

氏名	ばんばあや 馬場 彩
学位の種類	博士 (理学)
学位記番号	理博第 2750 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学第二専攻
学位論文題目	A Detailed Spatial and Spectral Study of Synchrotron X-rays from Supernova Remnants with <i>Chandra</i> ( <i>Chandra</i> による超新星残骸からのシンクロトロン X 線の空間・スペクトルに関する詳細研究)
論文調査委員	(主査) 教授 小山 勝二 教授 谷 森 達 助教授 犬塚 修一郎

### 論 文 内 容 の 要 旨

宇宙線とは宇宙空間を飛び交う超高エネルギー粒子で、スペクトルは knee と言われる折れ曲がりをもち、最高エネルギーは  $10^{20}$  eV にものぼる。発見以来 100 年近くその加速起源は謎のままであった。近年になり超新星残骸 SN 1006 衝撃波面から TeV 領域まで加速された電子からのシンクロトロン放射が発見され、超新星残骸衝撃波面が宇宙線加速の現場であることが明らかになっている。理論的には、粒子が衝撃波面を何度も往復することによってエネルギーを得る Diffusive shock acceleration (DSA) 機構が最も広く受け入れられている。しかし、大局的な DSA 理論の成功とは対照的に、磁場方向や強度、乱流度、電子の最高エネルギーなどの定量的議論は紛糾しており、一つの観測事実に対しても多種多様の解釈が乱立している。

この混乱の最も大きな原因は衝撃波面での粒子の空間分布が知られていなかったことにある。空間分布という情報は粒子のジャイロ半径や磁場の乱流度を表す直接的な測定量であるが、過去の観測では空間分解能の不足のために測定が出来なかった。そこで上記課題を解決するために申請者は、空間分解能の卓越した X 線天文衛星 *Chandra* を用いて超新星残骸衝撃波面に存在する高エネルギー電子からのシンクロトロン放射の空間分布を世界で初めて調べた。申請者は爆発の瞬間が過去の記録に残されている銀河内にある超新星残骸 5 天体とおよび記録のないスーパーバブル 1 天体の *Chandra* による観測結果を解析した。そのうちの一天体超新星残骸 SN 1006 のシンクロトロン放射は幅が超新星残骸の外側で 0.04 pc、内側で 0.2 pc と半径 (9 pc) の 1% 以下の小さい構造を持つ filament 状領域に集中していることを世界で初めて発見した。このような狭い幅は

1. 磁場は衝撃波法線に垂直に近い。
2. 衝撃波内側の磁場は乱流状態である。

という磁場条件の時に説明できる。また、電子は狭い局所的な場所で効率良く加速されており、加速現場では熱エネルギーと磁場エネルギー、および加速された電子のエネルギーが equipartition に達していることを発見した。

申請者はその他の全ての観測ターゲットにも SN 1006 同様の filament 状に集中したシンクロトロン放射を発見した。いずれのケースでも衝撃波法線に垂直で内側で乱流に近い磁場を考えると細い構造を説明することが出来る。さらに申請者は filament 構造の進化を調べ、電子の最高エネルギーは超新星残骸の年齢の  $4/5$  乗で、磁場強度は年齢の  $-3/5$  乗で進化することを突き止めた。超新星残骸は断熱膨張段階にある時、熱エネルギー密度・運動エネルギー密度・運動エネルギー密度とも年齢の  $-6/5$  乗で進化する。申請者は衝撃波面近傍の局所的な部分では磁場エネルギー密度・加速粒子エネルギー密度も年齢の  $-6/5$  乗で進化することを発見した。これら 4 つのエネルギー密度の時間依存が同じであるということは、お互いが強く相互作用し、equipartition を保ちながら進化することを意味する。

## 論文審査の結果の要旨

超新星残骸衝撃波面での宇宙線加速の観測的研究は、30年近くにわたってシンクロトロン放射のスペクトル情報のみに頼りに続けられてきた。しかし、磁場方向や乱流度など三次元的構造の不定性や加速効率など多くのフリーパラメータが結果を大きく左右するためさまざまなモデルが乱立し、隔靴搔痒の感があった。そのような背景の中で、高エネルギー電子からのシンクロトロン放射の空間分布という新しい情報に注目したところに本研究の独自性がある。また本研究は空間分解能に優れたX線天文衛星 Chandra の登場によって初めて成し得た時期を得たものである。

申請者は、複数の歴史的超新星残骸およびスーパーバブルからのシンクロトロンX線放射を解析し、放射が極端に狭い filament 状領域に集中していることを世界で初めて数値化して示した。本論文ではまた、filament の幅を説明するための磁場構造も調べ、いずれの超新星残骸の場合も衝撃波法線に垂直で乱流状態の磁場を考えると細い構造を説明できることも示した。これは宇宙線加速現場での磁場構造を初めて観測的に示した成果である。また、電子は局所的に効率良く加速され、電子や磁場の持つエネルギー密度は熱エネルギー密度とほぼ等しくなる equipartition であることも初めて示した。これは、衝撃波の持つエネルギーに対して宇宙線のエネルギーは無視できるとしていた従来の予想を完全に覆す画期的な結果である。

さらに本論文では超新星残骸の加齢による filament の進化も議論している。申請者は filament の細かさとスペクトルの折れ曲がりの位置という純粋な観測量と比較的少ない仮定から、超新星残骸衝撃波の持つ熱エネルギー密度・運動エネルギー密度と磁場エネルギー密度・宇宙線エネルギー密度はおなじ時間依存で進化することを初めて発見した。これは超新星残骸衝撃波面において、4つのエネルギー構成要素がお互いに強く作用しながら、また equipartition を保ったまま、進化していることを示している。現在までの理論計算のほとんどはこれらの相互作用の全て・またはいくつかを無視しながら行なわれてきた。従って本研究の結果は、従来の手法で研究を続ける研究者に大きな衝撃を与えるだろう。

このように本申請論文は、Chandra 衛星の特徴を最大限生かし、超新星残骸衝撃波面での粒子加速の歴史に新たな知見を与えた独創的なものであると結論づけられる。またこれらの結果は超新星残骸での粒子加速にとどまらず、プラズマ物理学や太陽風研究、磁気流体力学などの多種多様な分野との相互研究にもつながることが期待され、今後の幅広い可能性を秘めている。よって本申請論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問し、合格と認めた。