

氏 名	霜 田 治 朗
学 位	博士（理学）
学 位 記 番 号	博理理甲 第31号
学位授与の日付	2018年 3 月24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	Probing the Cosmic-Ray Acceleration Efficiency in Supernova Remnant Shocks
論文審査委員	主 査 准教授 山 崎 了 副 査 教 授 吉 田 篤 正 副 査 准教授 坂 本 貴 紀 副 査 首都大学東京教授 政 井 邦 昭

論 文 内 容 の 要 旨

霜 田 治 朗

本論文では超新星残骸衝撃波での宇宙線加速効率を、水素原子輝線の偏光観測から測定する方法を提案する。この測定法は既存の方法に比べて超新星残骸までの距離の不定性に依存しないことが従来の測定法と異なる特徴である。また今回提唱した測定法を応用することで宇宙線加速効率だけでなく超新星残骸までの距離も見積もることができる。本論文の構成は以下の通りである。まず第 1 章で本論文の導入および概要の要約を示す。第 2、3 章では本研究の背景と目的を詳しく述べる。第 4 章では超新星残骸での磁場特性の測定法について検討し、第 5 章、6 章で宇宙線加速効率の測定法について定量的に検討する。最後に第 7 章で本論文での結論と今後の課題についてまとめる。以下、2 章から 6 章の概要とともに、研究の背景と目的、得られた結果について述べる。

第 2 章では宇宙線の起源についての先行研究を紹介し、銀河系内の宇宙線の起源天体の第一候補である超新星残骸と宇宙線加速機構についてまとめた。

宇宙線は宇宙空間を飛び交う荷電粒子であり、地球周辺で $\sim 10^9 - 10^{20}$ eVに渡って

べき型のエネルギースペクトルをもつことが観測されている。このうち約 10^9 eVから約 $10^{15.5}$ eVまでの宇宙線は銀河系内のエネルギー収支から超新星残骸を起源にもつと考えられている。超新星残骸は超新星爆発のときに吹き飛んだ星の外層が周囲の媒質と相互作用し衝撃波を形成しながら膨張している天体である。このとき形成される衝撃波は荷電粒子と電磁波動との相互作用により形成され、「無衝突衝撃波」と呼ばれる。無衝突衝撃波では粒子間のクーロン衝突によるエネルギー交換が不十分であるために、粒子のエネルギー分布がマクスウェル分布に従わず、一部の粒子が宇宙線のようなべき型のエネルギースペクトルをもつことが許される。また同時に、衝撃波上流の水素原子は散逸されることなく衝撃波面を横切り下流に流入する。一方、荷電粒子は衝撃波によって散逸されているため、下流の水素原子と荷電粒子との間に有限の相対速度が生じ、これら粒子の衝突の結果、水素原子輝線が放射される。このとき、一部の水素原子が下流の熱化された陽子と電荷交換反応を経験するため、観測される水素原子輝線のスペクトルは上流の温度を反映した狭輝線成分と、下流の陽子温度を反映した広輝線成分をもつ。また超新星残骸の密度の典型値に対しては、水素原子の電離反応の平均自由行程が超新星残骸の半径の100分の1程度になるため、水素原子輝線は天球面上で波面をトレースするようにフィラメント状に輝く。超新星残骸でよく観測されるのはBalmer系列の水素原子輝線であり、主量子数が $n=3$ から $n=2$ に遷移した際に発せられるH α 輝線が最も明るい。

宇宙線加速機構として、「衝撃波統計加速 (diffusive shock acceleration, 以下 DSA)」と呼ばれる機構が最も信頼されている。DSA機構では宇宙線のような高エネルギー粒子が衝撃波上流と下流で磁気擾乱により散乱され、衝撃波面を往復することだけが仮定されている。上流では波面に流入してくる磁気擾乱と対向して衝突することでエネルギーを得るのに対し、下流では波面から流出する擾乱に追突するためエネルギーを失う。このとき上流の流入速度の方が下流の流出速度よりも大きいために、宇宙線は波面を往復するごとにエネルギーを増す。宇宙線の最高エネルギーは往復にかかる時間と超新星残骸の年齢が釣り合うという条件から与えられる。往復にかかる時間は宇宙線の拡散時間によって与えられ、拡散係数は磁場の強度と乱れ具合に依存する。星間媒質中の典型的な磁場強度として $3\ \mu\text{G}$ を仮定すると、最高エネルギーは約 10^{13} eVと見積もられ、 $10^{15.5}$ eVまで到達しない。これを解決させるためには衝撃波近傍の磁場を100倍程度増幅させる必要がある。

第3章では超新星残骸衝撃波で必ず起こる磁場増幅機構として提案されているBell

不安定性とRichtmyer-Meshkov不安定性について述べた。さらに、既存の宇宙線加速効率の測定方法の問題点を指摘した。

Bell不安定性では宇宙線自身が背景プラズマに与える反作用効果により上流の磁場を増幅する（増幅された磁場は下流に流されていく）。このとき $10^{15.5}$ eVの宇宙線を加速するためには、衝撃波の運動エネルギーの～50%に相当する量の宇宙線が要求される。一方、Richtmyer-Meshkov不安定性による磁場増幅は、密度ゆらぎをもつ媒質中を衝撃波が伝播することで波面が波打ち、下流で駆動する磁気乱流によるダイナモ効果によって起こる。星間媒質中で期待される密度ゆらぎの場合、磁場は100倍程度まで増幅されることが3次元の磁気流体シミュレーションにより示されており、この機構で増幅された磁場は超新星残骸の電波偏光観測の結果を説明できる。この場合は宇宙線加速効率が低い場合（すなわち宇宙線量が少ない場合）でも磁場を増幅することができるが、宇宙線が衝撃波面を往復する時間を短くするためには上流も同時に増幅する必要がある。

最も受け入れられている磁場増幅機構は上流と下流の磁場を同時に増幅できるBell不安定性である。現実の超新星残骸での宇宙線加速効率は衝撃波のエネルギー損失率から推定されている。衝撃波が宇宙線を効率的に加速している場合、エネルギー損失により下流の実際の温度（ T_{down} ）は断熱衝撃波を仮定して推定した温度（ T_{RH} ）よりも低くなる。後者は、衝撃波速度の測定値と衝撃波接続条件から推定されるものであり、エネルギー損失がなければ実際の下流の温度と等しくなるべきものである。本論文ではエネルギー損失率を以下のように定義する。

$$\eta \equiv \frac{T_{\text{RH}} - T_{\text{down}}}{T_{\text{RH}}}$$

下流の温度と衝撃波速度を独立に測定することで、エネルギー損失率が推定できる。先行研究では下流の温度は水素原子輝線の広輝線成分の線幅から、衝撃波速度は水素原子輝線の表面輝度分布の天球面内の移動速度からそれぞれ測定される。このとき、衝撃波速度の推定には加速現場までの距離を正確に知る必要がある。しかしながら、超新星残骸までの距離の正確な測定は困難である。さらに、先行研究では星間媒質の密度揺らぎによって波面が波打つことが無視されている。波面が波打つ場合、波面に平行な方向の流体の運動は散逸されない。このため下流の温度は波面が平面である場合よりも低くなり、エネルギー損失率を大きく見積もってしまう。従って、既存の方法による宇宙線量の推定は定量的な信頼性に欠ける。

第4章では宇宙線の拡散係数を決定する磁気擾乱のエネルギースペクトルの測定について検討した。星間媒質の磁気乱流を対象に、電波シンクロトロン放射強度の二点相関函数から乱流磁場のエネルギースペクトルが測定できることが示されている。この先行研究では放射領域の空間構造が一様であるという理想化された条件が課されている。超新星残骸は球殻状の放射領域をもつため、天球面上の像の同心円に沿って二点相関を解析することで、理想的な条件下の二点相関函数が得られる。先行研究の解析手法を実際の超新星残骸の電波帯域の天球面内の空間分布に適用し、現在の観測データから十分な精度で二点相関函数を解析できることを示した。また、解析により得られた二点相関函数がRichtmyer-Meshkov不安定が駆動する磁気乱流によって説明できることを示した。

第5章では既存の衝撃波のエネルギー損失率の測定における上流の密度ゆらぎの影響を3次元の磁気流体シミュレーションを用いて調べた。シミュレーションデータに基づいて水素原子輝線の放射計算を行い、実際の観測と全く同じ手法で衝撃波速度を擬似観測しエネルギー損失率を推定した。その結果、宇宙線の加速が起こっていない場合にも、見た目のエネルギー損失率がゼロにはならないことを示した。典型的な星間媒質の場合、損失率は10–40%と推定されてしまう。また、過大評価してしまう分の損失率は上流の密度ゆらぎの振幅程度になることを解析的議論により示した。

第6章では水素原子輝線の偏光観測によってエネルギー損失率が加速現場までの距離の不定性に依らず測定できることを、最新の原子衝突の反応断面積のデータを用い、宇宙線を効率的に加速する衝撃波で放射される $H\alpha$ 輝線と $H\beta$ 輝線の偏光放射を理論計算することで示した。励起した原子の自発遷移により輝線が発せられるさいに、束縛電子が失った軌道角運動量が光子の偏極に変換される。電子（陽子）ビームと水素原子の衝突実験の場合、最大で偏光度約40%（25%）の $H\alpha$ 輝線放射が確認されている。超新星残骸衝撃波の場合、水素原子に衝突する荷電粒子は衝撃波散逸により有限の温度と衝撃波速度程度の集団的な速度をもつ。このため水素原子静止系で見ると、衝突する荷電粒子の速度分布に有限の異方性が存在し（ある程度収斂されたビームとして衝突する）、～数%の偏光度をもつ輝線放射が観測される。従って、超新星残骸で観測される水素原子輝線の偏光度は下流の温度と衝撃波速度に依存する。下流の温度は水素原子輝線の広輝線成分の線幅から測定されるので、偏光度から衝撃波速度が導かれ、エネルギー損失率が評価できる。宇宙線が効率的に加速されエネルギー損失率が大きくなるほど下流の温度が小さくなるので、断熱衝撃波の場合に比べて偏光度が大

きくなる。この測定方法では超新星残骸の距離を正確に測定する必要がない。また水素原子輝線の表面輝度分布の天球面上の移動の観測と組み合わせることで、超新星残骸までの距離も推定することができる。

発 表 論 文

本研究に関する論文

【学術雑誌】

(査読のあるもの)

- [1] 井上剛志, 霜田治朗, 大平豊, 山崎了, 「The Origin of Aligned Magnetic Fields in Young Supernova Remnants」, The Astrophysical Journal Letters, 772巻, 2号, L20, L24, 2013年
- [2] 霜田治朗, 井上剛志, 大平豊, 山崎了, 馬場彩, Jacco Vink, 「On Cosmic-Ray Production Efficiency at Supernova Remnant Shocks Propagating into Realistic Diffuse Interstellar Medium」, The Astrophysical Journal, 803巻, 2号, 98, 103, 2015年
- [3] 勝田哲, 前田啓一, 大平豊, 谷津陽一, 森浩二, 青木和光, 森鼻久美子, John C. Raymond, Paritz Ghavamian, Jae-Joon Lee, 霜田治朗, 山崎了, 「Spatially-Resolved Spectroscopy of a Balmer-Dominated Shock in Cygnus Loop: An Extremely Thin Cosmic-Ray Precursor?」, The Astrophysical Journal Letters, 819巻, 2号, L32, L37, 2016年
- [4] 霜田治朗, 大平豊, 山崎了, Martin, J. Laming, 勝田哲, 「Polarized Balmer line emission from supernova remnant shock waves efficiently accelerating cosmic rays」, Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, 473巻, 1号, 1394, 1406, 2018年 1月 1日発行

【国際会議議事録】

(査読のあるもの)

- [5] 霜田治朗, 井上剛志, 大平豊, 山崎了, 「Synthetic Observation of Turbulent Supernova Remnants」, Proceedings of the 12th Asia Pacific Physical Conference, JPS Conf.Proc.1, 013102, 2014年

- [6] 霜田治朗, 井上剛志, 大平豊, 山崎了, 馬場彩, Jacco Vink, 「On Cosmic-Ray Production Efficiency at Realistic Supernova Remnant Shocks」, Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference 2015, 485, 2015年
- [7] 霜田治朗, 井上剛志, A. Lazarian, 「On Synthetic Measurements of the Turbulent Magnetic Field Property in Young Supernova Remnant」, Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference 2017, 2017年, 掲載受理

【受賞】

- [8] 青山学院大学大学院給付奨学生 (2014年度)
- [9] 青山学院大学薦田先端学術賞 (2015年度)
- [10] 日本学生支援機構奨学金返還全額免除 (2015年度)
- [11] 青山学院大学学業成績優秀者表彰 最優秀賞 (2017年度)

審査の結果要旨

本論文では超新星残骸衝撃波での宇宙線加速効率を、水素原子輝線の偏光観測から決定する方法を新たに提案している。本論文によって提唱された手法を応用することで宇宙線加速効率だけでなく超新星残骸までの距離も決定することができるのも従来の手法と異なる特色である。本論文の構成は以下の通りである。まず第1章で本論文の導入および概要の要約を示している。第2、3章では本研究の背景と目的について詳しく述べている。第4章では超新星残骸での磁場特性の測定法について検討し、第5章、6章で宇宙線加速効率の測定法について定量的に検討している。最後に第7章で本論文での結論と今後の課題についてまとめている。以下、2章から6章の概要とともに、研究の背景と目的、得られた結果について述べる。

第2章では、宇宙空間を飛び交う荷電粒子である宇宙線の起源についての先行研究を紹介している。まず、エネルギーが約 10^9 eVから約 $10^{15.5}$ eVまでの銀河宇宙線の起源天体の第一候補である超新星残骸の無衝突衝撃波についてまとめている。超新星残骸は、超新星爆発で放出された物質が周囲の星間物質中に膨張し、その相互作用による衝撃波が伝播して形成された高温のプラズマから成る天体である。星間空間は希薄であるため、超新星残骸の衝撃波は、粒子間衝突でなく電磁場を介したプラズマの集団的相互作用による散逸過程が支配的な「無衝突衝撃波」となる。無衝突衝撃波では

粒子間のクーロン衝突による運動量交換が不十分であるため、熱的分布から逸脱した高エネルギー成分が存在しうる。これが超新星残骸の外部に放出されると銀河宇宙線となる。

続いて、超新星残骸で観測されるBalmer系列の水素原子輝線の放射についてまとめている。衝撃波上流の水素原子は電氣的に中性なので衝撃波の電磁波動による散逸を受けずに波面を横切り下流に流入する。一方、荷電粒子は衝撃波によって加熱・加速されているため、下流の水素原子と荷電粒子との間に有限の相対速度が生じ、これら粒子の衝突の結果、水素原子輝線が放射される。このとき、一部の水素原子が下流の熱化された陽子と電荷交換反応を経験するため、観測される水素原子輝線のスペクトルは上流の温度を反映した輝線幅の狭い「狭輝線成分」と、下流の陽子温度を反映した輝線幅の広い「広輝線成分」をもつ。

さらに第2章では、無衝突衝撃波での宇宙線加速機構についてまとめている。無衝突衝撃波の近傍では、荷電粒子が衝撃波上流と下流で電磁波動により散乱され、衝撃波面を何度も往復することで加速される。衝撃波面の静止系で考えると、荷電粒子は上流では散乱体となる波動と正面衝突することでエネルギーを得るのに対し、下流では散乱体に追突するためエネルギーを失う。このとき上流の散乱体の速度の方が下流のそれよりも大きいために、宇宙線は波面を往復するごとにエネルギーを増す。宇宙線の最高エネルギーや加速効率は、散乱体となる磁場の強度と乱れ具合に依存する。星間媒質中の典型的な磁場強度として $3\text{ }\mu\text{G}$ を仮定すると、最高エネルギーは約 10^{13} eV と見積もられ、 $10^{15.5}\text{ eV}$ まで到達しない。これを解決するには衝撃波近傍の磁場を100倍程度増幅させる必要があり、このことは現代の宇宙線研究の主要テーマの1つであると認識されている。

第3章では、まず超新星残骸衝撃波で起こりうる磁場増幅機構として提案されているBell不安定性とRichtmyer-Meshkov不安定性を紹介している。Bell不安定性とは、宇宙線自身が背景プラズマに与える反作用効果により上流と下流双方の磁場が増幅される機構である。しかし、Bell不安定性によって $10^{15.5}\text{ eV}$ の宇宙線を加速するためには、衝撃波の運動エネルギーの約50%に相当する宇宙線量が要求されることが不自然であると指摘している。一方、Richtmyer-Meshkov不安定性とは、密度ゆらぎをもつ媒質中を衝撃波が伝播することで波面が波打ち、下流で駆動する磁気乱流によるダイナモ効果で磁場を増幅する機構である。星間媒質中で期待される密度ゆらぎの場合、磁場は100倍程度まで増幅されることが3次元の磁気流体シミュレーションにより示さ

れており、この機構で増幅された磁場は超新星残骸の電波偏光観測の結果を説明できる。この場合は宇宙線加速効率が低く宇宙線量が少ない場合でも磁場を増幅することができるが、宇宙線が衝撃波面を往復する時間を短くするためには上流も同時に増幅する必要がある。

続いて、超新星残骸での宇宙線加速効率の既存の推定方法についての問題点を指摘している。超新星残骸が銀河宇宙線の起源であることを証明するためには、1つの超新星残骸で生成される宇宙線量を見積もることが重要であり、従って、衝撃波での宇宙線の加速効率を求めることが必要となる。しかし、これまでそれに成功した研究例は理論的にも観測的にもほとんどなく、宇宙線研究の主要なテーマとなっている。宇宙線の加速効率は衝撃波のエネルギーのうちプラズマの加熱に使われていないエネルギー損失率から推定される。宇宙線が加速領域である衝撃波近傍から抜け出してエネルギーを持ち出すと、衝撃波のエネルギー損失が大きくなるからである。つまり、衝撃波が宇宙線を効率的に加速している場合、衝撃波下流の実際の温度 (T_{down}) は断熱衝撃波を仮定して推定した温度 (T_{RH}) よりも低くなる。後者は、衝撃波速度の測定値と衝撃波接続条件から推定されるものであり、エネルギー損失がなければ実際の下流の温度と等しくなるべきものである。本論文ではエネルギー損失率を

$$\eta \equiv \frac{T_{\text{RH}} - T_{\text{down}}}{T_{\text{RH}}}$$

と定義し、これを用いて宇宙線加速効率の推定を試みている。もし下流の温度と衝撃波速度を独立に測定できれば、 η の値を決定できる。先行研究では下流の温度は水素原子輝線の広輝線成分の線幅から、衝撃波速度は水素原子輝線の表面輝度分布の天球面内の移動速度からそれぞれ測定されてきた。このとき、衝撃波速度の推定には加速現場までの距離を正確に知る必要があるが、超新星残骸までの距離の正確な測定は困難な場合が多い。さらに、先行研究では星間媒質の密度揺らぎによって波面が波打つことが無視されている。波面が波打つ場合、波面に平行な方向の流体の運動は散逸されない。このため下流の温度は波面が平面である場合よりも低くなり、エネルギー損失率を大きく見積もってしまう。以上の問題点があるために、既存の方法では超新星残骸での宇宙線加速効率の推定は定量的な信頼性に欠けると指摘している。

第4章では宇宙線の拡散係数を決定する磁気擾乱のエネルギースペクトルの測定について検討している。星間媒質の磁気乱流を対象に、電波シンクロトロン放射強度の二点相関関数から乱流磁場のエネルギースペクトルが測定できることを示している。

超新星残骸は球殻状の放射領域をもつため、天球面上の像の同心円に沿って二点相関を解析することで、理想的な条件下の二点相関関数が得られる。この解析手法を実際の超新星残骸の電波帯域の天球面内の空間分布に世界で初めて適用し、観測データから十分な精度で二点相関関数を解析できることを実存するデータに対して具体的に示している。また、解析により得られた二点相関関数がRichtmyer-Meshkov不安定が駆動する磁気乱流によって説明できるという結果も得ている。

第5章では既存の衝撃波のエネルギー損失率の測定における上流の密度ゆらぎの影響を3次元の磁気流体シミュレーションを用いて調べている。シミュレーションデータに基づいて水素原子輝線の放射計算を世界で初めて行い、実際の観測と全く同じ手法で衝撃波速度を擬似観測しエネルギー損失率を推定している。その結果、宇宙線の加速が起こっていない場合にも、見た目のエネルギー損失率がゼロにはならないことを示している。典型的な星間媒質の場合、損失率は10–40%と推定されてしまう。また、過大評価してしまう分の損失率は上流の密度ゆらぎの振幅程度になることを解析的に示している。

第6章では、最新の原子衝突の反応断面積のデータを用い、宇宙線を効率的に加速する衝撃波で放射される $H\alpha$ 輝線と $H\beta$ 輝線の偏光放射を世界で初めて計算している。励起した原子の自発遷移により輝線が発せられる際に、束縛電子が失った軌道角運動量が光子の偏極に変換される。電子（陽子）ビームと水素原子の衝突実験の場合、最大で偏光度約40%（25%）の $H\alpha$ 輝線放射が確認されている。超新星残骸衝撃波の場合、水素原子に衝突する荷電粒子は衝撃波散逸により有限の温度と衝撃波速度程度の集団的な速度をもつ。このため水素原子静止系で見ると、衝突する荷電粒子の速度分布に有限の異方性が存在し、結果として数パーセント程度の偏光度のバルマー輝線放射が期待される。従って、超新星残骸で観測される水素原子輝線の偏光度は下流の温度と衝撃波速度に依存する。下流の温度は水素原子輝線の広輝線成分の線幅から測定されるので、偏光度から衝撃波速度が導かれ、エネルギー損失率が評価できる。本論文では、宇宙線が効率的に加速されエネルギー損失率が大きくなるほど下流の温度が低くなるために偏光度が大きくなることを世界で初めて詳細な計算とともに示している。つまり、観測されたバルマー輝線の偏光度から宇宙線加速効率を算出する方法を与えたことになる。この測定方法では超新星残骸の距離を正確に測定する必要がないことも特色である。また水素原子輝線の表面輝度分布の天球面上の移動の観測と組み合わせることで、超新星残骸までの距離も決定できると指摘している。

これらの研究成果は霜田氏を筆頭著者とする原著論文2編として、米国天文学会の発行するAstrophysical Journal誌、英国王立協会の発行するMonthly Notices of the Royal Astronomical Society誌に公表されており、国際的に高い評価を受けている。また、12件の国際会議と14件の国内での研究会でも発表されている。

以上のように、本論文では宇宙線加速過程とその標準シナリオを実際の観測から検証するため、超新星残骸衝撃波での宇宙線加速効率の新たな手法を提案した。さらに、超新星残骸までの距離を推定する新たな手法も提案した。これらの成果は宇宙線の起源や超新星残骸の研究に対して大きく寄与するものである。以上のことから、本委員会は審査論文が博士（理学）の学位論文として十分相当なものであると認定し、学位申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。