張率の測定が行われてきた。しかし、一般に可視光では超新星残骸のごく一部の領域—衝撃波が何らかの理由で非常に減速された領域—しか観測できない。また、電波はX線ほど明るくないことも多い。そのため、超新星残骸の隅々から強く放射されるX線での測定が待ち望まれていた^{*1)}。

そのような中、空間分解能0.5秒角というX線天文衛星としてはこれまでとはまさに桁違いに優れた視力をもつ「Chandra」衛星と、それには劣るものの10秒角程度と優れた視力をもつ「XMM-Newton」衛星が1999年にそれぞれアメリカとヨーロッパから打ち上げられた。これらの衛星が打ち上げられて10年経った今、多数の超新星残骸が膨張する様子を測定することが可能となってきたのだ。

5. 超新星残骸 Vela Jr., Kepler, SN 1006 の膨張率測定

われわれは世界に先駆け、超新星残骸 Vela Jr., Kepler, SN 1006 の膨張率をX線で精密測定することに成功した。以下、測定結果をそれぞれの天体ごとに見ていく。

5.1 Vela Jr.

Vela Jr. は1998年にX線天文衛星「ROSAT」によって、Vela 超新星残骸の南東部分に発見され

^{*1)} これまでも「ROSAT」や「Einstein」衛星で膨張率を測定する試みはあったが⁷⁻¹⁰⁾、残念ながら正しい結果が導かれた例は少ない。

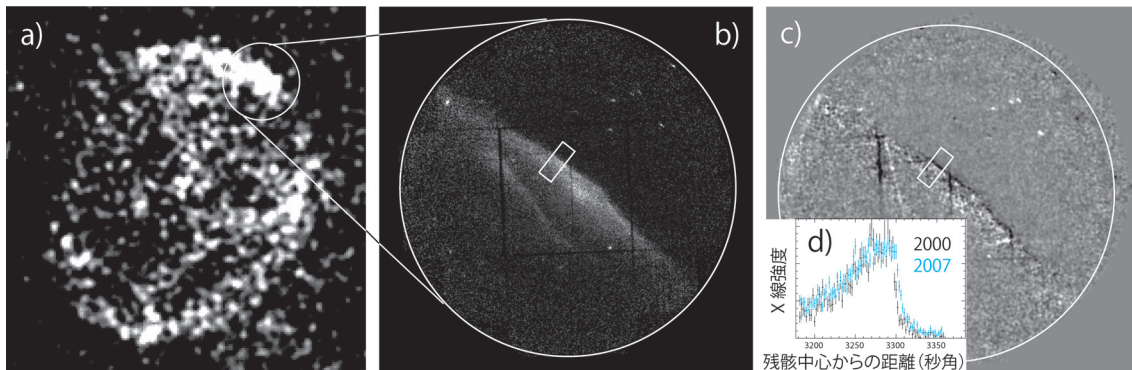


図1 a) 「ROSAT」衛星による Vela Jr. 超新星残骸の X 線画像 (1.3-2.4 keV). 爆風波の動きが黒いフィラメントとして見える。
 b) 「XMM-Newton」衛星によって 2001 年に撮像された Vela Jr. 北西端の X 線画像 (1.5-8 keV).
 c) 「XMM-Newton」衛星による 2001 年の画像から 2007 年の画像を引いた結果. 白はプラス, 黒はマイナスに対応する. 爆風波の動きが黒いフィラメントとして見える。
 d) b), c) に示した白のボックス領域の一次元 X 線プロファイル. 黒が 2000 年, 青が 2007 年に対応する.

た¹¹⁾. 「ROSAT」衛星のすべてのエネルギーバンドの画像では, Vela の放射に紛れて見えなかったのだが, 図 1a に示したように硬 X 線だけにフィルターした画像から見いだされた. エネルギーの高い X 線を放射することから Vela よりも若いと考えられ, Vela Jr. と呼ばれるようになった*2.

Vela Jr. からはその発見と同時に, ⁴⁴Ti の崩壊に伴うガンマ線の検出が報告された¹²⁾. ⁴⁴Ti の検出は, Cassiopeia A 超新星残骸に続いて 2 例目ということで, 研究者の注目を集めた. 超新星爆発時の元素合成モデルで予測される ⁴⁴Ti 量と検出されたガンマ線量から残骸の年齢を推定したところ, 700 年程度とたいへん若く見積もられた. 爆発のタイプは, 残骸の中心付近に中性子星候補が見つかっているため, 重力崩壊型と考えられている. 中性子星の X 線スペクトル解析によると, 中性子星候補の年齢は数千年程度と見積もられ, Vela Jr. の年齢と矛盾があるため, 両者の関連性には疑問が残っていた¹³⁾.

図 1b は「XMM-Newton」衛星によって撮像された Vela Jr. 北西端の画像を示す. 1.5 keV 以上の硬 X 線だけで画像を作成したので Vela からの放

射が除去され, Vela Jr. の爆風波のフィラメント構造が明瞭になっている. この爆風波の固有運動は, 現在の天体の半径 (1°) を年齢で割り算した値, ~5 秒角/年と期待できた. 重力崩壊型爆発の若い超新星残骸では, 膨張指数は 8/9 程度とほとんど減速を受けていないと考えられるためである. これなら, 「XMM-Newton」衛星で数年の時間間隔をあけて観測すれば十分に固有運動が検出できる. われわれは, Vela Jr. の北西端が「XMM-Newton」衛星でこれまでに何度となく観測されており, そのほとんどのデータがすでに一般公開されていることに気づいた. そこで, 2001, 2003, 2005, 2007 年の観測を用いて爆風波の固有運動を測定することにした.

図 1c は 2001 年の画像から 2007 年の画像を差し引いた結果である. 爆風波の進んだ痕跡が黒い線として綺麗に見える. なお, 検出器に起因する黒や白の線も見えるので注意されたい. 次に爆風波の固有運動を定量的に見積もった. われわれは図 1b, 1c に白線で示したボックス領域に着目し, X 線強度の一次元プロファイルを作った. 図 1d は 2001 年と 2007 年のプロファイルを示す. 2001

*2 Vela とはたまたま重なって見えているだけで何ら関係はない.

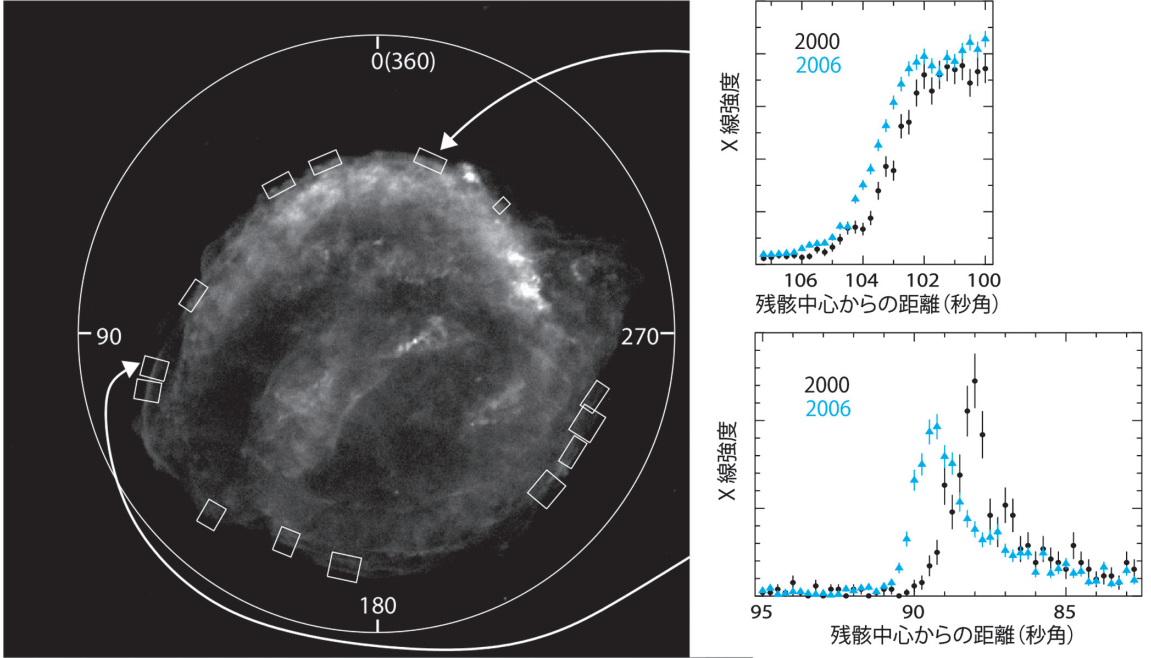


図2 「Chandra」衛星によるケプラー超新星残骸の X 線画像 (1-8 keV). 図に示したボックス領域で膨張率を測定した. 右には, 一次元 X 線強度プロファイルを 2 例示す. 黒が 2000 年, 青が 2006 年の観測に対応する.

年のプロファイルを一ピンずつずらし 2007 年のプロファイルと比較して, 二つのプロファイルが最もよく一致するずれを測定した. ほかに 2001-2003 年間, 2001-2005 年間でも測定した結果, 固有運動は平均として 0.84 ± 0.23 秒角/年であった. この値はわれわれの期待していた値, ~ 5 秒角/年に比べて驚くほど小さい値であった.

もし 700 年という若い年齢を信じると, 膨張指数は $0.16 (dR/dt/0''.84 \text{ yr}^{-1}) (t/700 \text{ yr}) (R/1^\circ)^{-1}$ となる. その若さで膨張指数が 0.16 まで減速しているということは, Vela Jr. がよほど密度の高い環境で爆発したことを意味する. しかし, それを支持する観測結果は少なくともこれまでのところない. そのため, われわれは Vela Jr. の年齢を見直すほうが自然であると考えた.

他の超新星残骸の「年齢-膨張指数」の関係から, Vela Jr. のもっともらしい年齢を類推した結果, 1,500 年程度と推測できた. つまり年齢がこれまで考えられていたよりも 2 倍ほど大きくなる.

これによって, 超新星爆発直後から指数関数的に崩壊する ^{44}Ti の爆発時の生成量は劇的に増加することになる. 1998 年に測定されたガンマ線放射量から推測すると, 爆発時の ^{44}Ti の量は太陽質量程度にもなり, 理論的にありえないことが示された. そのため, われわれは ^{44}Ti からのガンマ線放射の検出は, 何らかの理由による見誤りだったのだろうと結論した. 実際に同じデータを再解析したグループは, ^{44}Ti の検出に関して否定的な結果を報告している¹⁴⁾. その一方で Vela Jr. と中性子星候補の年齢の矛盾が解消し, 両者が同一の超新星に起因することが明らかになった.

5.2 Kepler (SN 1604)

ヨハネス・ケプラーが 1604 年に発見した超新星の残骸は, 爆発後 400 年ほど経た現在, 視直径 4 分角程度に広がっている (図 2). 爆発のタイプは超新星の光度曲線, X 線スペクトル, およびコンパクト星が見つかっていないことから炭素爆燃型と考えられているが, その一方で重力崩壊型の性

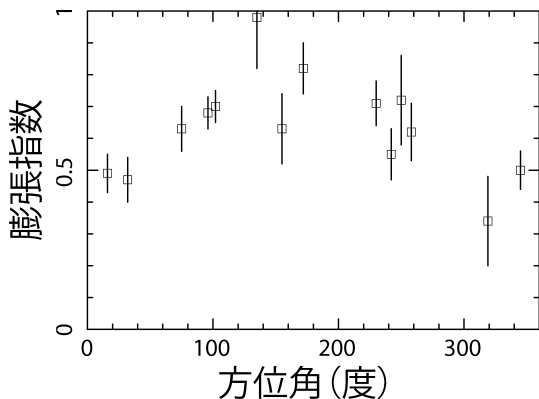


図3 ケプラー超新星残骸の膨張指数. 横軸は北から半時計回りにとった方位角.

質一恒星風起源と考えられる窒素に富んだ密度の高いガスを示すことも知られている¹⁵⁾. 残骸周囲の星間空間が恒星風の影響を受けたのか受けていないのか、残骸の膨張率の測定から調査した.

われわれは2000年と2006年の「Chandra」衛星による観測から、爆風波の固有運動を測定した. 図2に描き込んだ14の領域に着目し、先のVela Jr.のときと同様に一次元プロファイルを作って測定した. 爆風波の動いている様子が、図2(右)に示した一次元プロファイルから明瞭である. この残骸については、爆発が1604年と正確にわかっているので、正確な膨張指数が計算できる. 各領域の膨張指数を図3にプロットした. 結果として、残骸の北部では0.5程度、南部では0.7程度と非対称であることがわかった. 膨張指数の値から超新星残骸の進化段階は、自由膨張期からセドフ期の間とわかる. その段階では、2章で述べたように超新星爆発の種類によって、3通りの膨張指数を示すと考えられている. すなわち、重力崩壊型なら $m \sim 8/9$, 普通の炭素爆燃型の場合 $m \sim 4/7$, 恒星風をもつ特殊な炭素爆燃型の場合 $m \sim 4/5$ である. われわれの測定結果と比較すると、北部では普通の炭素爆燃型で期待される値と同じかそれよりも小さい一方で、南部では恒星風をもつ特殊な炭素爆燃型で期待される値と近いこ

とがわかる. つまり、恒星風の影響が北部では見られないが南部では見られることを示している. 特殊な炭素爆燃型の超新星では恒星風が非対称的に吹くのかもしれない.

5.3 SN 1006

SN 1006は、西暦1006年に現れた超新星の残骸である. 現在は視直径30分角の月と同じくらいの大きさに広がっており、いろいろな波長で観測できる. 図4aは「Chandra」衛星によるX線画像である. 史上最も明るく見えた超新星だったため、世界各地で記録が残っている. 日本では鎌倉時代に、藤原定家が『明月記』の中に詳細に出現の様子を記している^{*3}. 超新星の光度曲線やその後のさまざまな観測結果から、爆発の種類は炭素爆燃型と考えられている. SN 1006は、残骸周囲から初めてシンクロtron X線が検出され、超新星の爆風波が宇宙線加速の現場であることが証明されたことでも有名である¹⁶⁾. 最近、TeVガンマ線が受かったとの報告もあり¹⁷⁾, ますま注目を集めている.

われわれは「Chandra」衛星による2000年と2008年の観測を使用して、爆風波の固有運動を測定した. SN 1006は「Chandra」衛星の観測視野全体よりも大きく広がっているため、今回カバーできた領域は図4aに白線で示した北東端である. 図4bは、2000年の画像から2008年の画像を差し引いた結果を示す. 爆風波の動いた様子が黒いフィラメントとして綺麗に見える. これまでと同様に一次元のX線プロファイルを作って、固有運動を定量的に評価した(図4c). その結果、爆風波は ~ 0.5 秒角/年で運動していることがわかった. また、膨張指数は ~ 0.54 と得られた. 膨張指数からSN 1006が自由膨張期からセドフ期へ遷移する段階にあること、また典型的な炭素爆燃型で期待される膨張指数(4/7)とほぼ矛盾ないこともわかった. さらに、すでに北西領域の周囲の密度と爆風波の固有運動がそれぞれ $\sim 0.25 \text{ cm}^{-3}$,

*3 藤原定家は、実際に超新星を観測したわけではなく、陰陽師の観測した様子を伝え聞いて『明月記』に記録した.

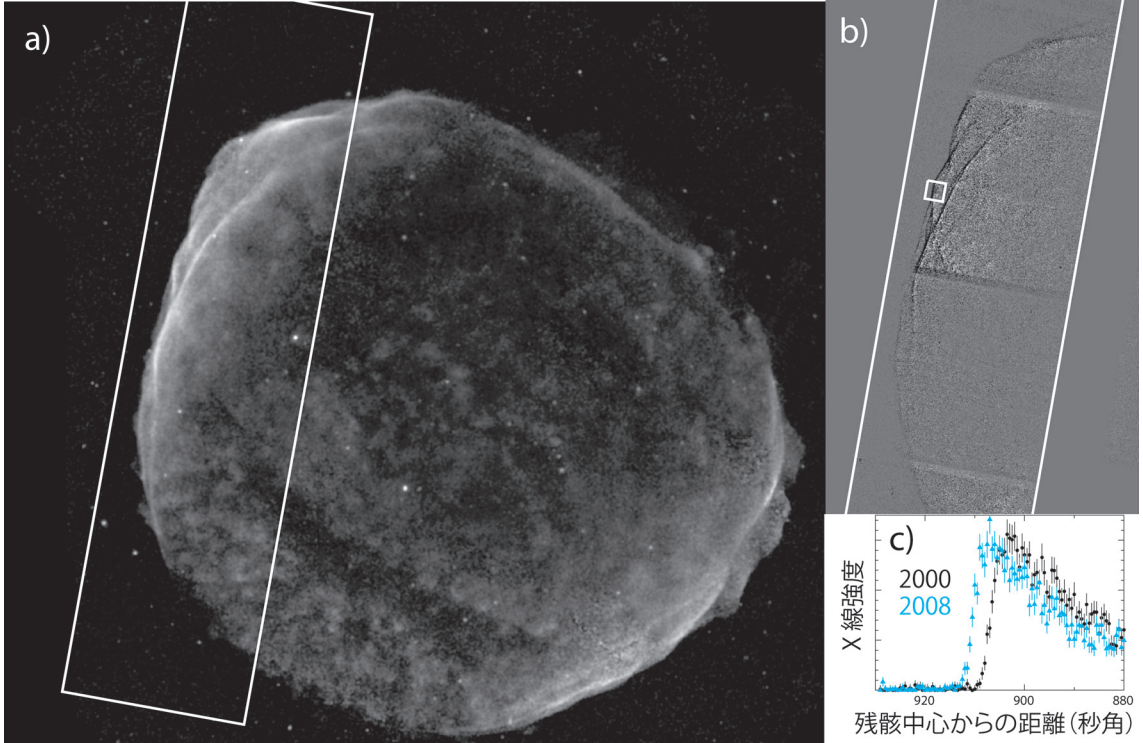


図4 a) 「Chandra」衛星によって撮像されたSN 1006 (0.5–5.0 keV).
 b) 「Chandra」衛星による2000年の画像から2008年の画像を引いた結果。白はプラス、黒はマイナスに対応する。爆風波の動きが黒いフェラメントとして見える。
 c) b) に示した白のボックス領域の一次元X線強度プロファイル。黒が2000年、青が2008年に対応する。

0.28秒角/年と測定されていたので、残骸の北西から北東にかけて圧力(周囲の密度と爆風波の速度の2乗の積)が一定と仮定することで、北東周囲の密度を $\sim 0.085 \text{ cm}^{-3}$ と推定できた。一般に、SN 1006北東領域のように熱的放射が受かっていない場所では密度を測定するのは困難なのだが、今回、爆風波の固有運動の測定がそのような場所の密度を推定する手段になることを示せた。

6. ま と め

X線天文衛星「Chandra」「XMM-Newton」によって、超新星残骸が力学的に進化する様子を直接的かつ詳細にとらえることがX線で可能になってきた。

本稿では、Vela Jr., Kepler, SN 1006の膨張率の

測定結果を紹介した。Vela Jr.の膨張率は驚くほど遅いことが判明し、その理由は残骸の年齢がこれまで考えられていたよりも倍程度大きいためと考えられた。結果として、Vela Jr.に付随すると思われた ^{44}Ti からのガンマ線の検出は有意ではなかったこと、Vela Jr.の中心付近に見られる中性子星候補が真にVela Jr.に関連する中性子星であったことが明らかになった。Keplerについては、残骸の膨張が非等方的であることを見いだした。南部で得た膨張指数は、周囲の星間空間が恒星風による影響を受けたことを示唆しており、炭素爆燃型としてはめずらしいタイプの超新星爆発であったことが確かめられた。SN 1006の膨張指数は、典型的な炭素爆燃型で期待される値と一致していた。また、初めて熱的放射が見えない北東

領域の周囲の星間物質の密度を見積もることができた。

「Chandra」「XMM-Newton」衛星による超新星残骸の膨張の測定はまだ始まったばかりである。今後数年のうちに、多数の超新星残骸の膨張の様子が次々に明らかになると期待している。膨張率の測定結果の使い道はいろいろある。まず、本稿で示したように、年齢や周囲の密度構造の見積もりができるだろう。ほかに、もしドップラースhiftなどから実際の膨張速度が測定できれば、その速度を固有運動で割り算することにより残骸までの距離が求められる。このように、膨張率の測定はこれまでにはない新たな切り口で強力に超新星残骸の理解を深めてくれるだろう。

謝 辞

本稿で紹介した結果は、3編の論文¹⁸⁾⁻²⁰⁾として公表されています。一部の結果は、筆者が大阪大学大学院在学中に得られたものです。学部生のときから長年ご指導いただいている常深 博先生、共同研究者の森 浩二氏、山口弘悦氏、内田裕之氏、木村 公氏、Robert Petre 氏、Una Hwang 氏、Knox S. Long 氏、Stephen P. Reynolds 氏、P. Frank Winkler 氏、その他有意義な議論をさせていただいた皆様に感謝いたします。本稿の執筆の機会と本稿への貴重なご意見をくださった編集委員の山崎 了氏に感謝いたします。筆者は本研究を遂行するうえで、日本学術振興会から援助を受けました。

参 考 文 献

- 1) Chevalier R. A., 1982, ApJ 258, 790
- 2) Kotak R., Meikle W. P. S., Adamson A., Leggett S. K., 2004, MNRAS 354, L13
- 3) Deng J., et al., 2004, ApJ 605, L37

- 4) Sedov L. I., 1959, Similarity and Dimensional Methods in Mechanics (New York, Academic Press)
- 5) Taylor G. I., 1950, Proc. R. Soc. Lond. A 201, 159
- 6) Blondin J. M., et al., 1998, ApJ 500, 342
- 7) Vink J., Bloemen, H., Kaastra J. S., Bleeker J. A. M., 1998, A&A 339, 201
- 8) Koralesky B., Rudnick L., Gotthelf E. V., Keohane J. W., 1998, ApJ 505, L27
- 9) Hughes J. P., 1999, ApJ 527, 298
- 10) Hughes J. P., 2000, ApJ 545, L53
- 11) Aschenbach B., 1998, Nat 396, 141
- 12) Iyudin A. F., et al., 1998, Nat 396, 142
- 13) Kargaltsev O., Pavlov G.G., Sanwal D., Garmire G.P., 2002, ApJ 580, 1060
- 14) Schönfelder V., et al., 2000, A&AS 143, 145
- 15) Dennefeld M., 1982, A&A 112, 215
- 16) Koyama K., et al., 1995, Nature 378, 255
- 17) HESS collaboration, 2008, A presentation at COSPAR 2008 (E13-0038-08)
- 18) Katsuda S., Tsunemi H., Mori K., 2008, ApJ 678, L35
- 19) Katsuda S., Tsunemi H., Uchida H., Kimura M., 2008, ApJ 689, 225
- 20) Katsuda S., Petre R., Long K. S., Reynolds S. P., Winkler P. F., Mori K., Tsunemi H., 2009, ApJ 692, L105

X-Ray Expansion Measurements of Supernova Remnants

Satoru KATSUDA

X-Ray Astrophysics Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center, Code 662, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, U.S.A.

Abstract: The X-ray observatories Chandra and XMM-Newton observed most of the bright SNRs in their initial years after launch. Since ten years have passed, it has become possible to measure the expansion in many SNRs, by follow-up Chandra/XMM-Newton observations. The expansion measurement can be a strong tool to derive vital information on supernova remnants. We here introduce the results of our expansion measurements.