

# 宇宙の瞬間湯沸かし器：非平衡プラズマの分光診断で探る超新星残骸の無衝突電子加熱機構

山口 弘悦 (NASA Goddard Space Flight Center)

宇宙空間で発生する衝撃波は、地球上のものとは大きく性質が異なる。地球上では物質中の粒子同士が衝突することで流体の圧縮が進むが、密度の低い宇宙空間では粒子の直接衝突がほとんど起こらない。代わりに、粒子間に働く電磁場を介して圧縮が進むと考えられている。この現象は「無衝突衝撃波」と呼ばれ、太陽風から衝突銀河団、ガンマ線バーストなど、宇宙の至るところで普遍的に観測される。しかし無衝突衝撃波の具体的な発生メカニズムは未だ解明されておらず、関連する物理過程にも我々の理解が不十分なものが多い。中でも「無衝突電子加熱」と呼ばれる、衝撃波面で電子が急加熱される現象は、衝撃波物理学における最重要未解決問題の一つとされる。

本稿では、X線天文衛星「すざく」が発見した、“ティコの超新星残骸”の逆行衝撃波における無衝突電子加熱について、その詳細を解説する。集光力と分光能力に優れた「すざく」は、この天体から初めて鉄イオンの $K\beta$ 蛍光輝線を検出した。 $K\beta$ 蛍光は、内殻電離後の $3p \rightarrow 1s$ 脱励起遷移に伴う放射過程なので、M殻電子を多数残す低電離イオンのみが強い放射源となる。したがってそのスペクトルは、衝撃波加熱直後のプラズマ状態を診断する鍵となる。観測された $K\beta$ 輝線は予想外に強く、その起源である低電離鉄イオンが極めて高温の

(内殻電離を十分に起こせる)自由電子と共存することを示した。筆者らが開発した最新の原子物理モデルと流体シミュレーションを駆使して理論計算を行い、観測データと比較したところ、この超新星残骸の逆行衝撃波面において電子温度が一気に1,000倍近く上昇している事実が明らかになった。

超新星残骸の逆行衝撃波は、星間物質を伝搬する順行衝撃波と異なり、非常に磁場の弱い環境( $B \ll 10^{-8}$  G)にある。一方、無衝突衝撃波に関する標準的な理論によると、電子の急加熱には最低でも星間磁場( $\sim 1 \mu\text{G}$ )程度の磁場強度が必要とされており、逆行衝撃波での無衝突電子加熱は極めて起こりにくいと考えられていた。今回の観測結果は、残骸内のプラズマ自身が何らかの方法で局所的な電磁場を自己増幅し、電子が効率的にエネルギーを得る環境を作り出している可能性を示唆する。

なお、本研究は初めから無衝突電子加熱の探査や測定に照準を定めたわけではなく、「超新星爆発によって生成された元素の量を精密に測定する」という主目的を果たすために非平衡プラズマの原子物理を突き詰めた結果、半ば偶然にして得られたものである。そこで本稿では、原著論文では必ずしも触れなかった、発見に至る経緯や思索の部分为重点的に記述したい。

## —Keywords—

### 衝撃波：

音速より速く動く物質が別の物質と衝突するときに形成される物理状態の不連続面。衝撃波を通過する物質は加熱と圧縮を受けるため、衝撃波の下流(後方)では上流(前方)よりも高温・高密度になる。

### ティコの超新星残骸：

デンマークの天文学者ティコ・ブラーエが西暦1572年に爆発を観測した超新星の残骸。Ia型(核暴走型)の超新星残骸としては全天-X線で明るく、様々な物理過程の詳細研究に適する。

### 内殻電離と蛍光放射：

多数の束縛電子を持つ低電離イオンや中性原子が高エネルギー自由電子(あるいは光子)の衝突を受けると、イオン化エネルギーの高い最内殻(K殻)の電子が引き剥がされる。これによりK殻に空きができるため、外殻(L殻やM殻)電子の脱励起が生じる。その際、内殻と外殻のポテンシャル差に相当するエネルギーを持つ光子が蛍光X線として放射される。