

巨大な星の活動で作られた生命必須元素 — 超新星残骸観測で掴んだ塩素・カリウムの大量生成の証拠 —

概要

元素は宇宙の恒星や超新星爆発などで起こる核反応で作られてきましたが、起源がよくわかっていない元素も多くあります。たとえば私たち生命に必要な塩素やカリウムは、理論予測より一桁多く宇宙に存在することが知られており、どのように宇宙に供給されてきたかわかっていませんでした。

松永海 理学研究科博士課程学生（兼：同日本学術振興会特別研究員）、内田裕之 同助教、佐藤寿紀 明治大学専任講師の国際共同研究グループは、超新星爆発の残骸である「カシオペア座 A」から来る X 線を、XRISM 衛星の精密 X 線分光観測によって詳細に調べました。その結果、この天体の起源となった太陽の 10 倍以上の質量を持つ巨大な星の内部で、塩素やカリウムが大量に合成されていたことが初めて明らかになりました。さらにこの大量生成は、爆発前の恒星内部が対流的作用によって激しく掻き乱されていたことで説明できることも明らかにしました。本研究結果は、科学雑誌『Nature Astronomy』オンライン版（12 月 4 日付）に掲載されました。

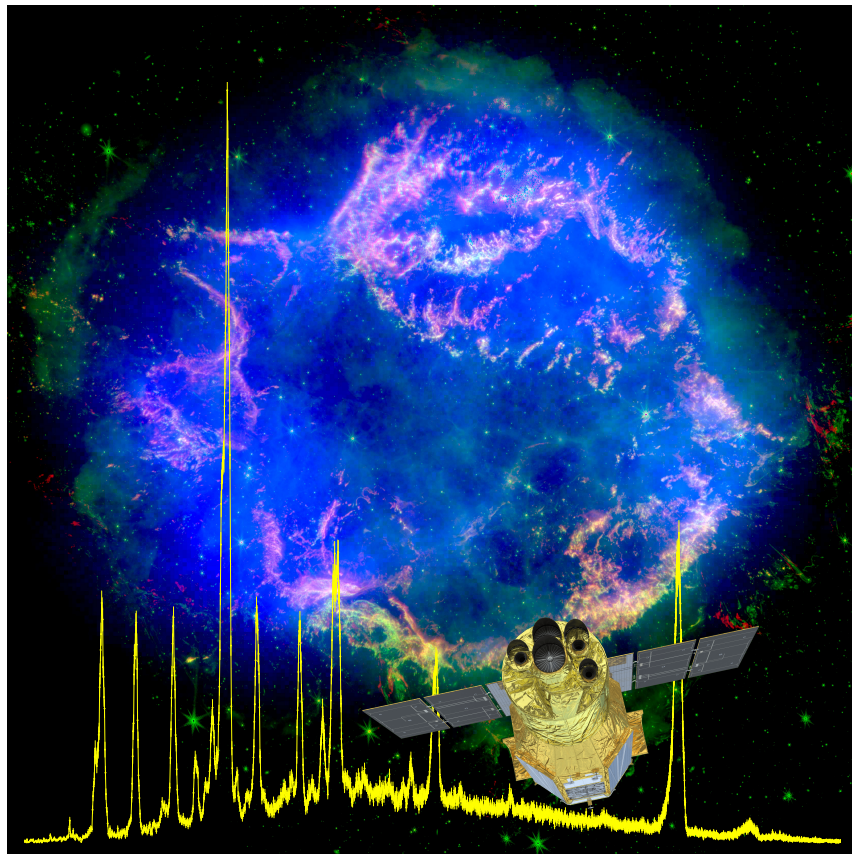


図 1 : XRISM 衛星による超新星残骸「カシオペア座 A」の観測。画像は XRISM/Xtend によって得られた X 線画像(青色)とジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡によって得られた画像(赤・緑色)を混合したもの。黄色の X 線スペクトルが XRISM/Resolve の観測結果。©明治大学/京都大学/JAXA

1. 背景

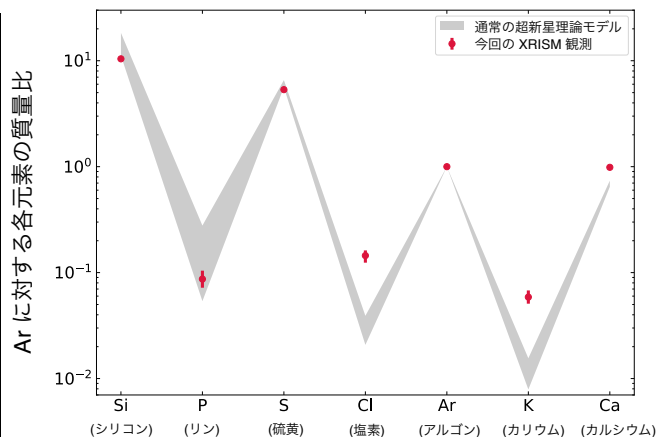
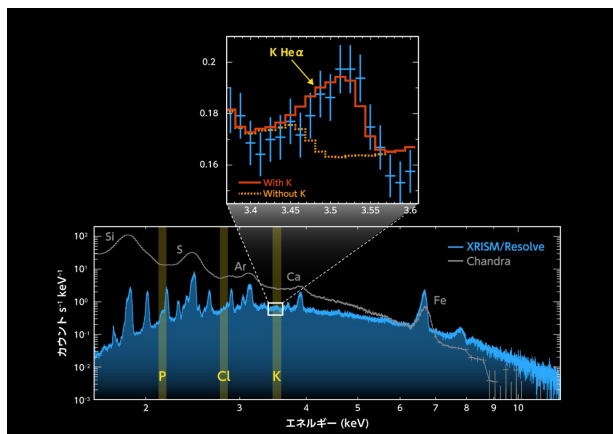
宇宙が誕生してから我々が住む現在の宇宙になるまでに、どのようにしてこの宇宙の中で物質は進化してきたのでしょうか？宇宙が誕生した直後には、水素とヘリウムというごく軽い元素しか存在していませんでした。私たちの身体を形づくる酸素や炭素、そして生命活動に欠かせない塩素やカリウムといった元素は、星々の内部で核融合によって生み出され、星の爆発（超新星爆発※1）によって宇宙空間に撒き散らされることで、次の世代の星や惑星、生命の材料となります。しかし、これらのうち「塩素」や「カリウム」のような“奇数番元素”が、どのようにして作られたのかは長年の謎でした。理論計算によると、これらの元素は星の内部でほとんど作られないはずであり、観測される量と比べておよそ 10 分の 1 程度しか生成されないと予測されていたのです。そのため、「生命維持に不可欠なこれらの元素が、なぜ宇宙で不足していないのか」という問いは天文学における未解決問題のひとつでした。

2. 研究手法・成果

今回の研究の鍵となったのは、京都大学も長年開発に携わり 2023 年 9 月に打ち上げられた JAXA の X 線分光撮像衛星「XRISM（クリズム）」に搭載された、高分解能分光装置「Resolve（リゾルブ）」です。Resolve は「マイクロカロリメータ※2」という技術によって、従来の検出器よりも一桁優れたエネルギー分解能で X 線を観測できます。塩素やカリウムのような奇数番元素は、偶数番元素に比べて存在量が少なく従来の検出器では検出が困難でしたが、Resolve によって史上初めて可能となったのです。

研究チームは元素の工場である超新星爆発の痕跡、「超新星残骸カシオペヤ座 A」を観測しました。太陽の 10 倍以上の質量をもつ星が爆発した痕跡であるこの天体からの X 線を精密に観測したところ、これまでの X 線観測では見えなかった塩素（Cl）とカリウム（K）の輝線を明確に検出することに成功しました（図 2）。特にカリウムは有意度 6σ を超える高い確度で確認され、X 線天文学史上初の確実な検出となりました。そして、カシオペヤ座 A におけるそれらの存在量は、通常の超新星モデルが予想するよりも遥かに多いことを発見しました（図 3）。さらに元素の空間分布を解析した結果、塩素やカリウムが超新星爆発時ではなく、星がまだ生きていた段階、つまり超新星爆発の前に形成されていた可能性が高いことがわかりました。

では、なぜ通常の理論では説明できないほど大量の塩素やカリウムが作られたのでしょうか。研究チームは、星の内部の複雑な活動に注目しました。星は一見静かに輝いているように見えますが、内部では「核燃焼層」と呼ばれる核融合領域がいくつも重なり合い、それぞれが激しい対流を生み出しています。今回の観測結果を理論モデルと比較したところ、自転の速い星や連星として別の星と相互作用していた星、あるいは異なる核燃焼層が混ざり合う「シェルマージャー※3」という現象を起こしていた星のモデルが、観測値とよく一致しました。これらの現象は、星の内部を激しくかき乱し、元素を通常より効率的に作り出すことが理論的に示唆されてきましたが、本研究によって初めてその観測的な証拠を掴みました。もしかすると我々の身体を構成する元素も、巨大な恒星の想像を絶するような激しい内部活動によって生み出されたものかもしれません。



(左) XRISM に搭載された軟 X 線分光装置 (Resolve) で取得されたカシオペア座 A のスペクトル (青色)。高いエネルギー分解能によって、これまでの X 線検出器の X 線スペクトル (灰色: チャンドラ衛星の X 線 CCD のスペクトル例) では観測できなかった元素「塩素・カリウム」を発見した。上部パネルは、カリウムの輝線周辺を拡大したもので、赤色の実線はカリウムを含む放射モデル、オレンジ色の点線はカリウムを含まない放射モデルを示す。©JAXA

(右)XRISM によるカシオペア座 A の元素量の測定結果 (赤データ点) と理論モデル (灰色領域) との比較。通常の超新星モデルではカシオペア座 A の元素量、中でも塩素とカリウムの量を説明できないことを発見。©JAXA

3. 波及効果、今後の予定

元素の起源を知る上で重要なのが、星の内部活動や超新星爆発のメカニズムの解明です。近年のコンピュータ技術の急速な発展に伴い、多次元シミュレーションによってこれらを解き明かそうとする試みが世界中で盛んに行われています。しかし星の内部を観測してシミュレーション結果の妥当性をテストすることは非常に困難です。本研究では、超新星残骸においてこれまで不可能だった希少元素の測定を通じ、本来我々が直接知り得ない恒星の内部活動を暴きました。XRISM/Resolve のテクノロジーが可能にした X 線の精密分光観測は、単に元素の起源にとどまらず恒星や超新星爆発の物理を探る上でも非常に強力なツールであることが本研究によって示されました。

研究チームは今後、XRISM や後継の X 線観測衛星を通じて、他の超新星残骸でも同様に元素組成やその分布を調べる予定です。特に、今回観測したカシオペア座 A 以外の超新星残骸でも塩素やカリウムが豊富に存在するのかを明らかにすることが重要です。もし同様の傾向が他の残骸でも確認されれば、これらの元素の生成が星の進化に共通する普遍的な過程であることを示します。一方、カシオペア座 A に特有であれば、星の活動の多様性を示す貴重な手がかりとなります。いずれの場合も、宇宙における元素供給のしくみを解明する上で重要な情報をもたらすと期待されます。XRISM/Resolve のテクノロジーが可能にした本研究の成果は、星々がどのように元素を宇宙へと供給し、最終的に私たち人類の誕生につながったのかを解き明かす壮大なストーリーへの着実な一歩です。

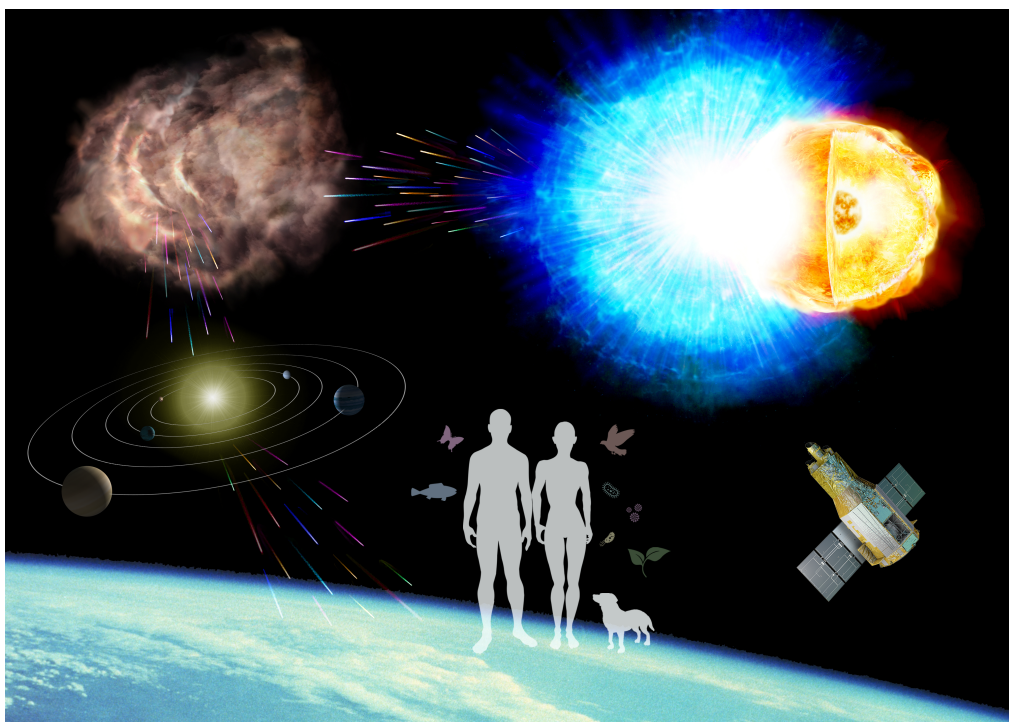


図4：XRISM 衛星による元素の発見の意義。生命維持や惑星形成にも重要な元素が、恒星内部活動に由来していることを解明した。©明治大学/京都大学

4. 研究プロジェクトについて

本研究は松永海 理学研究科博士課程学生（兼：同日本学術振興会特別研究員）、内田裕之 同助教、佐藤寿紀 明治大学専任講師を中心に、XRISM 国際チームによって実施されました。

本研究は JSPS 科研費「X 線精密分光を利用した重力崩壊型超新星の上限質量の決定」（課題番号 24KJ1485）および JSPS 科研費「精密 X 線観測で迫る超新星内部でのニュートリノ相互作用」（課題番号 23K13128）の助成を受けたものです。

<用語解説>

※1 超新星爆発：重い星が最期に起こす大爆発で、カシオペア座 A は太陽の 10 倍以上の質量を持つ星（大質量星）が爆発した痕跡と考えられている。

※2 マイクロカロリメータ：光子を吸収した時の検出器部分の温度上昇によって、光子が持っていたエネルギーを高精度で測定する技術。

※3 シェルマージャー：大質量星の内部の元素組成や温度の異なる層が、激しい対流によって混合され、一つの大きな層に融合する現象。

<研究者のコメント>

●地球や生命がどのように誕生したのかは、誰もが一度は思いを巡らせる永遠の問いです。今回の研究はその壮大なストーリーのほんの一端を明らかにしたにすぎませんが、そこに携われたことを光栄に思います。（松永海）

●希少元素の検出は X 線天文学における長年の夢でした。その夢が、私たちの開発した衛星で実現しただけでなく、得られた結果が予想を超えるものであったことに、自然科学の深奥に触れる思いです。「爆発する星の

中で何が起きているのか？」という一見すると不可知の問いに、わずかながらも迫ることができたことをうれしく思います（内田裕之）

●初めてリゾルブのデータを見たときの驚きと興奮は、今でも鮮明に覚えています。打ち上げ前には見えとは思っていなかった元素が、はっきりと確認できました。自分たちが開発した衛星によって、期待を超える大きな発見ができたことは、研究者としてこれ以上ない喜びです。（佐藤寿紀）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Chlorine and Potassium Enrichment in the Cassiopeia A Supernova Remnant (超新星残骸カシオペヤ座 A における塩素とカリウムの増強)

著 者：XRISM Collaboration (責任著者：松永海、内田裕之、佐藤寿紀)

掲 載 誌： Nature Astronomy DOI：10.1038/s41550-025-02714-4