

星の死に際の“破壊的核燃焼”を明らかに

～超新星残骸から爆発直前の激しい核燃焼過程の観測的証拠を掴む～

明治大学工学部物理学科の佐藤寿紀専任講師、同大学院理工学研究科物理学専攻の久保池結（博士前期課程1年）、東京大学大学院理学系研究科の梅田秀之准教授、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻の松永海（博士課程2年）（日本学術振興会特別研究員）、内田裕之助教、同大学基礎物理学研究所の吉田敬 国際プログラムコーディネータらの国際共同研究グループは、超新星残骸「カシオペア座A」のX線観測（図1）から、大質量星が一生の最期に引き起こす超新星爆発の直前のわずか数時間の間に、激しい核燃焼によって星の内部構造が破壊されていた証拠を掴みました。大質量星の寿命は数百万年から数千万年程度とされていますが、その最期の数ヶ月から数時間の間に星の内部は激しい核燃焼によって劇的な進化を遂げます。一方で、通常の星を観測してもその内部進化の情報は得られません。本研究グループは、星の死後300年以上経った超新星爆発の名残「超新星残骸」の元素情報から、その恒星時代最期の記憶を辿る新手法を確立しました。

本成果は、2025年9月2日に国際学術誌『*The Astrophysical Journal*』に掲載されました。

論文タイトル：Inhomogeneous Stellar Mixing in the Final Hours before the Cassiopeia A Supernova

DOI：<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aded14>

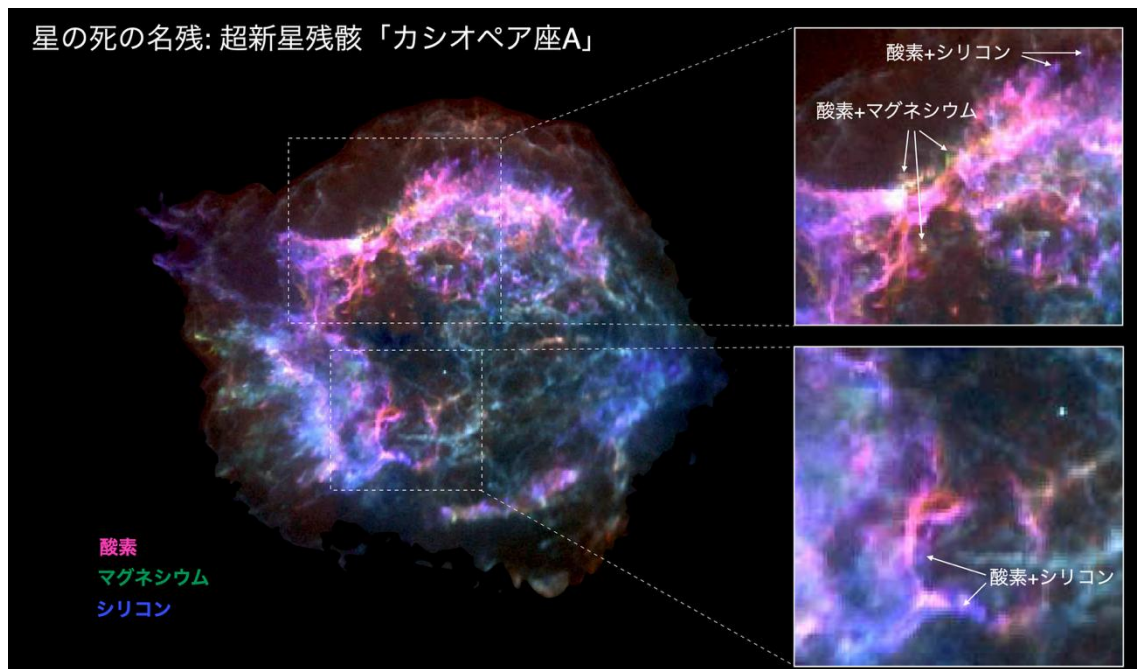


図1: チャンドラ衛星の観測によるカシオペア座AのX線画像（赤: 酸素、緑: マグネシウム、青: シリコン）。三色の混合具合の違いが爆発前の恒星の激しい核燃焼過程で形成されたと考えられる。

1. 研究の背景

星は古代から人類の興味を引く存在であり、天文学においては最も重要な研究対象です。例えば、オリオン座にある赤色超巨星ベテルギウスは、人類によって長年観測・研究されてきた星ですが、もうすぐ超新星爆発を起こすかもしれない星として、多くの人々の注目を浴びています。一方で、いつベテルギウスが爆発するかは、どれだけこの星を観測しても、正確に言い当てるのが非常に困難です。これは、星の表面から出てくる光を観測するだけでは、その内部の情報（星がどれだけ進化しているか）を引き出すのが難しいからです。つまり我々人類は、死ぬ直前の星の内側でどのようなことが起きているかを観測的・実験的に調査することが困難でした。現在では、世界各国の理論研究グループがスーパーコンピュータを用いて星の最期の姿を調べられるようになり、その内部進化はとても激しいと予測されています（図2）、恒星内部は「未観測領域」であるため、その検証のためにも新たな観測手法の提案が待たれています。

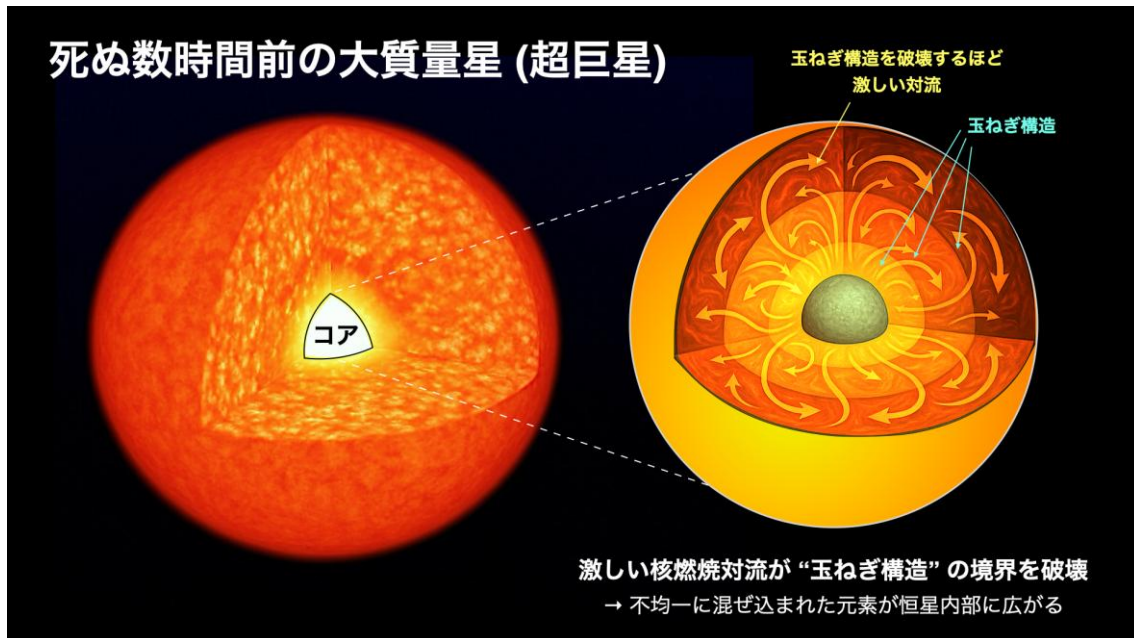


図 2: 死に際の大質量星の内部における「破壊的核燃焼」。大質量星は最終段階で超巨星に進化し、その中心に“コア”を形成する。そのコア内部では、激しい核融合反応によって、大規模な対流構造が生まれることが理論的に予測されていた。

2. 研究の成果

本研究では星そのものではなく、星の死後に残る「超新星残骸」に着目することで、世界で初めて大質量星の「死に際の瞬間」の情報を引き出すことに成功しました。図2に示すように、大質量星は進化の最終段階で、その中心領域に密度の高い“コア”を形成します。通常の星の観測では、分厚い外層に取り囲まれたこのコアの情報を引き出すことができませんが、星が爆発してそのコアの物質が周囲にばら撒かれると、そこから内部の情報を引き出せるはずですが、星は内部の核融合反応によって最終的には中心から鉄、シリコン、酸素、炭素というように、重い元素から軽い元素が積み重なった玉ねぎのような層構造（以後、「玉ねぎ構造」）を形成すると考えられています。近年の理論計算では、星が死ぬ直前

に起こる激しい核融合反応がこの玉ねぎ構造を破壊するような現象が予言されていました（図2）。我々は超新星残骸カシオペア座AのX線観測データから、その恒星内部コアで形成された異なる元素が不均一に混じり合っていることを発見し（図1）、これが玉ねぎ構造の破壊現象（通称「シェルマージャー」）によるものであると結論づけました。この不均一な元素の混合を説明するためには、星の死ぬわずか数時間前にこのシェルマージャーが起きたことを示唆しており、まさに星の「死に際の瞬間」を捉えた結果と言えます。

3. 今後の展開

今回の発見によって、天文学における未観測領域「恒星内部」の情報を引き出すことが可能になりました。そして、今回観測した激しい恒星内部活動は、星が爆発することを助ける働きがあることが近年の理論研究で示唆されています。実は、大質量星が死ぬ時、すべての星が超新星として爆発するとは限りません。一部の星は爆発できず、潰れてブラックホールになってしまいます。今回発見したような激しい恒星内部活動が、最期に星が超新星として華々しく輝くか、もしくはブラックホールとして潰れて静かに一生を遂げるのか、星の運命を決定している可能性があります。この恒星最期の瞬間から超新星爆発を起こすまでの一連の流れを理解すべく、世界の様々なスーパーコンピュータによってその大規模理論計算が進められています。大質量星の大爆発である超新星爆発の爆発メカニズムは、宇宙物理学における超難問としても知られていますが、我々の発見がその解明の重要なピースになるかもしれません。

謝辞

本研究は 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。