

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 15 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540253

研究課題名（和文） 超新星残骸の再結合プラズマの起源と進化過程

研究課題名（英文） The Origin of a Recombining Plasma in Supernova Remnants

研究代表者

政井邦昭 (MASAI KUNIAKI)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：80181626

研究成果の概要（和文）：再結合放射を示す超新星残骸の特徴を観測的に調べ、再結合プラズマ状態の起源を超新星残骸の進化の過程から理論的に探った。星の自転の影響で非球対称に分布する恒星風物質の中で起きた重力崩壊型超新星を考えると、衝撃波が恒星風物質から星間空間に抜ける際の断熱膨張による冷却で再結合プラズマが生じ、超新星残骸内部で再結合放射の熱的X線が明るく、その外に非熱的電子による電波放射のシェルが形成されるという観測的特徴を説明できることが分かった。

研究成果の概要（英文）：We investigate the properties of supernova remnants that exhibit recombination X-rays, and look into the origin of the relevant recombining plasma in their evolution. It is found that a core-collapse supernova surrounded by the anisotropic stellar wind matter can produce recombination X-rays due to rapid cooling in the inner part of the remnant and form a synchrotron-radio outer shell, as observed, when the blast-wave breaks out of the wind matter into the rarefied interstellar medium.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：理論天文学

(1) 超新星残骸は、超新星爆発の運動エネルギーによって膨張する超新星物質と、周囲の物質、例えば星間物質との相互作用で生じた衝撃波が、星間物質中および超新星物質中に伝播し、物質を加熱して、高温のプラズマを形成した天体である。衝撃波によって高温に加熱される時間に比べ電離に要するタイム

スケールが長いため、X線で明るい、比較的若い超新星残骸では電離平衡に到達せず、基本的に、電子温度が電離温度（電離度を温度に換算したもの）よりも高い、電離プラズマ状態（ionizing）にあると考えられてきた。実際、多くの若い超新星残骸から観測されるX線スペクトルは、電離が進行しつつある非

平衡電離モデルでよく説明されてきた。

X線天文学衛星 ASCA は、電離温度が電子温度より高い、つまり過電離状態にある超新星残骸を見いだした (Kawasaki et al. 2002, 研究代表者も共著)。この超新星残骸は典型的なシェル型の超新星残骸とは異なる形態 (mixed morphology と呼ばれる) を持ち、興味深い結果であったが、電離平衡からのずれは小さく、電子熱伝導で説明しうる範囲の過電離状態であった。ところが最近、S/N 比に優れる Suzaku は2つの超新星残骸から直接、再結合連続放射のエッジおよび再結合起源と思われる輝線放射を検出し (Yamaguchi et al. 2009; Ozawa et al. 2009, 研究代表者も共著)、単に過電離状態というより、再結合しつつある (recombining) プラズマ状態にあることを明確に示した。これは、従来の超新星残骸の進化の描像に大きなインパクトを与えるものである。熱伝導は定温化に向かう緩和過程であるから、電子温度と電離状態の勾配に起因する過電離状態を生じることがあっても、高い電離状態のイオンと低エネルギーの電子が混在するような非平衡電離状態が保たれることは考えにくい。Suzaku の観測結果は、まさにこの後者の状態からの放射を検出したことを意味し、若い超新星残骸は基本的に電離プラズマ状態にある放射で特徴づけられるという、従来の研究の「常識」に一石を投じるものになった。

(2) 一般的に、再結合状態にあるプラズマの起源として最も考えやすいのは、光子による電離である。電子の熱的プールで維持できない高い電離状態がつけられることになるので、同じ電離温度の衝突電離プラズマに比べ、相対的に低い電子温度のプラズマになる。再結合のタイムスケールは観測された超新星残骸の年齢より長いので、爆発直後に光電離されたと考えても矛盾はない。しかし、Suzaku ではシリコン、イオウ、鉄の再結合放射を検出しており、通常の超新星で考えられるような爆発の際の UV フラッシュでは光子のエネルギーが足りない。また、最近報告されているブレイクアウト X線でも鉄の電離を説明するのは容易でない。これまで唯一、高エネルギー光子による電離の可能性が言われたのは、 γ 線バーストのアフターグローで報告された鉄スペクトルだけである (Yonetoku et al. 2001, 研究代表者も共著)。しかし、観測的な事実として確立したとは言えず、あくまで一つの可能性として議論されたに留まる。

再結合状態をつくるもう一つの可能性として、超新星残骸の衝撃波 (blast wave) が比較的高密度の星周物質から星間空間に抜けるときの rarefaction が考えられる。20年前、自身の恒星風物質の中で爆発する超新星

の残骸はどのような進化をするのか? という問題を研究代表者たちは考え、1次元流体力学コードと放射コードを用いて数値計算を実行し論文を発表した (Itoh & Masai 1989)。そこでは、rarefaction 直後の極端な再結合状態での放射スペクトルの例が示されている。超新星残骸の進化において、電離平衡に達するタイムスケールは、同様に原子衝突過程で決まる放射冷却のタイムスケールと同程度である。したがって、電離プラズマ状態にあるような若い超新星残骸の一般的な描像では、放射冷却の効果を無視することができて断熱的な進化を考えれば済む。しかし、この論文で行ったような電離平衡を経る進化では放射損失を無視することができず、当時としてはかなりの時間を要する計算であった。そのことと、以来これまで観測的な報告も無かったため、この研究は結局、球対称1例についてのデモンストレーションで終わっている。

2. 研究の目的

(1) 衝撃波によって加熱される時間に比べ電離に要するタイムスケールが長い場合、若い超新星残骸の高温プラズマからの X線放射は、これまで、電離が進行しつつある (ionizing) 非平衡電離モデルでよく説明されてきた。しかし、Suzaku の最近の観測によって、再結合連続放射を示す超新星残骸が数例見つかると、再結合状態を示す超新星残骸は少なくないのではないか、再結合状態はある種の超新星の残骸に特徴的なのかといった、超新星-超新星残骸の研究に新たな展開が期待されている。

Suzaku の観測結果から、再結合プラズマ状態を生じる物理過程として

- ・超新星爆発に伴う高エネルギー光子によって周囲が電離された
- ・超新星残骸の進化の過程で衝撃波加熱された物質が急激に冷却された
- ・衝撃波で加速された高エネルギー粒子によって過電離された

などが考えられる。3つ目の過程が要因なら、多かれ少なかれ、全ての超新星残骸で起きている可能性がある。一方、上2つの過程に共通するのは、元の星 (progenitor) が大質量星であるということ。つまり、これらの何れかが再結合放射の起源とすれば、コアの重力崩壊型超新星である可能性が高い。

Suzaku で見つかった超新星残骸の progenitor については、星形成領域との関連も言われているが、未だ議論があって決着はついていない。なお、コンパクト天体の存在は確認されていない。再結合状態をつくる進化過程が上の例以外にもあるかもしれない

し、Suzaku が開いた再結合プラズマ超新星残骸の研究は観測的にもまだ始まったばかりであるが、元の星の質量や化学組成、恒星風活動、また、非球対称爆発といった超新星の特性、そして残骸の進化を探る新たなプロブになることが大いに期待される。

(2) この研究で明らかにしようとするのは、再結合プラズマ状態が、超新星-超新星残骸の進化におけるどのような過程に関係しているのか、あるいは元の星のプロパティや爆発の対称性などと関係があるのか、ということである。再結合状態をつくりうる様々なメカニズムを検討する必要がある。

Suzaku の観測が示したことの一つは、超新星残骸の個性として特異な現象というよりは、どうも、かなり普遍的に再結合状態を示す種類の超新星残骸がありそうだ、ということである。これまで見つからなかったのは、エネルギー分解能と S/N 比の限界が関係している。実際、ASCA で過電離状態を報告した超新星残骸や、Suzaku で直接再結合放射を見いだした超新星残骸は比較的よく知られた天体で、他の衛星でもよく観測されているが、これまで明確な報告はされていない。再結合プラズマ状態 (recombining) の起源となる物理過程を探り、このような特徴を示す超新星残骸の進化を明らかにして、元の星の質量や恒星風活動、爆発の特性、爆発した環境などとの関係を描き出すこと、また、Suzaku の研究者とも議論しながら、できるだけ早く観測的研究への指針を示すことがこの研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 超新星残骸の再結合プラズマ状態の起源の可能性の一つとして、高エネルギー光子による光電離領域を評価し、到達電離状態や、その後の時間発展を調べる。一般に、再結合プラズマを生成する過程として最も考えやすいのは光電離である。若い超新星残骸の衝撃波加熱されたプラズマは keV オーダーの高温になり X 線が放射されるが、超新星物質も、また一般的な星間物質も、この放射に対して光学的に薄い。爆発直後の超新星物質はまだ密度が高いが、超新星残骸が X 線で輝く頃には密度は低下してしまう。早い時期に電離光子を放出する可能性としては、超新星爆発の際の UV フラッシュあるいはブレイクアウト X 線がある。Suzaku で観測された W49B 超新星残骸では鉄の強い再結合放射が見つかり、前者の紫外線光子では明らかにエネルギーが足りない。後者は、数十年前に理論的に示唆され、最近になって観測されたとの報告がある。この放射はごく短時間で終わり、

超新星物質を光電離するのは簡単ではない。しかし、これらの議論はあくまで一般的な星間空間での超新星爆発を考えた場合の見通しにすぎない。例えば、超新星が密度の高い星周物質中で起きたらどうなるのか、あるいは、 γ 線バーストのような高エネルギー光子を放出する爆発現象であったらどうなるのか、などの問いに十分な答えが得られているわけではない。

観測から得られる情報としては、スペクトルの他に、再結合プラズマの空間分布が重要と考えている。鉄の再結合放射が見つかったこと、さらに鉄の元素量が太陽組成比の数倍と推定されることは、光電離起源とした場合に可能な条件をかなり制限する。例えば、ブレイクアウト X 線による電離を考えるなら、非球対称な爆発やジェット様の重元素放出が必要になるだろう。周囲の物質とのグローバルな接触面を越えて、超新星部物質起源と思われる重元素が観測されている例もあるので、あり得ない話ではない。再結合放射が発見されたばかりで、空間分布については未だ十分な情報がないが、超新星残骸の環境などを含め、観測の研究者と活発に情報交換、議論をしながら研究を進める。

(2) Suzaku の観測から示唆されることは、ある種の超新星残骸にかなり普遍的な特性である可能性と、再結合プラズマ状態を生じた物理過程の直後というよりは、その事象が起きてから超新星残骸の年齢に近い時間を経ていると考えられることである。前者は、言い換えれば、元の星のプロパティや活動を反映している可能性を意味し、再結合放射をプロブとして確立する意義は大きい。後者は、超新星残骸のかなり初期の進化の段階で起きた現象に起因することを意味する。光電離の場合と違い、これは rarefaction 起源においては自明ではない。例えば、星周物質の多様性：もしそれが過去の恒星風物質であるとすれば、単に質量損失率でなく、恒星風の速度や恒星風活動の停止から超新星爆発までの時間に依存して、様々な多様性が生じうる。ただ、爆発直後の超新星物質の膨張速度が恒星風の速度に比べ十分大きければ、星周物質の多様性は、結果として生じる再結合プラズマ状態では収束する可能性がある。

Suzaku で見つかった再結合放射を示す超新星残骸は、何れも電波の強度分布はシェル様であるが X 線は非対称な分布を示す mixed-morphology (MM-SNR) に分類される。MM-SNR はその環境から星形成領域での重力崩壊型爆発と考えられ、恒星風物質中で爆発したことによる衝撃波のブレイクアウトが自然に期待される。MM-SNR を想定して、赤道面方向に偏る非一様恒星風物質中で爆発した場合の超新星残骸の力学的進化を調べる。

衝撃波速度から Coulomb 衝突を仮定してイオン温度、電子温度を求め、密度から緩和時間を考慮して電離状態を評価する。様々な環境の下での超新星残骸の進化を3次元流体計算によって追い、衝撃波が星周物質から星間空間に抜ける際の rarefaction の多様性、結果として生じる電離状態を調べる。

(3) これまでに再結合放射が確認された超新星残骸は何れも mixed-morphology (MM-SNR) に分類されるが、確証を得るため、Suzaku key project として系統的な超新星残骸の再結合 X 線放射サーベイを提案する。再結合 X 線の起源として、恒星風物質中で超新星爆発したことによる衝撃波のブレイクアウトを考えると、X線は逆進衝撃波に因る超新星放出物質から放射されるので、X線放射がシェルの内部に偏る MM-SNR の特徴も自然に説明できる。一方、星間空間に伝播する衝撃波に因るシェルからの X 線放射は暗くて観測にかからない。しかし、シェルでは衝撃波によって粒子が加速され GeV 電子にシンクロトロン電波が放射されると期待される。また、一般に MM-SNR の環境には水素電離領域や分子雲が多く見られ、衝撃波との相互作用や加速された粒子との相互作用が起こりうる。これによって GeV- γ 線放射が期待される。実際、これまでに観測された再結合放射を示す MM-SNR からは、全て、シンクロトロン放射のシェルと、GeV-および TeV- γ 線が観測されている。ただし、TeV- γ 線については上のシナリオで自明なわけではない。

恒星風物質中で起きた超新星という描写は、MM-SNR の再結合 X 線放射やその分布をよく説明するが、では、それらから観測されている電波や γ 線の非熱的放射も説明しうるかというのが課題である。また、超新星が起きた環境についても、恒星風の残骸だけでなく、H II 領域の残骸、分子雲など、より現実的で複雑な環境を考える。これはとくに TeV- γ 線放射のモデリングで必要になると考えており、粒子の加速だけでなく粒子の拡散についても調べる。再結合 X 線放射の解明から始まった MM-SNR の研究を総括し、超新星残骸の起源・進化について熱的放射から非熱的放射まで整合的な描写を得ることを目指す。

4. 研究成果

(1) 超新星残骸で見つかった再結合プラズマ状態 (recombining) の起源について、超新星爆発時に周囲の物質が光電離された可能性、超新星爆発が恒星風物質中で起きて衝撃波がその物質を抜ける際の rarefaction により再結合状態が生じた可能性、また、衝撃波

で加速された粒子あるいは宇宙線によって超新星残骸プラズマの一部が過電離状態になった可能性を検討した。再結合 X 線放射を示す超新星残骸の探査も進み、これまでに見つかったものは全て、mixed-morphology (電波でシェルが明るく内部に X 線放射域がある) に分類される超新星残骸である。その解析結果も考慮すると、再結合プラズマの最も有力な物理過程として、高い電離状態での急激な温度降下が考えられる。上の2番目の可能性で期待される過程で、超新星の周囲にあった、例えば恒星風物質から衝撃波がブレイクアウトする際、急激な断熱膨張によって、一度、逆進衝撃波で加熱された超新星物質が急激に冷却される。

観測されるような X 線輝度分布をこのシナリオで再現できるか確かめるため、赤道面方向に偏る非一様恒星風物質中で爆発した場合の超新星残骸の力学的進化を3次元流体数値計算によって調べた。その結果、極軸方向、赤道面方向とも衝撃波のブレイクアウトが起こり再結合進行状態が生じるが、極軸方向では早くに2度目の逆進衝撃波が物質を再加熱して電離進行状態に戻る可能性もあることが分かった。星間空間に伝播する衝撃波はシェルを形成するが X 線輝度は低く、その内部で、逆進衝撃波によって加熱された超新星物質から再結合 X 線が放射されるという描写を得た。仮定した恒星風物質モデルにどのように依存するか、さらに計算を進めている。また、再結合 X 線放射を示す超新星残骸の系統的な観測的研究を Suzaku の key project として提案し採択された。

(2) Suzaku による観測的研究から、再結合 X 線放射を示す超新星残骸は、電波の強度分布はシェル様であるが X 線はその内部に非球対称な分布を示す mixed-morphology (MM-SNR) に分類されるものであることが分かってきた。また、理論的研究では、恒星風物質中で爆発した超新星の残骸の進化を数値計算で追い、再結合 X 線放射や MM-SNR の X 線輝度分布を再現できることが分かってきた。超新星の周りの物質分布は、基本的に、爆発前の恒星風活動、質量損失率や恒星風速度で決まる。そこで、これらに依存して再結合放射や輝度分布がどのような多層性を示すか研究を進め、結果を学会講演の他、論文で発表した。

一般に、赤色超巨星の恒星風は青色超巨星に比べて質量損失率が 1-2 桁大きく速度は 2 桁小さいとされるが、計算では一定の質量損失率に対し速度を 1 桁変えて比較を行った。また、星間物質の密度については、H II 領域が形成されていた可能性を考え 1 桁変えて比較した。これらの結果、Wolf-Raye 星や青色超巨星の 1000 km/s オーダーの恒星風では再

結合状態が弱まること、一方、赤色超巨星の 10 km/s オーダーの恒星風では衝撃波のブレークアウトが早い時期に生じるため、観測されているような MM-SNR の年齢では特徴的な輝度分布を再現できない可能性があることが分かった。MM-SNR は比較的重い星のコア崩壊型超新星と考えられ、その環境には H II 領域や分子雲など星形成領域の特徴が見られる。実際、レーザーや γ 線放射から分子雲との相互作用が示唆されている。そこで、恒星風物質だけでなく、古い H II 領域や H I ガス、分子雲など複雑な環境を考慮し、電波シェルや γ 線といった非熱的放射も視野に入れて、MM-SNR の形成・進化と再結合 X 線放射の関係をさらに調べている。この研究の一部は天文学会で発表した。

(3) MM-SNR の内部で明るい再結合 X 線は熱的過程によるもので、reverse shock が伝播した超新星放出物質から放射される。一方、forward shock (blast wave) が伝播した星間物質シェルからの X 線放射は密度が低いために暗い。しかし、星間物質シェルからは、衝撃波で加速された非熱的粒子によるシンクロトロン電波や γ 線が期待され、実際、MM-SNR の電波強度分布は X 線放射の外部に広がったシェル様である。

そこで、X 線放射をよく説明する超新星残骸の力学モデルを用いて、星間物質シェルにおける粒子加速と、それによるシンクロトロン電波強度、および、制動放射、宇宙背景放射光子との逆コンプトン散乱、陽子-核子衝突による γ 線強度を理論的に計算した。MM-SNR の観測と比較して、電波強度はよく一致するが γ 線強度は 1 桁弱いという結果を得た。しかし、MM-SNR は比較的重い星のコア崩壊型超新星と考えられ、その環境には H II 領域や分子雲など星形成領域の特徴が見られる。実際、レーザーや γ 線放射から分子雲との相互作用が示唆されている。このような環境を考慮し、例えば加速粒子の約 10% が典型的密度の分子雲と相互作用すれば γ 線強度も観測値と一致することを示すことができた。この結果を学会で発表するとともに学術誌に投稿した (受理, 印刷中)。この研究を基に、MM-SNR とシェル型 SNR の粒子加速の差異についてさらに研究を進めている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① Ohnishi Takao, Koyama Katsuji, Tsuru Takeshi Go, Masai Kuniaki, Yamaguchi Hiroya, Ozawa Midori, X-Ray Spectrum of a

Peculiar Supernova Remnant, G359.1-0.5, Publ. Astron. Soc. J., 査読あり, 2011, 63, 527.

② Shimizu Takafumi, Masai Kuniaki, Koyama Katsuji, Evolution of Supernova Remnants Expanding out of the Dense Circumstellar Matter into the Rarefied Interstellar Medium, Publ. Astron. Soc. J., 査読あり, 2012, 64, 24.

③ Ota Naomi, Onzuka Kiyokazu, Masai Kuniaki, Density Profile of a Cool Core of Galaxy Clusters, Publ. Astron. Soc. J., 査読あり, 2013, in press.

④ Shimizu Takafumi, Masai Kuniaki, Koyama Katsuji, Non-Thermal Radio and Gamma-Ray Emission from a Supernova Remnant by the Blast Wave Breaking Out of the Circumstellar Matter, Publ. Astron. Soc. J., 査読あり, 2013, in press.

[学会発表] (計 15 件)

① Yamaguchi Hiroya, Masai Kuniaki, Ozawa Midori, Ohnishi Takao, New Insight into SNR Evolution Revealed by the Discovery of Recombination X-rays, COSPAR, 2010, 38, 2758.

② Ohnishi Takao, Koyama Katsuji, Tsuru Takeshi Go, Masai Kuniaki, Yamaguchi Hiroya, Ozawa Midori, Discovery of Strong Radiative Recombination Continua from the Supernova Remnant G359.1-0.5, AIPC, 2010, 1269, 463.

③ Ohnishi Takao, Koyama Katsuji, Tsuru Takeshi Go, Masai Kuniaki, Yamaguchi Hiroya, Ozawa Midori, Extremely over-ionized plasma in the supernova remnant G359.1-0.5, AIPC, 2012, 1427, 271.

④ Sawada Makoto, Koyama Katsuji, Yamaguchi Hiroya, Masai Kuniaki, The first results from the Suzaku spectroscopic survey of recombining plasma in supernova remnants: W44 and W28, AIPC, 2012, 1427, 278.

⑤ Ota Naomi, Masai Kuniaki, Density Profile of a Cool Core of Galaxy Clusters, Conference on The mass profile of galaxy clusters from the core to the outskirts, 18-22 March 2013 (Madonna di Campiglio, Italy).

⑥ 澤田真理, 大西隆雄, 小山勝二, 山口弘悦, 政井邦昭, すざく衛星による再結合優勢な超新星残骸の探査I-W44とW28, 日本天文学会, 2010年9月22-24日(金沢大学)

⑦ 澤田真理, 小山勝二, 山口弘悦, 政井邦昭, 馬場彩, 「すざく」X線分光による超新星残骸W28の再結合プラズマの空間分布, 日本天文学会, 2011年9月19-22日(鹿児島大学)

- ⑧ 清水崇文, 政井邦昭, 恒星風物質 (星周物質) と相互作用する超新星残骸の進化, 日本天文学会, 2011年9月19-22日 (鹿児島大学)
- ⑨ 清水崇文, 政井邦昭, Mixed-morphology型超新星残骸の起源, 日本天文学会, 2012年3月19-22日 (龍谷大学)
- ⑩ 木村聖人, 政井邦昭, 銀河団における宇宙線の加速, 日本天文学会, 2012年3月19-22日 (龍谷大学)
- ⑪ 澤田真理, 小山勝二, 大西隆雄, 内田裕之, 政井邦昭, 清水崇文, ASTRO-H/SXSの超精密分光による新しいSNR進化メカニズムの解明, 日本天文学会, 2012年3月19-22日 (龍谷大学)
- ⑫ 政井邦昭, 広帯域非分散分光撮像がもたらす超新星残骸研究の展開, 日本天文学会, 2012年3月19-22日 (龍谷大学)
- ⑬ 政井邦昭, 宇宙X線観測と放射過程, 日本物理学会シンポジウム: 宇宙X線観測の50年と物理学へのインパクト, 2012年9月11-14日 (京都産業大学)
- ⑭ 清水崇文, 政井邦昭, Mixed-morphology型超新星残骸の非熱的粒子, 日本天文学会, 2013年3月20-23日 (埼玉大学)
- ⑮ 寺口智文, 政井邦昭, 相対論的衝撃波ブレークアウトにおける光子スペクトル, 日本天文学会, 2013年3月20-23日 (埼玉大学)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

政井邦昭 (MASAI KUNIAKI)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 80181626

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし