

# 論文の内容の要旨

## An observational study of ejecta in supernova remnants using spatially resolved X-ray spectroscopy

(超新星残骸の X 線観測による爆発噴出物の研究)

氏名 春日 知明

超新星爆発は、恒星内部のコアで生成される重元素を宇宙空間へと放出する重要な天体現象である。特に Ia 型に分類されるものは鉄属元素の主な生成源として、遙か長い時を経て私たちの生活にも直結する。この Ia 型超新星爆発は、爆発後の可視光帯域における光度曲線が一様であるという性質も持っており、この特徴を利用として遠方銀河までの距離を測定する際の指標となる「標準光源」の役割を果たし、宇宙論の理解にも貢献している。

太陽の 4 倍以下の質量を持つ比較的軽い恒星は、その進化の最終段階として炭素と酸素のみからなるコアを持つ白色矮星となる。この白色矮星が電子の縮退圧で支えられないようになると、内部で核融合反応が暴走し、Ia 型超新星爆発が引き起こされる。しかしその詳細ははっきりと分かっていない。Ia 型は白色矮星を含む連星系で生じるが、この伴星には 2 つのシナリオが提唱されている。1 つは縮退していない軽い星と連星を作っている場合である (Single Degenerate)。この星の外層は白色矮星へ徐々に質量降着し、白色矮星の質量がチャンドラセカール限界質量まで近づくことで、核融合の暴走へと結びつく。もうひとつは伴星も白色矮星だった場合である (Double Degenerate)。この場合、爆発時の白色矮星の質量に明確な制限は必ずしもない。白色矮星のコアに着火するメカニズムも 2 つのシナリオでは異なる。こうした違いは、生成される鉄属元素の量にも違いを生むため、この 2 つのシナリオの存在比を確定させることは星間空間の元素組成を理解するために重要である。

Single Degenerate シナリオの特徴に、星周物質の存在が挙げられる。これは伴星からの質量降着構造や、それに伴って白色矮星から噴き出される星風が吹き飛ばした伴星の外層が、超新星の周りに付随して観測されるものである。お互いが白色矮星である Double Degenerate シナリオの連星系からは生じづらいとされていることから、星周物質の有無はこの2つのシナリオを判別する上で重要な指標となりうる。

超新星そのものは空間分解の困難な天体現象であるため、本研究では超新星の跡に残る天体（超新星残骸）に注目した。超新星残骸中では、爆発噴出物の重元素や衝撃波、あるいは予め環境に存在していた星間物質（および存在する場合は星周物質）が、空間的な広がりをもって観測される。本研究では特に、超新星残骸からの X 線放射を観測する。超新星残骸の進化の過程で生じた衝撃波によって 100 万度以上に加熱された物質からは、元素や電離状態に固有の特性 X 線が放射される。星周物質の存在を探る最も単純な方法は、超新星残骸中を外向きに進行する衝撃波（順行衝撃波）によって加熱された、星周物質そのものからの X 線放射を観測することである。ただし仮に観測されなかったとして、星周物質が存在していないのか、単に未だ十分な加熱が行われていないのかを判別するのは難しい。

そこで本研究では、核融合で生成された爆発噴出物の運動を観測することで、その運動状態から周辺環境の影響を推定できないかと考えた。爆発噴出物は、超新星残骸の進化の途中過程で生じる内向きの衝撃波（逆行衝撃波）によって減速かつ加熱され、特性 X 線を放射する。低密度の星間空間中ではその後は速度を保って外縁まで運動するが、濃い物質に運動を阻害された場合は X 線放射領域内で別の内向きの衝撃波（反射衝撃波）によるさらなる減速構造が観測されると考えられる。運動が阻害された痕跡を探ることで周辺環境の情報を得るのが、本研究の手法である。

3 次元な運動状態のうち視線方向を測定するには、特性 X 線の輝線パラメータを用いる。輝線中心の値は視線方向のドップラー偏移を受けて観測される。爆発噴出物からの X 線が卓越する若い超新星残骸の中では、爆発噴出物は光速の 1 % 程度の 3 次元速度で運動している。既存の X 線観測衛星に用いられている 2 次元空間分解型の撮像分光検出器では、視線方向に重なった両方向の偏移成分が合わさり 1 つの輝線として観測される。この輝線を観測した際に得られる輝線幅は、どのような構造と速度で双方の成分が偏移しているかを知る指標となる。一様等方に爆発噴出物が運動している場合の輝線幅は、両偏移の速度差が最大である天体中心ほど太く、速度差が 0 になる外縁に向かって単調減少していく。この描像からのずれは、非一様等方な周辺環境や爆発形状の影響を示唆するものとなる。

本研究ではまず、若い Ia 型超新星残骸のひとつとして、1604 年に爆発した Kepler の超新星残骸の解析を行なった。この天体では濃い星周物質からの X 線放射が観測されており、Single Degenerate シナリオの候補天体と考えられている。天体中での爆発噴出物の運動状態を測定するため、空間分解能とスペクトル分光性能に優れた、*XMM-Newton* 衛星搭載の CCD 検出器 EPIC-MOS を用いた。本研究では視直径 4 分角のこの天体を 15 秒角の格子状に分割し、それぞれの領域で独立にスペクトル解析を行なった。各領域からはシリコンや硫

黄などの輝線がはっきりと見えるほか、多くの領域で鉄の K 輝線も観測された。スペクトル解析に用いる放射モデルとしては、若い超新星残骸の爆発噴出物に一般的に用いられる非平衡電離状態を仮定した熱的プラズマからの放射に、ドップラー効果による輝線中心エネルギーの偏移と輝線幅の広がりを考慮した効果を掛け合わせたものを用いた。また星周物質由来の放射モデルも考慮して解析を行なった。その結果として特に、各領域ではっきりと観測され静止系の輝線中心エネルギーの不定性も少ないシリコンなどの中間質量元素の輝線幅に注目したところ、中心付近で爆発噴出物の輝線幅が細くなり、かつ赤方偏移した傾向が得られるという、一様等方的な運動構造では説明できない観測結果が得られた。

この結果を詳細に調べるため、同衛星搭載の分散分光型検出器 RGS を用い、1次元ながらもより精密な分光測定を行なった。RGS 検出器は、星周物質や鉄の L 輝線といった、MOS 検出器では分光しづらい輝線も正確に分光し、輝線パラメータを決定することができる。その結果、天体中心付近の棒状構造で星周物質も鉄噴出物も輝線幅が細くなっていることが分かった。これは濃いトーラス状の星周物質によって、噴出物の運動が阻害されていることを示唆している。また天体全体としては星周物質の輝線は全体的に青方偏移を示し、これは先行研究で示唆されていた爆発連星系そのものの運動状態と一致した。一方で鉄の爆発噴出物は全体的に赤方偏移を示したが、これも手前側に濃く分布した星周物質によって手前側のみ噴出物の運動が阻害されたことによるものと解釈することができる。

本研究は次に、1572年と同じく若い Ia 型である Tycho の超新星残骸の解析を行なった。この天体では星周物質や星間物質からの X 線放射は観測されておらず、特に視角方向の形状が円形に近いことから星周物質のない環境で爆発したと考えられ、Double Degenerate シナリオの候補天体と考えられていた。視直径 8 分角のこの天体を同様に 15 秒角の格子状に分割して解析を行なったところ、中間質量元素の輝線幅が天体中心ほど太く外に向かって細くなっている傾向を確認した。これは Kepler 超新星残骸とは異なり、一様等方的な運動構造に一見矛盾しない結果と考えられる。一方で、外縁まで単調に細くなっていく予想とは異なり、ある程度内側で既に細くなりきっている様子も見られた。

その詳細を定量的に探るため、両偏移の成分を顕にしたモデルを改めて導入しなおし、中間質量元素のエネルギー帯域に対して改めてスペクトル解析を行なった。その結果どの方向でも概して、天体の内側では爆発噴出物が 3,000–4,000 km/s 程度の一様等方膨張をしているのに対し、ある程度の距離より外側では 1,000 km/s 程度へと減速を受けていることを示した。ここで得られた結果は、今まで Tycho の超新星残骸に対して考えられてきた、一様な星間空間へ超新星残骸が進化していくモデルでは説明できない。むしろ進化の過程で高密度な物質にぶつかり、爆発噴出物が減速を受けたことを示唆している。この減速が天体のあらゆる方向で同じように検出できたことから、この高密度な物質は星間空間にもともと存在していたわけではなく、超新星残骸を覆うように付随している星周物質であると考えるのが自然である。これは従来考えられてきたのとは反対に、Single Degenerate シナリオを支持する結果である。

以上のように本研究から、爆発噴出物の運動が環境、特に星周物質に影響を受けることが観測的に明らかとなった。これは、星周物質からの放射の直接観測に加えて、爆発噴出物の運動状態も超新星残骸の環境の情報を得る上で重要な手がかりとなりうることを示している。その上で、解析した2天体で共に星周物質の影響を発見できたことは、星周物質がIa型超新星残骸の進化に重要な役割を果たしうることを示唆している。星周物質からのX線放射の有無が2天体で異なる理由については、星周物質が加熱され始めた時間の違いや、爆発機構の違いによって星周物質の生成のされ方が異なっているなどの可能性が挙げられる。同様な研究を行うことのできる観測対象は、次世代の精密分光型検出器カロリメータによって飛躍的に増えるため、将来的には今回の結果のIa型超新星残骸における一般性が明らかになるだろうと考えている。