

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2022 年 11 月号



宇宙倫理学教育プログラムの受講生を紹介します！

10月号に引き続き受講生紹介の第4弾です！今回は大学院コースとして参加されている佐藤啓明さん（京都大学大学院総合生存学館2年）に自己紹介文を寄稿していただきました！

佐藤啓明さん（大学院コース：総合生存学館2年）

京都大学大学院総合生存学館2年の佐藤啓明（ひろあき）と申します。宇宙倫理学教育プログラムの大学院コースに参加させていただいております。このプログラムに参加したのは、今後の“より良い”宇宙開発に貢献して行きたいと考えているからです。思い返せば、物心がついた頃から宇宙が好きでした。スタートレックなどのSFを齧り付くように見ていたことを今でもよく覚えています。そんな中、漠然と宇宙に関わる仕事に就きたいと思い、大学では工学部に進学しました。宇宙ユニットには学部生時代也非常にお世話になりましたが、様々な背景を持つ先生方や学生と交流する中で、一口に宇宙といってもさまざまな



関わり方があることに気付かされました。限られた切り口からではなく、宇宙開発を多角的に研究したいという思いから、異分野融合や社会実装を謳う総合生存学館に入学したのですが、ここでも自身の宇宙に対する接し方が変わるような経験をしました。これまで工学部の宇宙基礎工学コース、宇宙ユニットと宇宙が当たり前にある環境に身を置くことが多かったのですが、総合生存学館ではそうではありませんでした。教育や難民支援、災害対策など実に多様な関心を持つ学生が集まっており、その多くは地球社会の抱える問題を研究の対象としていました。そのような学生に宇宙の話をする、なんで宇宙開発って必要なの？ 我々の生活にどのように役立っているの？ という質問が返ってくることもしばしばでした。通信や測位システムなど、私たちの生活に欠かせない宇宙技術が多くあることは紛れもない事実ですが、そのほかの宇宙開発はどうでしょうか。果たして全ての宇宙開発は地球上の問題を差し置いてまで行われる価値があるのでしょうか。さらに、近年ではこれまで国家主導であった宇宙開発に民間企業の積極的な参入が進んでいます。宇宙開発の構造が変化している中で、地球社会のニーズに対して今後の宇宙開発は応えていくことができるのでしょうか。宇宙開発に関わろうとするにあたって無視のできない問いかけだと思っています。このプログラムを通してこのような問題に対するアプローチの仕方を学びたいと考えていま

す。すでに半年が経過しましたが、非常に充実した時間を過ごすことができています。今後も、先生方や他の参加者の方々に良い刺激をもらいながら、全力で取り組んでいきます。

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
11月25日 (金) 15:00 - 16:30	第7回宇宙学セミナー 講師：前田 啓一 氏 (京都大学 理学研究科宇宙物理学教室 准教授) 題目：超新星残骸カシオペア座 A に刻まれた爆発機構の痕跡	Zoom によるオンライン開催です。詳細は Web ページをご覧ください。
12月5日 (月) 11:00 - 12:30	第8回宇宙学セミナー 講師：佐藤 達彦 氏 (日本原子力研究開発機構研究主席/ 大阪大学 核物理研究センター 特任教授) 題目：宇宙飛行士や航空機乗務員を宇宙線被ばくから適切に護る ～有人火星探査の宇宙線被ばくリスクはどのくらい？～	京都大学東一条館大会議室 (112・113号室) にて対面開催予定。

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.ussf.kyoto-u.ac.jp/seminar/>) で公開いたします。

超新星残骸カシオペア座 A に刻まれた爆発機構の痕跡

前田 啓一

京都大学 理学研究科宇宙物理学教室 准教授

太陽の約 10 倍以上の質量を持つ大質量星は、その一生の最期に「重力崩壊型超新星爆発」と呼ばれる大爆発を起こします。しかし、なぜ崩壊が爆発を引き起こすのでしょうか？この爆発メカニズムの解明は、宇宙物理学における難問の一つに挙げられています。現在では、星の中心部が重力崩壊を起こすときに大量に放出されるニュートリノの一部のエネルギーが物質を加熱し、超新星爆発を引き起こすというシナリオが最も有力です。しかし、このシナリオの本質であるニュートリノ加熱を裏付ける観測的証拠はありませんでした。私たちは、約 350 年前に爆発した重力崩壊型超新星の残骸であるカシオペア座 A の X 線データと元素合成理論を突き合わせることで、超新星爆発の際のニュートリノ加熱時に立ち上る高エントロピーの上昇流（外向きの流れ）の痕跡を発見しました[1]。超新星爆発の標準モデルがよ

り確かなものになったとともに、私たちの生活に欠かせない金属であるチタンが、超新星爆発時の上昇流内で大量に合成されていることも示しました。本記事は、京都大学ホームページの研究成果ページに掲載していただいた内容[2]を一部改編したものです。

背景

現在最も有力な重力崩壊型超新星の爆発シナリオを図 1 に示します。大質量星の内部では、進化の最終段階で鉄のコアが形成されます。この鉄のコアは、自身の重力を支えきれずに潰れてしまう「重力崩壊」を引き起こします。この潰れたコアの中心で原始中性子星が形成され、そのかたい表面に降り積もる物質が跳ね返されることで、星の外側へ向けて衝撃波が走ります。この反射衝撃波が星の表面まで達すれば、その星は爆発することになります。

しかし、理論計算により、反射衝撃波は星の内部を伝搬する間にエネルギーを失ってしまい、そのままでは星を爆発させることができないことが示されました[3]。そこで提案されたのが「ニュートリノ加熱」によって衝撃波を蘇らせるメカニズムです[4]。高温の原始中性子星から大量に放出されるニュートリノの全エネルギーの 1 % 程度を周囲の物質に与えることができれば、衝撃波が復活し爆発が成功することになります。

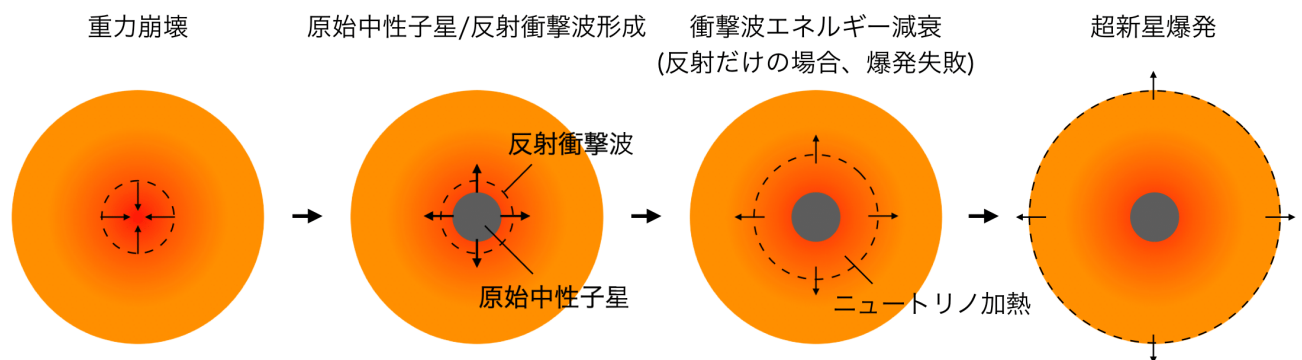


図 1 重力崩壊型超新星の爆発メカニズム：太陽の約 10 倍以上の質量を持つ大質量星は、一生の最期に中心の鉄コアが自重を支えきれなくなり潰れてしまう「重力崩壊」を起こす。重力崩壊中、その中心には超高密度の原始中性子星が形成され、そのかたい表面に落ちる物質が外側へ弾かれ「反射衝撃波」を形成する。この反射衝撃波がニュートリノ加熱によって押し上げられ、星表面まで到達できれば「超新星爆発」が起こる。

複数の理論研究グループがこの標準シナリオに基づいて超新星爆発をコンピュータ内で再現することを目指しており、ニュートリノ加熱時に生み出される対流やそれに伴う上昇流などの「非対称効果」が重要であることが分かってつづきます [5-8]。このメカニズムは、「ニュートリノ駆動型対流エンジン（超新星エンジン）」と呼ばれています。一方で、コンピュータシミュレーションではまだ観測されているような超新星の性質を説明しきれず、標準モデルの観測的検証が非常に重要となります。

研究手法と成果

ニュートリノ加熱で生み出される対流や上昇流といった非対称効果（図 2 左）は、原理的には超新星残骸の直接観測により検証できます。爆発機構の鍵となる非対称構造やその周辺領域は、少ない質量に大量のエネルギーがたぎ込まれた状況、つまり一つ一つの粒子の持つエネルギーが非常に大きい

（エントロピーの高い）状況を経たと予測されます。このような高エントロピー環境下では、特定の元素が核融合反応で効率的に合成されます。そのため、超新星残骸内に見られる非対称構造における元素組成を調査することで、「ニュートリノ加熱」に起因する構造を特定できる可能性があります。このことに注目し、佐藤寿紀さん（現 立教大学理学部物理学科、研究当時 理化学研究所所属）が中心となり、豊富な X 線データが存在する超新星残骸「カシオペア座 A」の非対称構造部分の解析を行いました。この際には、私をはじめ元素合成の理論研究を背景に持つ研究者などとの議論を通し、ニュートリノ駆動型対流エンジンを特徴づける元素であるチタン、クロム、鉄に注目しました。

カシオペア座 A は、約 350 年前に爆発した重力崩壊型超新星の残骸で、我々の住む天の川銀河に存在しています。米国のチャンドラ衛星で撮られたカシオペア座 A の X 線画像は元素の非対称分布を示しています（図 2 右）。特に、東南部（図 2 右、左下部）には非対称に飛び出た構造が見つかり、その主成分は鉄であることが 2000 年初期に指摘されていました。鉄は超新星の最深部でのみ大量に合成されることから、この構造は爆発中心部の非対称効果によって外側へ飛び出た可能性が高いと考えられます。そこで、2000 年から 2018 年の約 18 年間のチャンドラ衛星によるカシオペア座 A の観測データを総動員し、この構造内の元素を調べました。

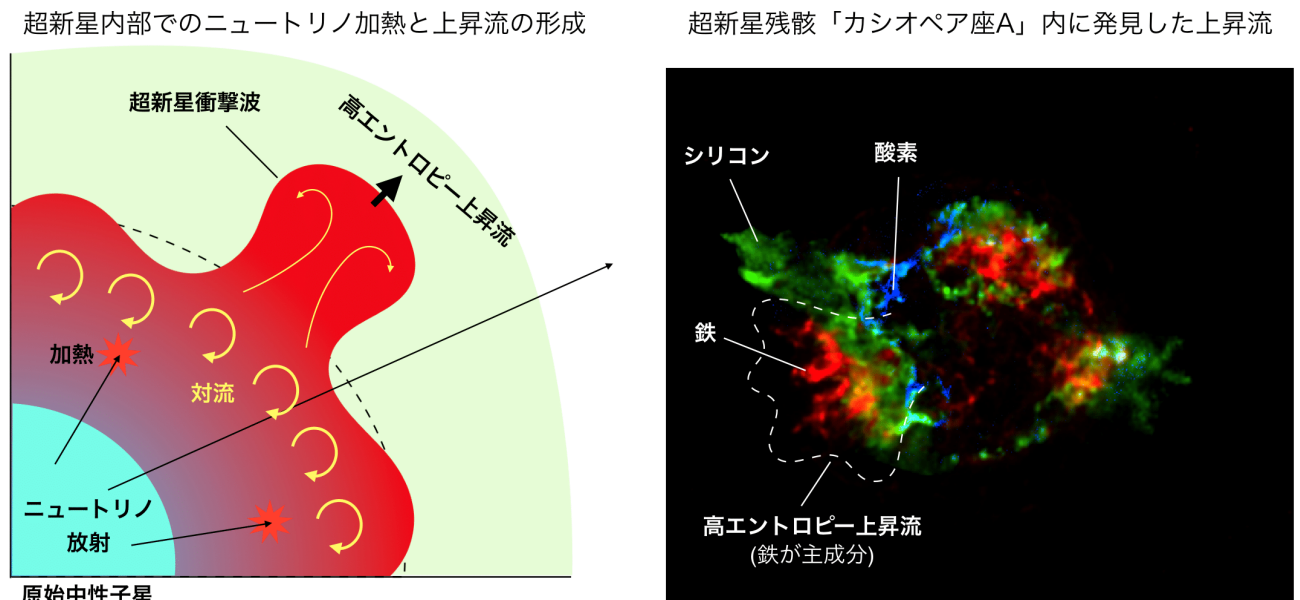


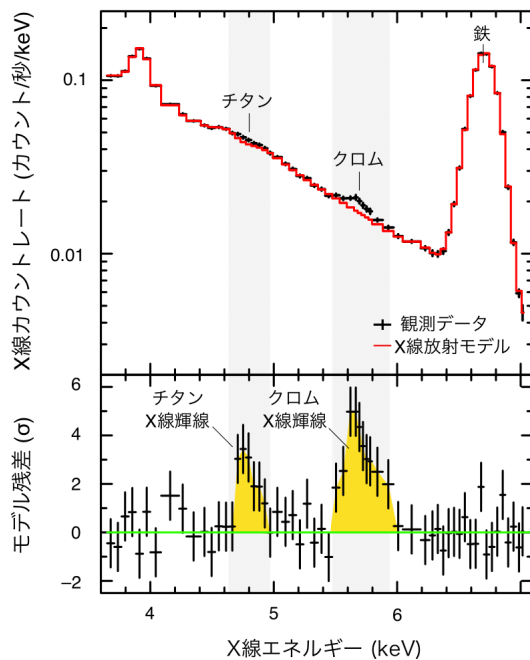
図 2 超新星内部での上昇流形成プロセスと超新星残骸カシオペア座 A （左）ニュートリノ加熱時に生み出される対流と上昇流の模式図。局所的に大きく発達する上昇流は、超新星爆発の形状を歪め、特徴的な元素組成を示す。（右）今回の研究対象である超新星残骸「カシオペア座 A」の X 線画像。爆発中心付近でしか合成されない鉄（赤）が東南部（左下）に飛び出しており、これは爆発時の非対称性によって生み出されたと考えられる。

その結果、チタン、クロム、鉄などの超新星エンジン周辺で合成される金属元素が、この構造内に同時に存在することを発見しました（図 3 左）。これを受け、吉田敬さん（現 京都大学基礎物理学研究所、研究当時 東京大学大学院理学系研究科所属）が、温度や密度の異なるさまざまな超新星内部環境下で合成される元素量の理論計算を担当しました。研究グループでは、その理論予想と観測値との比較を通し、鉄に富んだ非対称構造の起源の議論をすすめました（図 3 右）。その結果、この構

造内の元素組成は、超新星エンジン周辺で生み出される上昇流による高エントロピーかつ陽子過剰な環境で合成されるものとよく一致することが分かりました。

以上から、カシオペア座 A において我々が注目した、鉄を豊富に持つ非対称構造はニュートリノ加熱によって生み出されたものであると結論付け、超新星の衝撃波がニュートリノ加熱によって復活した証拠としました。今回の発見により、超新星爆発におけるニュートリノ加熱の存在が観測的に立証されただけでなく、その爆発中心付近のエントロピーなどの物理パラメータを推定できるようになりました。

鉄が豊富な構造からチタン、クロムの発見



鉄/チタン/クロムの元素量を理論計算と比較

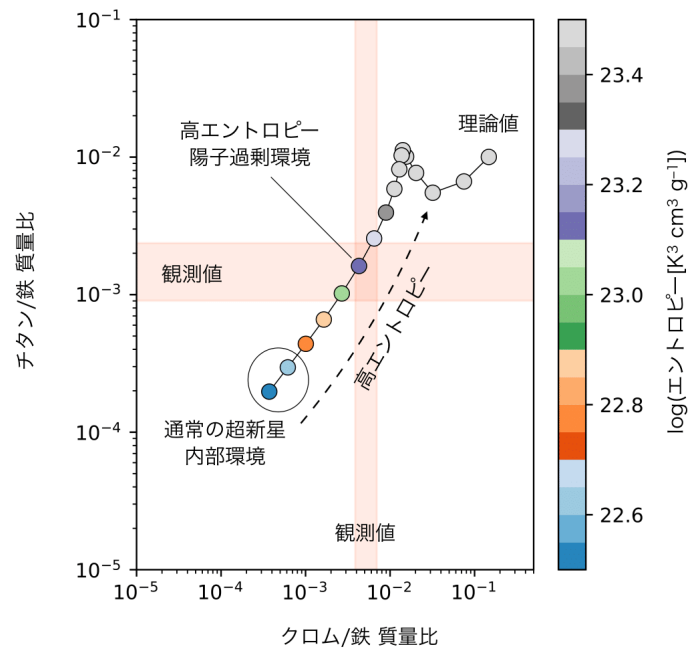


図 3 チタン、クロムの発見と元素量の理論計算との比較 (左) 鉄が豊富な構造内 (図 2 右、左下領域) の X 線スペクトル。約 4.7 keV と 5.6 keV 付近にチタンとクロムからの特性 X 線が見られる。(右) スペクトル解析から求めたチタン、クロム、鉄の質量比を理論計算と比較したグラフ。ニュートリノ加熱により作られる上昇流の特徴である、高エントロピーかつ陽子過剰な環境での元素合成により、観測量がよく説明できる。

今後の展望

本研究により、宇宙物理学の難問として長年注目されてきた大質量星の超新星爆発メカニズムに観測の立場から多くの情報を提供できるようになり、元素合成の理論研究を通したさらなる検証が可能となりました。同様な方法は他の超新星残骸にも適用可能であり、また恒星進化に関係する元素を調べるなど、爆発メカニズム以外の問題へのアプローチにもなります。現在の超新星理論分野では、スーパーコンピュータを用いた大規模計算が必須になっており、爆発メカニズムや元素合成の理論研究も急速に進展しています。この観測と理論の合わせ技で、宇宙の謎の一つがまた解明される日は遠くないかもしれません。

観測的側面としては、2022 年度中に打ち上げ予定の、日本を中心とする国際協力ミッションである次世代 X 線天文衛星「XRISM (クリズム)」に期待がかかります。XRISM 衛星は現行の数十倍のエネルギー分解能を持つため、チタンやクロムを含むさまざまな希少元素の検出感度が桁違いに向上すると考えられます。超新星残骸の高エントロピー上昇流内では、他にもさまざまな希少元素が存在すると

考えられています。この宇宙に存在する"元素工場"の観測から、私たちの身近に存在する元素の起源が明らかになると期待されます。

参考文献・リンク

- [1] Sato, T., Maeda, K., Nagataki, S., Yoshida, T., Grefenstette, B., Williams, B.J., Umeda, H., Ono, M., Hugheset, J.P. 2021, Nature, 592, 537
- [2] <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-04-22>
- [3] Colgate, S.A., White, R.H. 1966, ApJ, 143, 626
- [4] Bethe, H.A., Wilson, J.R. 1985, ApJ, 295, 14
- [5] Mezzacappa, A. 2005, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 55, 467
- [6] Kotake, K., Sato, K., Takahashi, K. 2006, Reports on Progress in Physics, 69, 971
- [7] Janka, H.-Th. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2012, 62, 407
- [8] Burrows, A., Vartanyan, D. 2021, Nature, 589, 29

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人：今井 慶悟（宇宙ユニット RA）

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp