

氏名	辻 直美
学位の種類	博士(理学)
報告番号	甲第532号
学位授与年月日	2020年3月31日
学位授与の要件	学位規則(昭和28年4月1日 文部省令第9号) 第4条第1項該当
学位論文題目	Particle Acceleration in Young Supernova Remnants with Nonthermal X-ray and Gamma-ray Observations 非熱的X線ガンマ線観測を用いた若い超新星残骸に おける粒子加速
審査委員	(主査) 北本 俊二(立教大学大学院教授) 内山 泰伸(立教大学大学院教授) 中山 優 (立教大学大学院准教授)

I. 論文の内容の要旨

(1) 論文の構成

本論文は、発見以来 100 年以上残された課題である高エネルギー宇宙線の加速機構の問題に迫るものである。特に銀河系内の宇宙線の加速現場として考えられている超新星残骸の衝撃波での加速機構を観測データから明らかにしようとするものである。

論文は次のように構成されている。

第 1 章では、序論として、宇宙線について最近の新しい結果を踏まえて概説する。そこで、 10^{15} 電子ボルト以下の宇宙線は銀河系内で加速され、その現場は超新星残骸の衝撃波であると考えられている事を述べる。一方で、衝撃波での加速機構で重要な乱流磁場による粒子散乱がどのように行われているか、加速によりエネルギーをどこまで上げ得るのか、また、初期に粒子の入射はどうするか等の問題点を説明する。第 2 章では、宇宙線の起源に関する一般的な解釈と、超新星残骸の標準的な進化モデルを説明し、X 線やガンマ線観測に関連する放射機構を概説する。その後、粒子加速の基礎的な説明から始め、到達最高エネルギーの考え方と、粒子加速で重要となる、磁場による粒子散乱、磁場の乱流の扱いについて説明する。そして、本論文の根幹となる、加速と冷却を踏まえた電子のエネルギー分布の計算とその電子が放射する X 線とガンマ線のエネルギースペクトルを、先行研究を参照しながら導出する。第 3 章では、本論文で解析を行なったデータを取得した 3 種類の装置（チャンドラ衛星、NuSTAR 衛星、および H. E. S. S. 望遠鏡）の構造と性能について説明する。第 4 章では、最も標準的な Bohm 拡散近似から導出される、理論的な X 線エネルギースペクトルのモデルを 11 個の若い超新星残骸に適用し X 線のカットオフエネルギーを求める。一方、最近の研究から報告されている衝撃波の膨張速度を参照し、粒子加速の効率である、Bohm 因子を導出する。第 5 章ではガンマ線の観測エネルギースペクトルに、やはり、Bohm 拡散近似でのモデルスペクトルを適用し、同様に Bohm 因子を導出する。第 6 章では、Bohm 拡散近似を超えた、より拡張した拡散係数を導入して、X 線ガンマ線のエネルギースペクトルのモデルを説明し、観測データへ適用する。第 7 章で本論文の結果をまとめる。

(2) 論文の内容要旨

本論文では、 10^{15} 電子ボルト以下のエネルギーを持つ宇宙線の起源として考えられている超新星残骸の衝撃波での粒子加速機構を研究するため、理論モデルを観測データに適用し、モデルから導出される加速効率の性質を調べた。ま

ず、乱流磁場による粒子拡散を Bohm 拡散で近似した場合の、X 線とガンマ線放射モデルを、11 個の超新星残骸に適用した。いくつかの超新星残骸は、場所を分割して、複数の場所のスペクトルにモデルを適用した。求めたスペクトル形状と、これまで報告されている衝撃波速度を参照して、粒子加速効率を表す Bohm 因子を導出した。その結果、ティコの超新星残骸とケプラーの超新星残骸では、場所に依らず、衝撃波の膨張速度は X 線エネルギースペクトルから導いたカットオフエネルギーと良い相関を示し、観測場所にかかわらず同程度の Bohm 因子を持つことを明らかにした。一方、カシオペア座 A では、Bohm 因子はプラズマの密度に相関して、場所により異なる値を示すこと、さらには 1006 年の超新星の残骸では Bohm 因子は磁場と衝撃波面のなす角度に依存していることを求めた。

また、本論文では、はじめて 11 個というたくさんの若い超新星残骸を系統的に解析することで、Bohm 因子は超新星残骸の年齢とともに小さくなることを初めて示唆した。この結果により、超新星残骸の衝撃波での加速において、到達最高エネルギーの値は、これまでの考えより高いエネルギー、すなわち 10^{15} 電子ボルトまで到達できる可能性を示唆した。

さらに、ガンマ線エネルギースペクトルにも初めて Bohm 拡散で近似した場合のモデルを適用し、ガンマ線エネルギースペクトルからも Bohm 因子を求めることができることを示した。加えて、Bohm 拡散をさらに拡張し、Kolmogorov 型をはじめとするいくつかの拡散モデルを、X 線データに適用することも試みた。

II. 論文審査の結果の要旨

(1) 論文の特徴

宇宙物理学における長年の問題である、宇宙線の加速機構を解明するために、加速現場と考えられている若い超新星残骸の衝撃波領域の、精密分光および精密撮像の両面のデータに、乱流磁場による粒子散乱を仮定した標準的な加速モデルを適用した。特に本論文では、これまでになく多数である 11 個の若い超新星残骸に適用することで、加速の一般的な描像を捉えようとする事が特徴である。結果として、使用したモデルの範囲内でうまく当てはまる超新星残骸と、別の要素、プラズマ密度や磁場と衝撃波面のなす角度を考慮する必要があるもの、さらには、年齢の若いものは冷却平衡に達していない可能性がありモデルの適用が不適切であるものがあることを突き止めた。また、多数の超新星残骸の観測結果を解析することで、加速効率が超新星残骸の年齢とともに良くなることを初めて示唆した。また、本論文では、初めて、 10^{12} 電子ボルト帯域のガンマ線観測からも加速効率を導出できることを示した。さらには、標準的な理

論的加速モデルを超えてより一般化したいくつかの乱流を導入するモデルまで、適用を試み、将来のより高精度な観測が可能になれば、宇宙線の加速機構のより進んだ解明に繋がることを示したことも特徴である。

(2) 論文の評価

本論文は、 10^{15} 電子ボルトまでのエネルギー帯の宇宙線の加速領域と考えられている若い超新星残骸の衝撃波の観測データに標準的乱流磁場による粒子散乱を仮定した加速モデルを 11 個の若い超新星残骸の観測データに適用し、初めて、系統的に研究を行なった。そして、個々の超新星残骸での加速効率を議論するとともに、解析した超新星残骸を統合することにより、超新星残骸の年齢とともに加速効率が良くなるという、全く新しい見解を示唆した。この示唆は、宇宙線加速における最大到達エネルギーの評価を変更するものである。すなわち、長年謎とされている宇宙線加速の問題の一つ、 10^{15} 電子ボルトまでの宇宙線が超新星残骸の衝撃波により達成できるかという問題に、解決の可能性を示した事となり、高い評価に値する。加えて、ガンマ線の観測データからも加速効率を導出する方法を示したこと、さらには、標準的な粒子散乱モデルを超えた散乱モデルを適用した加速モデルも、観測データに適用できることを示したことは、将来の観測への期待をますます膨らませるものである。以上のように、本論文は、科学の発展に大きく貢献し、博士論文の価値があると判断する。