

2008年9月11日
独立行政法人 理化学研究所

鉄との合金に重要なレアメタルの生成現場を宇宙で初めて確認

- ティコの超新星の残骸を X 線天文衛星「すざく」で精密観測 -

夜空にきらめく星は、一生を終える時、超新星と呼ぶ大爆発を起こして宇宙に飛び散り、消え去ります。超新星爆発では、身の回りに存在しているあらゆる元素が生み出され、いわば、宇宙の錬金術師と言えます。1572年、デンマークの著名な天文学者のティコ・ブラーエ (Tycho Brahe) は、北天で W の文字に輝くカシオペア座において、核融合暴走型の超新星爆発を肉眼で観測しました。通称「ティコの超新星」(SN1572) と呼ばれるものです。核融合暴走型の超新星爆発は、宇宙全体の超新星爆発の約 3 分の 1 を占め、宇宙に存在する「鉄」の大半を生産します。つまり、このような超新星爆発で錬金の具合いを知ることは、宇宙の進化を見極めることにつながるのです。

基幹研究所牧島宇宙放射線研究室の研究グループは、わが国で 5 番目の X 線天文衛星「すざく」を駆使し、ティコの超新星の残骸が、レアメタルの一種であるクロム、マンガンの生産現場であることを発見しました。残骸を X 線で精密に測定したところ、電離した鉄の強いシグナルに加えて、クロム、マンガンが発する微弱な X 線のシグナルを観察、核融合暴走型の爆発がその生産現場に間違いないことを確定しました。

さらに、電離しているケイ素、硫黄、アルゴン、鉄から発する強い X 線のシグナルを詳細に観測し、超新星の 2 次元的な広がりに加えて奥行き方向の測定にも成功、爆発時に生成した元素がどのように飛散し分布しているかという、元素の立体分散構造を世界で初めて明らかにしました。最新の 3 次元シミュレーション研究では、爆発時に生成した元素は混じりあっていると予想されていました。しかし、今回の観測結果によると、元素の重さの順に層状に並んだ「まん丸なタマネギ構造」というシンプルなものであるとわかりました。今後、さらに遠方の宇宙（昔の宇宙）を観測することで、さまざまな超新星爆発の振る舞いが、太古の宇宙でも同じメカニズムなのか、という謎を解くことが可能となります。

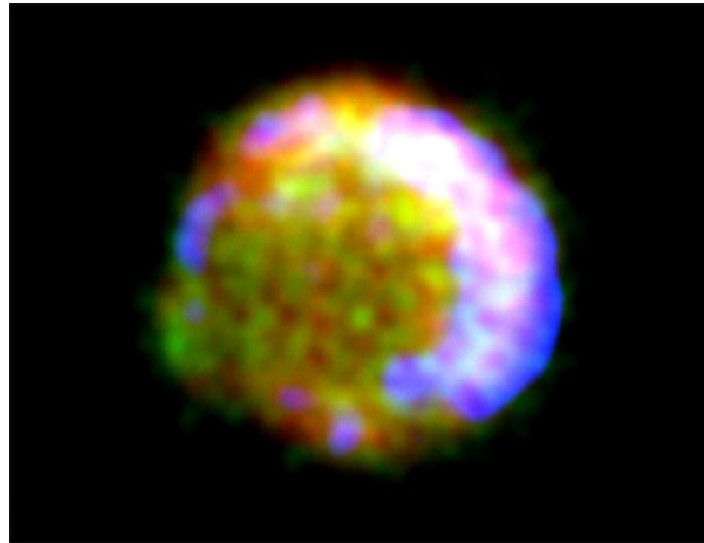


図 「すざく」でみたティコの超新星残骸 RIKEN/Tamagawa

2008年9月11日
独立行政法人 理化学研究所

鉄との合金に重要なレアメタルの生成現場を宇宙で初めて確認

- ティコの超新星の残骸を X 線天文衛星「すざく」で精密観測 -

◇ポイント◇

- ・生活に不可欠なクロム、マンガンの生成現場を核融合暴走型超新星と特定
- ・ドップラー観測により超新星爆発の 3 次元構造がタマネギ状と発見
- ・核融合暴走型の超新星爆発を理解する手がかりに

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）は、デンマークの著名な天文学者ティコ・ブラーエ（Tycho Brahe）が 1572 年にカシオペア座で発見した超新星「SN1572；通称、ティコの超新星」の残骸から、鉄との合金に重要なレアメタル^{*1}であるクロム^{*2}、マンガン^{*2}の生産現場を発見しました。わが国 5 番目の X 線天文衛星「すざく」^{*3}を活用してティコの超新星の残骸を X 線で精密に観測したところ、電離した鉄の出す強いシグナルに加え、クロム、マンガンが発する微弱な X 線のシグナルを検出し、核融合暴走型の超新星爆発がその生成現場であることを初めて特定しました。理研基幹研究所牧島宇宙放射線研究室（牧島一夫主任研究員）の玉川徹専任研究員らの研究グループ^{*4}の成果です。

クロムとマンガンは、ステンレスやフェロマンガンといった鉄との合金を作る重要なレアメタルとして、現代社会に欠かせない元素です。これらのレアメタルは、宇宙では鉄の 100 分の 1 ほどしか存在しない微量な元素ですが、超新星爆発の温度や物質密度によって生成量が敏感に変わるので、星の爆発メカニズムを知るために最も重要な元素だと考えられています。研究グループは、これまでの観測衛星より優れた感度を持つ測定器を備えた X 線天文衛星「すざく」でティコの超新星の残骸を観測し、クロム、マンガンの発する X 線シグナルの検出に成功、爆発時の燃焼に衝撃波が関与していたことを示唆する結果を得ました。

さらに、残骸中に存在する、電離したケイ素、硫黄、アルゴン、鉄から発せられる X 線の強いシグナルを詳細に観測したところ、超新星爆発の 2 次元的な広がりだけでなく、奥行き方向の構造を測定することに成功しました。星が爆発したときに生成された元素がどのように分布しているか、その立体構造を明らかにしたのは世界で初めてのことです。最新の 3 次元シミュレーション研究では、爆発の過程で生成された元素は混ざり合うことが予想されていましたが、研究グループが得た立体構造は、生成された元素は混ざらずに、中心から外側に向かって、元素の重さの順に層を構成している「まん丸なタマネギ構造」という極めてシンプルなものでした。今後の超新星爆発のシミュレーション研究に重要な方針を示唆します。

本研究成果は、9 月 11 日（木）から 9 月 13 日（土）に岡山理科大学で開催する日本天文学会で発表します。

1. 背景

星は、その一生の最後に、超新星と呼ばれる大爆発を起こして宇宙に飛び散ります。ビッグバンにより 137 億年前に宇宙ができた当初、この世界には水素とヘリウムしかありませんでした。私たちの身の回りにある元素の大半は、星の内部の核融合で作られ、さらに超新星爆発の際、激しい合成や分解の過程を経て宇宙空間に飛び散り、長い年月をかけて現在の姿になったと考えられています。超新星爆発は、いわば、宇宙における錬金術師です。

超新星爆発の痕跡は、爆発後 1,000 年から 10,000 年の間、超新星の残骸として X 線などで観測することができます。超新星の残骸を観測することによって、あたかも広がった花火の色や形が、元の火薬の種類や詰め方を反映しているように、爆発した瞬間の元素の種類や分布の情報を得ることができます。

研究グループは、これまでの衛星より優れた感度を持つ、日本の X 線天文衛星「すざく」に搭載した高感度 X 線 CCD カメラを用いて、カシオペア座にある「ティコの超新星」と呼ばれる天体の残骸を観測しました。この超新星は 1572 年に突如現れ、宇宙は安定の象徴と考えていた当時の人々を驚かせました。最初に報告したのは、デンマークの著名な天文学者ティコ・ブラーエ (Tycho Brahe) で、肉眼による観測ながら、明るさの変化が詳細に記録された世界で初めての超新星となりました。この星の残骸は、現在でも X 線放射を極めて明るく観測できる天体として知られています (図 1)。今回の「すざく」のデータは、2006 年 6 月 27~30 日の X 線観測によって取得したものです。その結果の重要性から、2008 年 8 月 4 日~8 日には、さらに時間を伸ばした詳細な観測を行っています。

「ティコの超新星」のようなタイプの爆発 (核融合暴走型 (Ia 型) の超新星爆発^{*5}) は、宇宙全体の超新星爆発の、おおよそ 3 分の 1 を占めます。このタイプの超新星爆発は、宇宙に存在する鉄の大半を生成していることが知られており、宇宙の進化を知る上で欠かすことができない現象です。さらに重要なのは、このタイプの超新星爆発は、宇宙の膨張、すなわちダークエネルギー^{*6}の量を知るための灯台 (標準光源) として利用されていることです。しかし、その爆発メカニズムは誰も解明しておらず、詳細な研究を行うことは、私たちの宇宙の理解を変える可能性を秘めています。

2. 研究手法と成果

研究グループは「ティコの超新星」の残骸から、電離した鉄の強いシグナルに加え、レアメタルであるクロムとマンガンが発する鉄の 50 分の 1 程度の微弱な X 線のシグナルを検出することに成功しました (図 2)。核融合暴走型の超新星爆発では、その内部が 50 億°C 以上もの高温になるので、鉄とともにクロムやマンガンが生成されることは理論的に予測されていましたが、実際にその生成現場が核融合暴走型の超新星爆発だと特定されたのは、初めてのことです。

クロムとマンガンは、日本で国家備蓄が義務づけられているレアメタル 7 種 (ニッケル、クロム、タングステン、モリブデン、コバルト、マンガン、バナジウム) のうちの 2 つです。鉄にクロムやニッケルを加えると、ステンレスと呼ばれる、さびない優れた素材となりますが、包丁などの刃物としては切れ味が悪くなります。逆にマンガンを加えると鉄の硬度があがるので「焼き入れ^{*7}」が効果的になり、硬

くて切れ味の良い刃物となります。鉄をしなやかにするクロムと、鉄を硬くするマンガンは、鉄に大きく依存した私たちの産業や生活を支える重要な元素です。

今回の観測では、クロムとマンガンの生成現場を宇宙で初めて特定しただけでなく、その生成量も測定しました。レアメタルという名にたがわず、鉄に比べて圧倒的に生成量が少なく、その生成量は爆発の温度や物質密度に大きく依存するため、超新星内部を調べる手段として観測が待ち望まれていました。ティコの超新星でのクロムとマンガンの2種類のレアメタルの生成量は、鉄の約50分の1で、爆発の理論モデルから予想される値に極めて近いことがわかります(図3)。

このように、現代社会で鉄を助ける脇役として活躍しているクロムとマンガンを、宇宙において、私たちが超新星爆発を知るための主役として活躍しているのです。ちなみに地球上では、私たちが採掘できるクロムやマンガンの量は、鉄の何1,000分の1しかありません。それに比べると「ティコの超新星」での生成量は多く、宇宙では、もはやレアメタルをレア(希少)と呼ぶことは正しくないのかもしれない。

さらに、超新星爆発により生成されたケイ素、硫黄、アルゴン、鉄が発する強いシグナルを詳細に調べたところ、立体的にどのように元素が分布しているのか、3次元構造を初めて明らかにすることができました。

通常観測では、図1のように、正面から見た写真を撮ることは可能ですが、奥行き方向にどのように残骸が広がっているか、確認する手段はありませんでした。今回はドップラー効果^{*8}により、元素が奥行き方向にどのような速度で飛んでいるかを測定することで、その立体構造を暴き出すことができました(図4)。その結果、超新星残骸の中心から外に向け、重い元素から軽い元素の順で、きれいなタマネギ状をしていることが判明しました(図5)。

この結果は、最近の3次元シミュレーション研究で示されているような、爆発の時に生成された元素が、複雑に混ざり合うという描像を否定しており、きわめてシンプルな爆発であったことを初めて示しました。

これまで核融合暴走型の超新星爆発は、通常物質が燃えるような「遅い燃焼」により爆発すると考えられていました。しかし、今回のX線解析によるクロムとマンガンの鉄に対する生成量の違いから、さらに、衝撃波による「速い燃焼」が加わっていたことがわかりました。きれいなタマネギ状の立体構造の解明は、その燃焼過程では物質がかき混ぜられないという結果を導き出したもので、これらは、今後の3次元シミュレーション研究に大きな制限となります。

3. 今後の期待

今回の研究は、「ティコの超新星」の残骸がX線で極めて明るかったこと、プラズマの温度が重い元素であるクロムやマンガンを輝かせるのに十分に高かったこと、「すざく」衛星の感度が優れていたことなどが幸いしました。燃焼方法や立体構造を明らかにすることで、理論シミュレーションが不十分であることを示したわけですが、今後は、さらに細かい立体構造を観測し、ほかの多くの超新星残骸と同様の研究を行うことで、核融合暴走型の超新星爆発を完全に理解していく考えです。ティコの弟子でドイツの著名な天文学者ヨハネス=ケプラー(Johannes Kepler)が1604年に発見した「ケプラーの超新星」の残骸などが、次の重要なターゲット

です。

さらに、私たちが生存する銀河系の内部だけでなく、近くの銀河である大マゼラン星雲、小マゼラン星雲にある残骸も重要です。マゼラン星雲は、私たちの銀河と違って、水素やヘリウムに比べ重い元素の量が少なく（つまり進化の速度が遅く）、太古の宇宙環境を維持していると考えられています。このような場所での超新星爆発を調べることは、遠方宇宙（つまり昔の宇宙）を知ることに繋がります。マゼラン星雲は遠いので「すぎく」衛星ではX線観測が難しいのですが、現在打ち上げ計画が進められている次世代X線天文衛星ASTRO-Hに搭載される、よりエネルギー分解能の高い装置を用いると、同じような研究ができると期待されます。太古の宇宙でも超新星爆発が同じような振る舞いをしているのか、それを観測から確立したいと考えています。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所 基幹研究所

牧島宇宙放射線研究室

専任研究員 玉川 徹 (たまがわ とおる)

Tel : 048-467-9336 / Fax : 048-462-4640

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

<補足説明>

※1 レアメタル

鉄やアルミニウムなどの金属とは違い、その生産量や埋蔵量が限られている希少金属のことを指す。機能材料として優れているので、産業界のあらゆる場面で用いられる。しかし、産出国が南アフリカや中国などに偏っているので、近年はその確保が国家的な課題となっている。

※2 クロム、マンガン

クロム (Cr : 原子番号 24) とマンガン (Mn : 原子番号 25) は、周期律表で鉄 (Fe : 原子番号 26) の直前に位置を占める兄弟元素。鉄はクロムやマンガンを含むことで、さまざまな機能材料となり、現代社会で重宝されている。クロムはギリシャ語のクローマ (色) に由来しており、その化合物はさまざまな色を示す。鉄・ニッケルとの合金はステンレスと呼ばれており、耐食性を持つ優れた素材である。マンガンは硬いが脆い金属で、鉄との合金は焼き入れ性や強度が向上するので、自動車の車体、レール、産業機械など、ありとあらゆるところで利用されており、製鉄業界では欠かせない元素である。現状では、資源の大半を南アフリカに依存している。日本近

海にはマンガン団塊などとして大量の資源が眠っているが、それを採掘する方法は発見されていない。

※3 X線天文衛星「すざく」

2005年7月10日に宇宙航空研究開発機構（JAXA）内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた、わが国5番目のX線天文衛星。これまでに、われわれの銀河系の中心部の激しい活動、隠されたブラックホールの発見、宇宙線の起源解明など、数多くの成果を挙げてきた。

JAXA「すざく」衛星のページ (<http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/>)

※4 研究グループ

国立大学法人名古屋大学（古澤彰浩特任助教、國枝秀世教授、上野大輔修士課程学生）、東京理科大学／理化学研究所（早藤麻美博士課程学生）、東京大学／理化学研究所（牧島一夫教授）、宇宙航空研究開発機構（馬場彩研究員、田村啓輔准教授）、大阪大学（常深博教授）、ルトガース大学（John Hughes 教授）、NASA／GSFC（Una Hwang, Rob Petre）、理研基幹研究所牧島宇宙放射線研究室（玉川徹専任研究員）の共同研究。

※5 核融合暴走型（Ia型）の超新星爆発

太陽の8倍より軽い恒星は、その一生の最後に、地球ほどの大きさに縮んで冷えていき、白色矮星と呼ばれる天体となる。もし白色矮星がほかの恒星と連なって回っているとしたら、その恒星から白色矮星に向けて水素ガスが流れ込む。そして重さが限界を超えたところで、核融合反応が暴走して、大爆発を引き起こす。これが「テイコの超新星」などが属する核融合暴走型（Ia型と呼ぶ）の超新星爆発の標準モデルと考えられている。Ia型は全宇宙の超新星爆発の3分の1を占め、鉄の大半を生成していると考えられているが、その爆発メカニズムはほとんど解明されていない。

※6 ダークエネルギー

最近のIa型超新星爆発の観測から、宇宙はどんどん速度を上げながら膨張していることがわかってきた。物質だけでできた宇宙は、速度を上げながら膨張することは決して起こらないので、未知の性質を持ったエネルギーが宇宙の70%近くを占めていると考えられるようになった。これがダークエネルギーと呼ばれるものである。測定にはIa型超新星爆発を用いるのだが、今のところ、その爆発メカニズムはブラックボックスとし、明るさの変化だけを用いる。

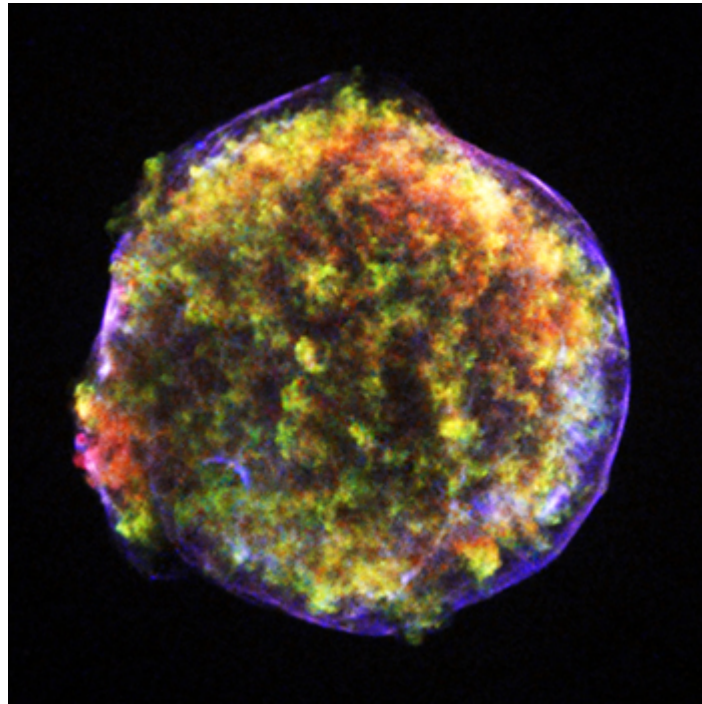
※7 焼き入れ

鉄などの金属を熱してから急冷し、硬化させる作業のことを指す。日本刀などの刃物を硬くする作業が有名だが、工業的にも鉄の合金を硬化させるために同様の作業を行う。

※8 ドップラー効果

観測者のほうに向かってくる物質から飛び出した光は、実際の波長よりも短く（エ

エネルギーが高く) 観測される。観測者から離れる場合はその逆に、実際の波長よりも長く (エネルギーが低く) 観測される。これが光のドップラー効果である。近づく救急車のサイレンの音が高くなり、遠ざかるサイレンの音が低く聞こえる「音のドップラー効果」と同じ原理である。光の速度の 100 分の 1 (秒速 3,000 キロメートル) で飛んでいる物質ですら、鉄の X 線信号は、そのエネルギーの約 100 分の 1 しか値が変化しない。現在の観測装置でとらえられる限界に近い値である。



©NASA/CXC/Rutgers/J.Warren&J.Hughes et al.

図1 「ティコの超新星」の残骸。

2000年に打ち上げられたチャンドラ X線天文衛星で観測。

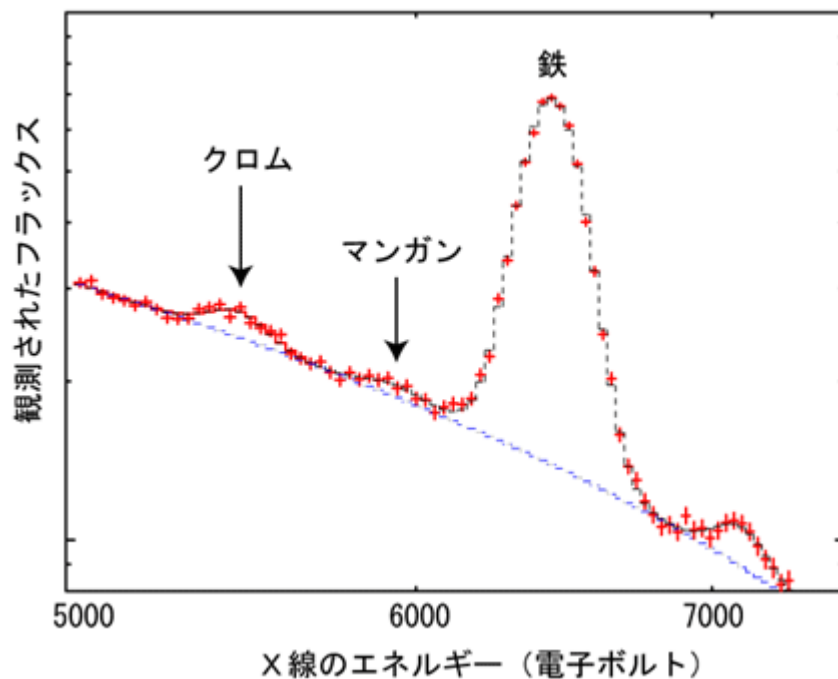


図2 「すざく」が観測したクロムとマンガンのシグナル

元素は高温のプラズマ中で、それぞれ特有のエネルギーをもった電磁波を放出する。これを輝線と呼び、その元素がそこに存在することを示す明確なシグナルとなる。鉄の強い輝線の左側に、クロムとマンガン特有の輝線が観測されているのがわかる。

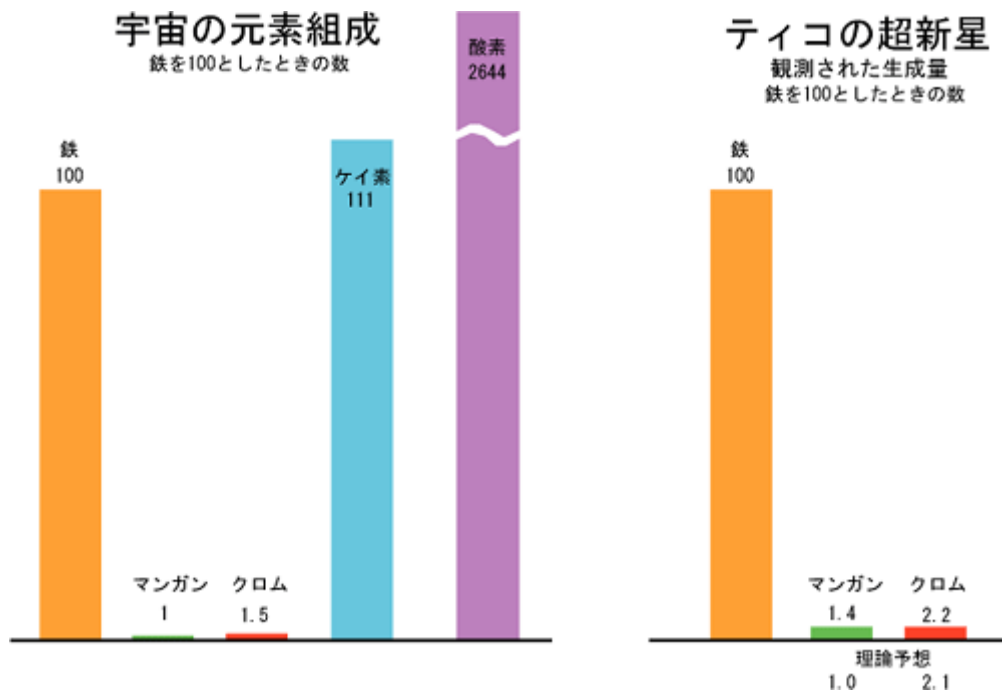


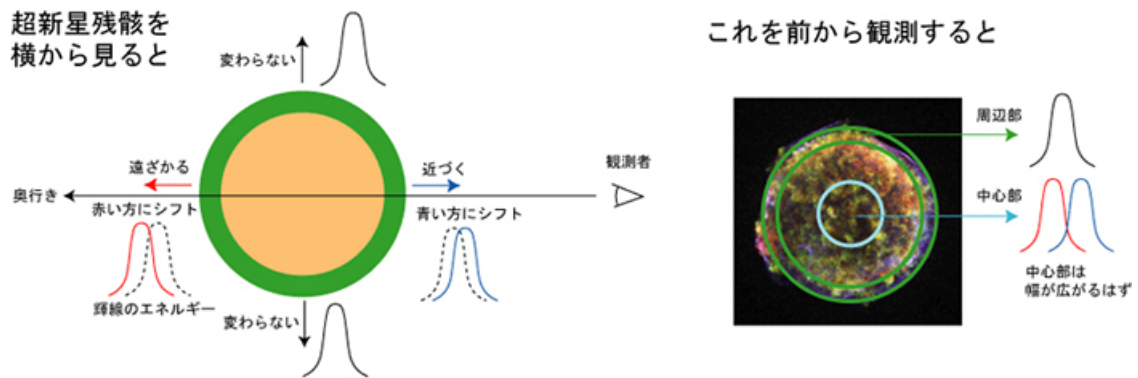
図3 鉄、マンガン、クロム、ケイ素、酸素の組成の比較

(左) 宇宙における元素組成

鉄に比べてマンガンやクロムは100分の1程度しかない。地球に多く存在するケイ素や酸素に比べると、その少なさが際立つ。

(右) ティコの超新星爆発で観測された生成量

マンガンやクロムの生成量は予想通り少なく、理論モデルによる値と極めて近いことがわかる。



実際の観測データ

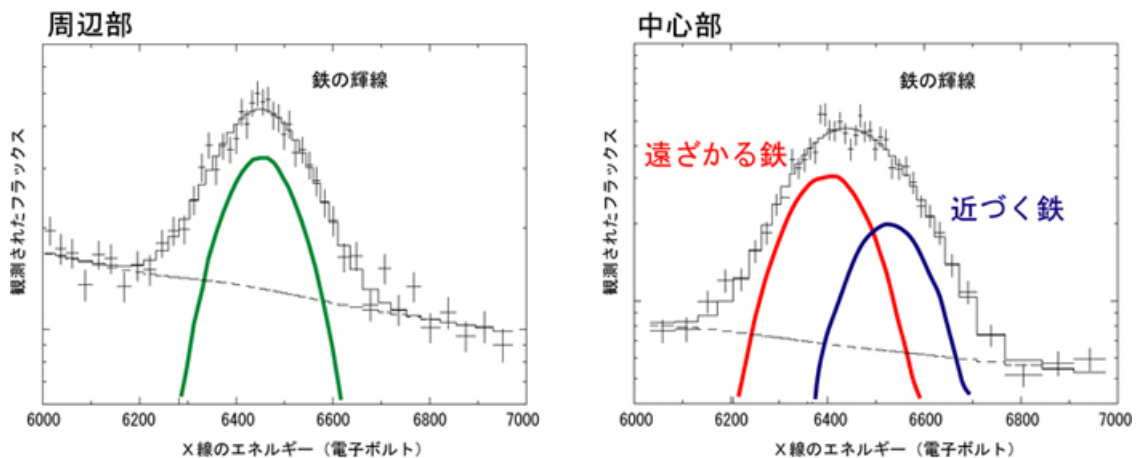
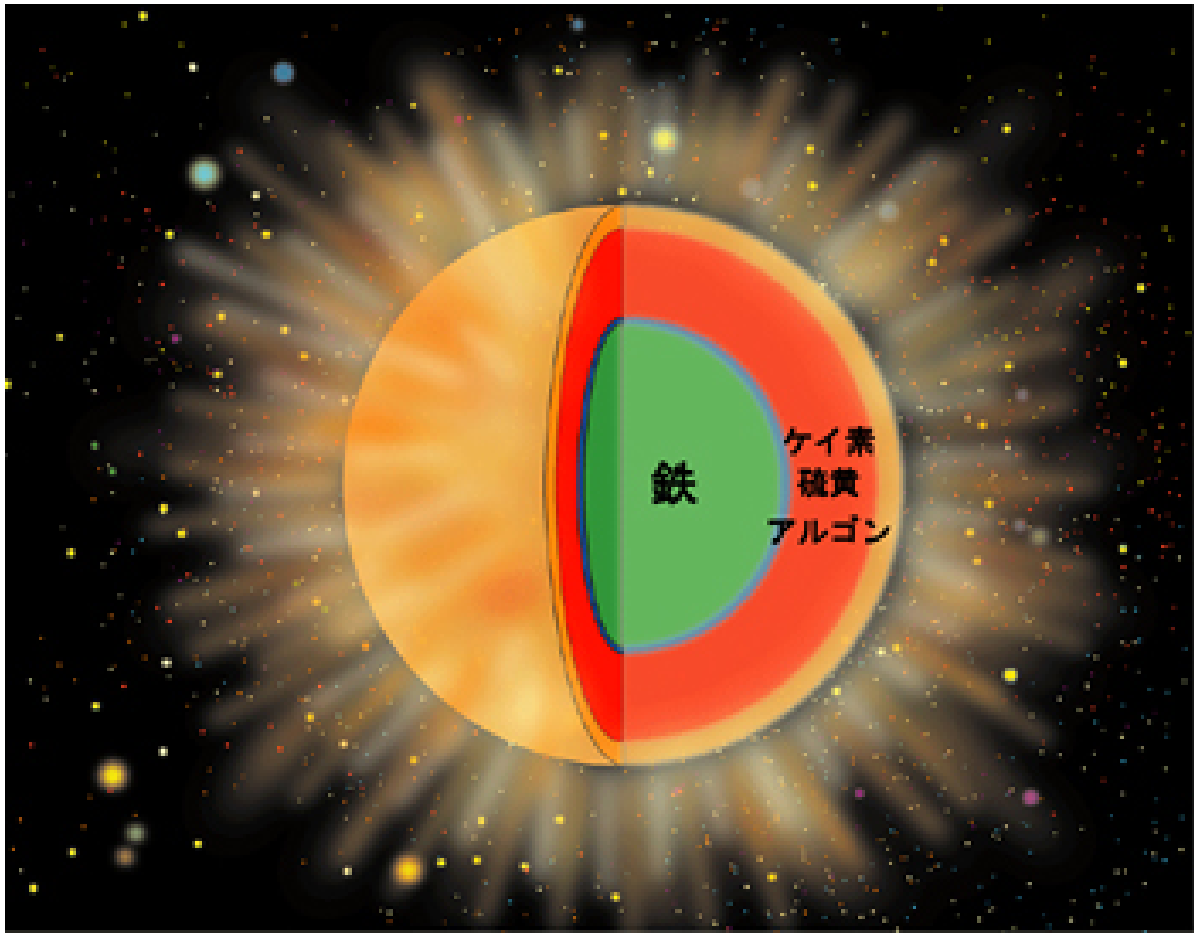


図4 ドップラー効果を利用した3次元構造の観測

- (左上) 超新星爆発を横に切ってみると、3次元的に広がっている場合、自分のほうに近づいてくる元素と、自分から遠ざかる元素がある。ドップラー効果によって、近づいてくる元素の輝線は青くなり、遠ざかる元素の輝線は赤くなる。上下に飛び出す元素は近づきも遠ざかりもしないので、輝線のエネルギーは変化しない。
- (右上) 超新星爆発を正面から見ると、中心部分は遠ざかる元素と近づく元素の両方を同時に見ることになるので、輝線の幅は広がって見える。いっぽう周辺部は、近づきも遠ざかりもしないので、輝線の幅は変化しないはずである。
- (下) 実際の観測結果は、見事に中心部の輝線が広がっていることを示している。緑、赤、青の線は、スペクトルに含まれる連続な成分を除き、純粋な輝線のみ成分を示したものである。



©RIKEN/Tamagawa

図5 核融合暴走型超新星爆発の想像図

最も内側の部分で鉄が生成され、軽いアルゴン、ケイ素や硫黄はさらに外側の層で生成される。クロムやマンガンは鉄とケイ素・硫黄の層の間あたりで生成されると考えられる。