

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	松田真宗
論文題目	Exploring Energy Transfer and Evolution of Supernova Remnants through Year-Scale X-ray Variability (年単位でのX線時間変動から探る超新星残骸のエネルギー輸送と膨張過程)		
(論文内容の要旨)			
<p>超新星残骸は銀河宇宙線加速起源の有力候補の一つであり、フェルミ一次加速と呼ばれる衝撃波加速機構で荷電粒子が相対論的なエネルギーを得ると考えられているが、(1) この加速機構に注入するまでにどのようにして粒子が加熱過程などを経てエネルギーを得るのか(注入問題)や、(2) この加速機構で本当に銀河宇宙線最高到達エネルギー(約3 PeV)まで到達できるのか、は明らかになっていない。超新星残骸は従来、希薄な環境にあると考えられてきたが、近年の観測技術の向上により局所的に高密度の分子雲ガスなどと衝突しながら膨張しているということが分かってきた。そこで、本研究では、そのような高密度のガスと超新星残骸の衝撃波が衝突している箇所では加熱や加速が活発に行われる可能性があるかと着想し、X線の年単位の時間変動に着目した観測研究を行った。</p> <p>「ティコの超新星残骸」は1572年に爆発した若い超新星残骸である。距離は2.5 kpcと比較的近傍であり、角度分解能の優れたChandra衛星で観測した際に、熱的X線放射とシンクロトロンX線の両方のsub-pcスケールの構造を観測できる。また、Chandra衛星で2000, 2003, 2007, 2009, 2015年に観測されているため、年スケールの変動探索に適する。この天体は北東部や南西部に高密度ガスとの衝突が先行研究で示唆されており、X線時間変動の観測が期待できる。そこで、この天体のChandra衛星の画像から時間変動を探索したところ、(A) 南東部でのシンクロトロンX線の増減光と(B) 北東部で熱的X線の段階的な増光を発見した。</p> <p>前者の時間変動は、先行研究で陽子がPeVエネルギー程度まで加速されている可能性が提唱された「縞状構造」を形成するティコの超新星残骸特有の構造である。この領域について、明るい縞ごとにスペクトルを解析し、衝撃波面との比較したところ、縞状構造のシンクロトロン放射は有意にスペクトルが変動しており、衝撃波面よりも硬いことがわかった。また、時間変動のタイムスケールから、縞状構造で500 <math>\mu</math>G程度の磁場が見積もられ、この領域で衝撃波面よりも効率的な磁場増幅を明らかにした。さらに、衝撃波面のシンクロトロン放射には見られないような、光子指数と表面輝度の強い相関を発見した。このことから、従来一般に考えられてきた衝撃波加速とは独立で効率的な加速機構が縞状構造に存在する可能性が示唆された。</p> <p>後者の熱的X線の増光についてはスペクトル解析の結果、約0.2 keVから約0.7 keVまで電子温度が上昇していることがわかった。これと可視光観測との比較から、超新星残骸の順行衝撃波によって加熱を受けたガスがクーロン衝突を介して温度上昇していると結論づけた。このようなガスの電子温度の上昇はこれまで、上昇した前や後のスナップショットを用いて解析する他なかった。そのため、電子温度がどのようなタイムスケールで上昇していくのか、ひいては衝撃波近傍や後方でどのような温度分布になっているのかについての示唆が全くなかった。本研究はこの問題に対するまさに直接的なアプローチを初めて提示したと言える上に、衝撃波加速に注入しうる範囲(拡散長)における電子のエネルギー分布を制限する結果である。</p> <p>本研究によって、高密度ガスと衝突している局所的な領域であれば加熱や加速が活発に行われることがわかった。しかし、超新星残骸の環境は多様であることが近年わ</p>			

かってきており、宇宙線が超新星残骸で本当に加速され得るかを調べるためには、今回の結果が一般に起こりうるかを知る必要がある。そこで今後、超新星残骸でのガスの分布や他の密度環境における超新星残骸の時間変動を調べることで宇宙線加速源についてより大きな手がかりを得られると考えられる。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

宇宙線はV. Hessによる気球実験でその存在が発見された数TeV以上高エネルギー荷電粒子である。その発見以降、起源がどこでどのようにして高エネルギーを得たのかについては宇宙物理学における大きな課題の一つとなっている。超新星残骸はエネルギー収支の観点から銀河宇宙線の加速源の有力候補とされている。しかし、現在でも、加速機構に注入するまでにどのようにして粒子がエネルギーを得るのか(注入問題)、また、銀河宇宙線最高到達エネルギーである約3 PeVまで加速されるのか、についてはわかっていない。そこで申請者は数年単位でのX線時間変動という未開拓の手法を用いた観測的研究を行い、上記二つの未解決問題にアプローチした。

超新星残骸は従来100年単位で時間変化すると考えられていた。しかし、申請者は高密度ガスと衝突するsub-pcスケールの局所的な箇所であれば数年単位で変動する可能性を見出し、そのような時間変動が宇宙線の注入問題や最高到達エネルギー問題を解明する手掛かりになると着想した。そして、ガスとの衝突が示唆されるティコの超新星残骸において時間変動を探索し、実際に熱的プラズマやシンクロトロンX線の時間変化を発見した。

本研究では、熱的プラズマやシンクロトロンX線が時間変動から、高密度ガスと衝突している局所的な領域で、粒子加熱や粒子加速が活発に行われている可能性を見出した。熱的プラズマの変動に関しては、超新星残骸での衝撃波加熱により電子が加熱される様子を捉えた初めての例であり、注入問題や加熱機構といった未解決問題に繋がる重要な成果である。また、シンクロトロンX線の変動に関しては、一般に考えられている衝撃波面での加速とは独立かつ効率的な加速機構が衝撃波面から離れた箇所に存在することを示唆する結果であり、従来の衝撃波加速の描像に再考の余地を与えたと言える。

以上のことから、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降