

X線で見た帆座超新星残骸

茂 山 俊 和

〈東京大学理学系研究科天文学専攻／東京大学理学部初期宇宙センター 〒113 東京都文京区弥生 2-11-16〉

E-mail : shigeyama@astron.s.u-tokyo.ac.jp

帆座にある超新星残骸はあまりにも見かけが大きいので、ドイツの X 線観測衛星 ROSAT が全天の高解像度の X 線写真を撮るまでその X 線での全容がわかっていなかった。しかし、昨年 2 月 16 日号の Nature に掲載された論文¹⁾で、他の多くの超新星残骸では滑らかな円に見える衝撃波面がそこでは何か小さなものに所々破られたような格好をしていると、X 線画像を解析した Aschenbach らは報告した。私が、同じ学科で仕事をしているティモシー・ヤング、鈴木知治両氏とこの観測事実をきっかけに進めているモデルづくりの一端をここでは紹介する。

1. はじめに

以前、天文月報に大マゼラン雲の超新星 1987 A について記事を書いた後に思ったことがある。もう少し後で書けばもっと自分自身の理解も進んで少しはましな記事が書けたはずだと。実際、当時のモデルでは再現できていなかった部分があった。この超新星の光度曲線を、その数カ月後には再現できるようになっていた。かといって、全てわかってしまった（わたしは、そう思いこんでいた）頃には、人々の関心も薄れ原稿依頼も来ないし、私自身一度書いたからもういいだろうと思って何もしなかった。

今回も今のところ同じパターンだ。帆座の超新星残骸について面白いモデルを提案したとは思っているが、観測量を全て説明できるほどには詰め切れていない。望むらくは、この原稿を書いた後に、前回と同じように、残る問題を解決してモデルを完成しすっきりとした気分になりたいものだ。

というわけで、今回のお話は、帆座超新星残骸の X 線写真を見て、考えたシナリオを紹介し、いまのところここまで説明できているという報告で終わることにする。まずは超新星残骸とはどうい

うものかというところから始めよう。

2. 超新星と超新星残骸の関係

超新星残骸は星が爆発してからおそらく数百年くらいたった後にそう呼ばれるようになる。帆座超新星残骸に限って言うと、爆発した星は大質量星と呼ばれる太陽より少なくとも 10 倍以上重い(質量が大きい)星である(あとで見るように我々が提唱するモデルでは太陽質量の 40 倍の星である。以下、太陽質量 $M_{\odot}$ を単位にして質量を $40 M_{\odot}$ 等と書くことにする)。このような星が年をとると、核融合反応の結果として中心に鉄のできた半径 1000 km 程度の丸い核ができる。この鉄の中心核がある程度 ($1.4 M_{\odot}$ くらいに) 太ると、自分の重さを支えきれなくなって重力崩壊と呼ばれる収縮が始まる。このあと数秒後には半径が 10 km 程で質量が $1.4 M_{\odot}$ ほどの中性子星ができる。収縮によって、この数秒の間に重力エネルギーが解放される。その大きさは 10^{53} erg を優に超える。このエネルギーのほとんどはニュートリノによって星から運び去られる(この辺の詳しいことは参考文献 2 を見て下さい)。このエネルギーのほんの 1% すらでも鉄の中心核を取り巻いていた星の外層を取り去るのに十分である。実際、超新星爆発に

よって膨張している物質のもつエネルギーは観測から導かれていて、おおざっぱに 10^{51} erg であると言われている（ある星が爆発したときこのエネルギーがいくらになるか、理論的に導ける人は未だいない）。

爆発がおこってから最初の数年は、星を形成していた物質は中性子星になった部分を除いて自由膨張をする。星周物質あるいは星間物質の密度が十分低いからそうなる。内部の温度は断熱膨張と放射冷却によって低くなっているの、 10^{51} erg のほとんどは運動エネルギーである。すると簡単な計算から膨張の速度は速いところで秒速 1 万 km 位になることがわかる。平均すると星の質量によって秒速 1000 km から 3000 km くらいで膨張している。

すると数百年もたつと数光年位の大きさに広がる。もし星間空間のガスの数密度が 1 個/cc だとすると、その間に掃き寄せられ押し出された星間空間の質量は太陽質量の数倍になる。これだけの物質を動かしたのだからその反作用を受けて、今までのように星は自由膨張を続けることができなくなる。このとき、星間空間の物質を押し出す働きをするのは衝撃波である。この衝撃波は星間空間を伝わって拡がっていく。一方、星が反作用を受けて減速されるのも衝撃波によってである。こちらの衝撃波は膨張する星の内部でも、外の方で発生し中心に向かって伝わっていく。これら二つの衝撃波に挟まれた領域が衝撃波によって加熱されたために高温（百万 K 以上）になり X 線を放射する。こうして、超新星残骸は X 線天文学の観測対象となる。

超新星残骸はいつまで X 線を放射し続けられるのだろう。膨張を続けていると放射冷却が衝撃波による加熱効率を上回るようになり、温度が高い部分が無くなり、超新星残骸としての一生を終わる。星間空間のガスの密度にも依るが十万年くらいは衝撃波による加熱で X 線を放射する。

超新星残骸からの放射で忘れてならないものに

パルサーからの放射があるが、ここでは議論しない。興味のある方は参考文献 3 を読んでいただきたい。

3. ROSAT の観測が説明できない!

Aschenbach らは¹⁾ドイツの X 線観測衛星 ROSAT が撮ったこの領域の X 線画像を解析し、初めて帆座超新星残骸とその周りの領域の X 線強度分布の全体像を明らかにした。

帆座超新星残骸は直径 7 度を占める丸く大きく広がった天体である(図 1)。可視光でも薄く切れ切れに光る雲のように見える。ROSAT のこの結果が出る以前の話をする、残骸の中に帆座パルサーはあるが、その位置が超新星残骸の中心に在るのかどうか判然としなかった。実はこの超新星

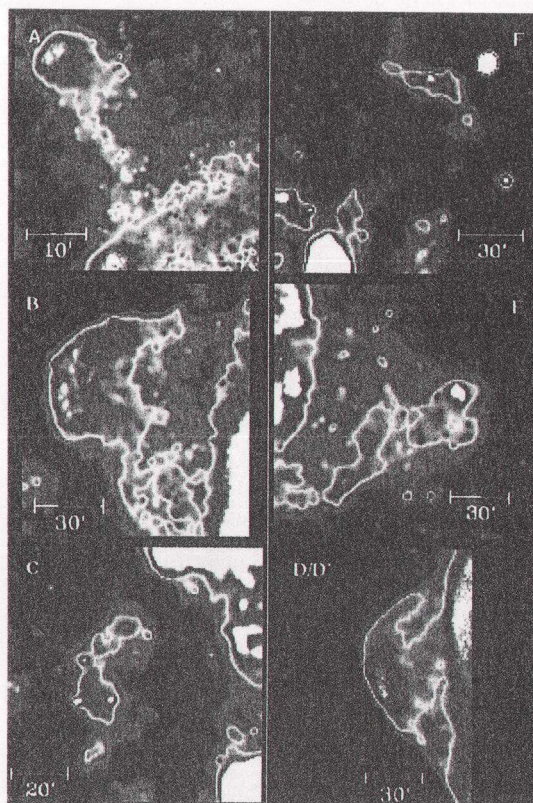


図 2 帆座超新星残骸の X 線強度分布 (参考文献 1 より転載)。

残骸はもっと大きく直径 20 度くらいに広がった高温の領域の中にある。高温領域、超新星残骸、パルサー、3 者の関係がどうなっているのかもはっきりとわかっていなかった。ROSAT によって超新星爆発が起こった地点と帆座パルサーの位置が（天球面上で）一致することが示された。

私が Aschenbach らの観測を知ったのは昨年春の学会での常深さん（阪大理）らのポスター⁴⁾だった。そのポスターは、Aschenbach らが発見した X 線を放射している弾丸状の 7 つの領域（図 1 のラベル A から F まで）のうちのひとつ（A）を宇宙科学研究所の X 線観測衛星 ASCA で観測し、その高いエネルギー分解能を生かしてスペクトルを撮ったというものである。その時、ポスターの前で議論していた数人の間で問題になったのはこれらの弾丸状の領域がどうやってできたのかということだった。というのも、これらの領域全てが残骸をかたどる衝撃波の外側にあったからである。その一方で弾丸の格好からその発射された方角を推定するとどれも残骸の中心を起源にしているように思われる。その時の結論は、超新星爆発初期に起こった Rayleigh-Taylor 不安定と呼ばれる流体不安定によってできた重元素からなる高密度の塊が、衝撃波を突き破って出たものであろうということだった。7 個という個数もそれまでに行われていた超新星爆発の 2 次元軸対称を仮定した数値流体計算結果と矛盾しないと蜂巢さん（東大教養）は言っていた。しかし、これらの計算が示していたのは高密度の塊ができるところまでで、この塊が衝撃波を突き破るかどうか確かめる必要があった。そこで、私は超新星爆発後に自由膨張をしている星の中に、周りより 10~100 倍ほど密度の高い物質を置いて 2 次元数値流体計算を行い、その後の進化を追ってみた。結果は、旨くいかなかった。私がやったどの場合にも塊は結局減速されて衝撃波に追いつくことはなかった。数値実験だけではこの塊が衝撃波を突き破れないということを実証するのは難しい。逆に、旨くいくことを

示せそうにもないのでこれ以上数値計算を続けるのも無駄だと思い、私は 1 ヶ月ほどで一旦手を引くことに決めた。

4. 1 回でダメなら 2 回

再度、帆座超新星残骸のモデルづくりに着手したのは夏になってからだった。きっかけは、その年の 3 月末から我々の研究室にポスドクとして来ていたティモシー・ヤングさんである。彼とは X 線で観測された超新星残骸のモデルづくりについて数回議論したことがあった。もちろん、帆座についても話した。ある日彼と昼食をとっていたとき、彼が帆座の超新星残骸では同じ場所で 2 回超新星爆発が起こったとすれば良いのではないかと突然言い出した。その場では、私にはその考えがどの程度本気で考えるべきものか良くわからなかった。とりあえず昼食後に Aschenbach らの Nature 論文を読み直してみた。すると、帆座の超新星残骸の周りからも直径で 20 度にわたって表面輝度がほぼ一定の弱い X 線が受かっていると書いてあることに気が付いた。その中心は超新星残骸の中心とほぼ一致すると考えて良さそうだ。これが 1 回目の超新星残骸ではないだろうか、とそのとき私は思った。それで 2 回超新星が起こったとティモシーは考えたのかと思って訊いてみる

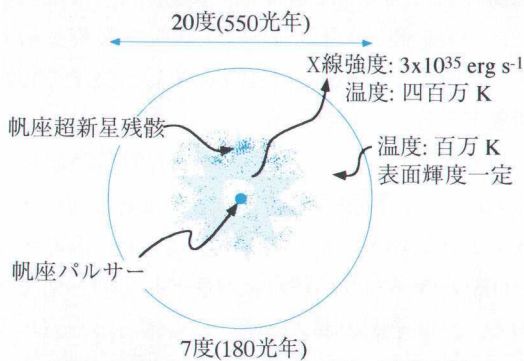


図2 モデルづくりに重要な観測量のまとめ。

と、彼は Aschenbach らの論文を読んでいないと言った。彼は、1 回目の超新星によって擾乱を受けた星間空間の中で 2 回目の超新星爆発が起これば、衝撃波面の一部が密度の薄いところで加速され観測されるような弾丸状に見えろと考えたらしい。つまり、2 回の超新星爆発を考えれば少なくとも 2 つの観測事実を説明する可能性ができた、と私は思った。

そこで、ティモシーと鈴木知治さん、そして私はこの 2 回の超新星爆発によって説明しなければならない観測量を洗い出す作業を始めた (図 2 にまとめてみた)。まず、1 回目の超新星で 20 度に広がった X 線の表面輝度とガスの温度 (百万 K) を説明しなければならない。次に 2 回目の超新星では帆座超新星残骸の大きさと X 線強度 (約 $5 \times 10^{35} \text{erg/s}$) 及び X 線スペクトルを再現する必要がある。X 線強度は帆座超新星残骸までの距離に依る。我々は、よく使われる 500 pc (約 1500 光年) という値を用いた。また、もちろん弾丸状の領域を 2 回目の爆発によってできた衝撃波面の外に作らなくては行かない。さらに、帆座パルサーの観測からも制限が付く。パルサーはその自転周期が時間とともに伸びていることが知られている。つまり、過去にはもっと速く回っていたことになる。大雑把に言って自転が 2 倍速くなっていた時刻をパルサーが生まれた時刻だと思って、このパルサーの年齢はおおよそ一万年から二万年と見積もられている。超新星残骸のほうも年齢が同じくらいと考えるのが自然であろう。

5. モデルづくり(その一)ー最初の超新星

というわけで私は数値計算を再開した。今度は、1 回目の超新星が 20 度に広がった百万 K の領域を作り出す条件をまず探すために、これは結局、星間物質の密度によって決まっている。密度が 0.1 個/cc だと爆発から 15 万年で衝撃波が直径 20 度ほどに広がり、衝撃波によって加熱された領域の温度も百万 K くらいになった。都合の良いこと

に星を形成していた物質は 100 光年程度に広がってほぼ止まっていた。そして、その領域では Rayleigh-Taylor 不安定によって密度分布が乱れていた。面白いことに衝撃波面のすぐ後ろでは放射冷却が衝撃波加熱を凌駕し、それ以上衝撃波も広がれなくなっていた。表面輝度分布も観測と合っていた。さらに、これ以上時間が経つと外側からどんどん冷えていって表面輝度が観測と合わなくなってくる。従ってたった 15 万年の間に 2 つの超新星は爆発したことになる。15 万年というのは星の寿命に比べてみると非常に短い。質量が数十 $M_{\odot}$ ある星でも寿命は 1 千万年程である。星の生まれたときの質量でその寿命が決まっているので、もしこの 2 つの星がほぼ同時にできたとする と 15 万年の寿命の差は質量に換算して数パーセントの差にしかない。2 つの星の距離もそう遠くないはずなので、おそらくこの二つの星はお互いの周りを回っている連星系を作っていたと思われる。そこで、2 回の超新星が起こったとすると、双子の星が爆発した跡を我々は見ていることになる。

6. モデルづくり(その二)ー2 回目の超新星

そして、2 回目の超新星を 1 回目の超新星残骸の中で爆発させる。ここで重要なことは帆座の超新星残骸から出る X 線強度 $5 \times 10^{35} \text{erg/s}$ を再現する条件である。X 線強度は高温ガスの量に比例する。必要なガスの量はおおよそ 60 $M_{\odot}$ である⁵⁾。このガスが 2 回目の爆発の時に既にその周囲 7 度以内になくはない。2 回目の爆発で生じた衝撃波で加熱されてこれらのガスが X 線を出すという具合にしたいのだ。これは困ったことになった。つまり、単純に考えると 1 回目に爆発した星は少なくとも 60 $M_{\odot}$ もあったことになる。こんな重い星が帆座パルサーのような中性子星を残すと言っている人は聞いたことがない。多分ブラックホールを残すと考えたほうが自然だろう。ここで、鈴木さんが星風の重要性を指摘した。大質量星は

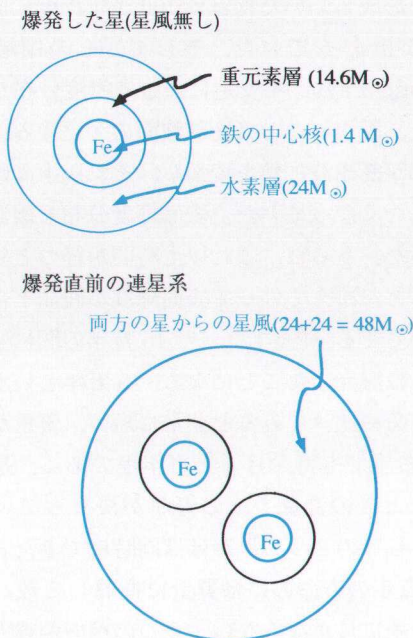


図3 2回の超新星が起こる直前の状態。

星風によってかなり大量にその外層を失っている。すると爆発した星の質量はそんなに大きくなくても良いことがわかった。つまり、図3に示すように1回目の超新星爆発で飛ばされるのはその星だけではない、もう一つの星の星風によって放出された星周物質も飛ばされる。従って、この二つを合わせて60 $M_{\odot}$ の質量になればよい。実際には、両方の星が40 $M_{\odot}$ 程度なら上の条件を満たすようになる。星の進化の理論計算によると40 $M_{\odot}$ の星の水素の外層の質量はおおよそ24 $M_{\odot}$ で、このほとんどが星風によって星周物質になっておそらく二つの星の周りにあった。そこに超新星爆発が起こったので衝撃波が40+24=64 $M_{\odot}$ のガスを吹き飛ばしたという具合になる。

我々のモデルでは言うまでもなく中性子星が2つできる。1つは15万年くらい年をとった中性子星で、もう一つは1万数千年の年齢の帆座パルサーである。古い方は観測されていない。パルサーかもしれないが、そのビームが地球をかすめないのかもしれない。

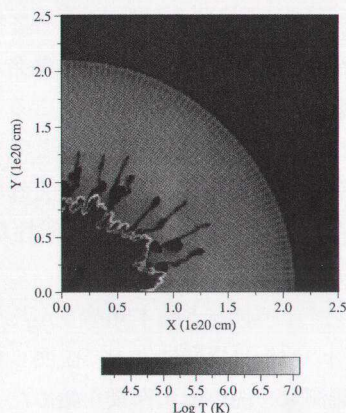


図4 2次元軸対称を仮定した数値計算で得られた温度分布。

7. 説明できたこと・できないこと

このようなシナリオに従って2次元軸対称を仮定した数値流体計算を行った結果が図4に示されている。これは2回目の超新星が爆発してから1万4千年後の温度分布で半径が 10^{20} cm (100光年) 辺りに温度の高い部分が集中していて、衝撃波面が滑らかな球面にはなっていないことがわかる。観測されたような弾丸状の形状がこの計算結果の何処に対応するのかを言うことはできない。そのためには、もっと精度の良い計算を行う必要がある。

さて、他の定量的に比較できる観測量を見てみる。表面輝度分布を中心からの距離の関数として描いた図5では、 2×10^{20} cm (200光年) 程に広がった一定な輝度を持った成分と帆座超新星残骸に対応する明るい成分があり、広がった成分の輝度は観測とだいたい合っている。しかし、このモデル計算では帆座超新星残骸からのX線強度はせいぜい 1.3×10^{35} erg/sにしかない。

X線強度が説明できないのは、我々の計算で行っている単純化の為かもしれない。我々は衝突電離平衡を仮定してX線強度を計算したが、1万年くらいの年齢の超新星残骸では電離非平衡を考慮

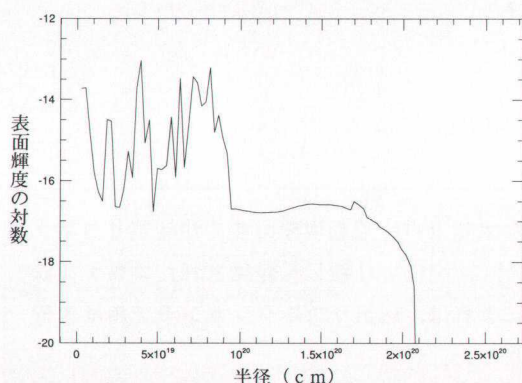


図5 図4と同じ計算結果から得られた表面輝度分布を中心からの距離の関数として描いたグラフ。

する必要がある。このような計算は複雑で計算量も膨大なので今までは省略していたのだ。

ROSATで観測された弾丸状に光った部分がこのシナリオに沿ってどのようにできたかを調べるのも大きな課題だ。計算する空間の領域を絞って3次元流体計算を行い詳しく調べる必要がある。

結局、2つの大きな課題が残った。2つとも調べるためには手法を大胆に変える必要がある。本腰を入れるためには他の超新星残骸についても適用できるモデルづくりをも念頭に入れないと、割に合わないと個人的には思っている。

8. 今後の展望

この半年あまり、帆座にある超新星残骸の進化を考えてきて、この超新星残骸に限らず超新星残骸の進化の理論は現在どれ程完成度が高いのだろうかと思うようになった。例えば、最近、ASCAなどによって観測された超新星残骸のエネルギーが 10^{51} ergの半分以下と見積もられているものがあるのも不思議である。帆座の超新星のように大質量星の爆発の場合には、そのエネルギーを理論的に見積もることができないので、そもそも爆発エネルギーが観測から求められるような値なのかも

しれない。しかし、Ia型に分類される連星系中の白色矮星の爆発による超新星では、我々は爆発のエネルギーをもっと精度良く理論的に決めているはずだ。そして、その値は少なくとも 10^{51} ergはある。残りのエネルギーは何処へ行ってしまったのだろうか。

また、超新星が爆発する場所の環境も様々である。例えば楕円銀河で爆発する超新星残骸は高温で希薄な星間ガスの中で進化するので我々の銀河の超新星残骸とは進化の様子が異なる。

X線観測が高分散、高空間分解能を達成するにつれて、超新星残骸の理論にはまだまだ発展する余地があると思うのだが、どうだろうか。

参考文献

- 1) Aschenbach, B., Egger, R., & Trüper, 1995, *Nature*, 373, 587
- 2) 鈴木英之 物理学会誌 1988?
- 3) Shapiro, S. L., Teukolsky, S. A., 1983, "Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars", 267
- 4) 常深博, 宮田恵美, Aschenbach, B., 1995, 天文学会春季年会
- 5) Gorenstein, P., Frank, R. H. Jr., Tucker, W. H., 1974, *ApJ*, 192, 661

X-ray Image of The Vela Supernova Remnant

Toshikazu SHIGEYAMA

Early Universe and Research Center for the Department of Astronomy, School of Science, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

A supernova remnant in the Vela constellation is so extended that its whole X-ray image was taken for the first time by the ROSAT, an X-ray satellite launched by Germany and U.S.A.. Aschenbach et al. reported that the ROSAT discovered several nebulosities with the shape of a bullet. Their shapes indicate that they have broken out of the blast wave of this supernova remnant. We (T. S., Timothy R. Young, and Tomoharu Suzuki) have presented a double supernova model for this supernova remnant. I will briefly report how this model has been constructed and discuss the results obtained from numerical simulations based on this model.