

氏名	武田 佐和子
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記号番号	博理工乙第 236 号
学位授与年月日	平成 28 年 9 月 23 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	Systematic X-ray Spectral Study of Particle Acceleration in Supernova Remnants (X 線スペクトルによる超新星残骸における粒子加速の系統的研究)
論文審査委員	委員長 教授 田代 信 委員 准教授 寺田 幸功 委員 連携教授 望月 優子 委員 教授 井上 直也

## 論文の内容の要旨

超新星爆発の後に残る超新星残骸は、爆発によって放出された物質が、星間空間に伝播する衝撃波によって生成される。その内部には加熱されたプラズマが観測されることが多いが、それとは別に、その衝撃波面で粒子加速を行っていることが分かっている (Koyama et al. 1995 など)。加速は Diffusive shock acceleration (Bell 1978) 機構によると考えられているが、その物理的パラメータなど詳細はまだ明らかにされていない。超新星残骸での粒子加速は、加速された電子からのシンクロトロン放射を観測することで調べられる。観測される光子スペクトルは、相対論的な速度にまで加速された電子のエネルギーに対応しているので、その roll-off の周波数から電子の最高エネルギーの二乗に磁場を掛けた値が (Reynolds 1998)、シンクロトロンフィラメントの空間的な幅 (Bamba et al. 2003) や時間変動 (Uchiyama et al. 2007) から磁場が求められる。それらを総合することで、その超新星残骸で加速された電子や陽子の最高到達エネルギーを求めることができる。中でも光子スペクトルの roll-off 周波数は、若い超新星残骸では X 線帯域に来るので、粒子加速を知るうえで X 線の観測をすることが重要である。

光子スペクトルの形は上述したように放射源となる電子のエネルギースペクトルの形で決定される。より具体的には、統計加速によって作られてべき型のエネルギー分布を持つ電子の、スペクトル指数  $p$  と roll-off の形状をあらわす cutoff shape parameter  $a$  によって決められる。これらのパラメータから加速現場の環境を知ることができる。スペクトル指数  $p$  は、衝撃波の圧縮率  $r$  によって決定される (Bell 1978)。強い衝撃波の極限では  $p=2$  ( $r=4$ ) となるが、実際の若い超新星残骸のガンマ線観測からは  $p>2$  となっている (Abdo et al. 2010) ことがほとんどであり、シンクロトロン冷却が効いているために電子スペクトルの勾配が大きくなっていると予想されている。また  $a$  からは拡散係数のエネルギー依存性の指数  $\beta$  を求めることができる。Bohm diffusion の仮定では  $\beta=1$  であるが、観測からは  $\beta=1/3$  や  $1/2$  となる例が報告されており (Blandford & Eichler 1987)、磁場の乱流が Bohm diffusion のような単純なモデルでは表せないことが予想されている。また、 $a$  と  $\beta$  の関係は加速の最大エネルギーがどのように制限されるかによっても変わる。以上の  $p$  と  $a$  に対して簡便に制限を得る方法として、一様分布を仮定してこれらのパラメータを光子スペクトルの軟 X 線

帯域 (<10 keV) と硬 X 線帯域 (>10 keV) の光子指数の関係から制限する方法が Yamazaki et al. (2014) で提案されている。

本研究では、Ferrand によりまとめられた銀河系内の超新星残骸 378 個の中から、粒子加速を活発に行っている天体を選び出して宇宙 X 線観測衛星「すざく」で行った観測結果を取り上げる。具体的には、X 線帯域で検出されていること、shell 型の空間構造をしていること、自由膨張期であることという条件から対象とする天体を絞り込んだ。また、すざくの硬 X 線検出器 (HXD) の視野内に超新星の親星としてのパルサーなどの硬 X 線源候補天体がないこと、という制限もつけ、最終的に選ばれた 6 天体の観測を扱うことにした。

その中の代表例である超新星残骸 Vela Jr. は非熱的放射が卓越している、2 度の広がりをを持った天体である。本研究では特に軟 X 線で明るい北西の shell 部分のみを抜き出して解析し、背景の宇宙 X 線背景放射、銀河面リッジ X 線放射や、検出器由来の Non X-ray background のレベルを評価し、さらにコリメータ型検出器である HXD の広がった天体に対する角度応答を慎重に考慮することによって、10—22keV の硬 X 線放射を高い有意度で検出することに成功した。さらにすざくの X 線 CCD カメラである XIS も用いて 2—22 keV の広い帯域にわたって、軟 X 線と硬 X 線スペクトルを同時に評価することによって、この帯域の全域で、X 線スペクトルが単一指数関数で表されることを明らかにした。これに Yamazaki et al. (2014) の評価方法を適用すると、 $p$  には制限がつかなかったが、 $a$  は 2 よりは小さくなることが分かった。ここから、Vela Jr. の場合は Bohm diffusion は適用できず、拡散係数のエネルギー依存性は小さいことが分かった。しかし、先行研究より Vela Jr. は磁場が強くシンクロトロン冷却がスペクトルの形状を決めていると予想されていた (Bamba et al. 2005) のに対し、本研究の結果からは、スペクトル形状を決めるのはシンクロトロン冷却ではないことが予想されており、先行研究の予想と矛盾している。すなわち、Yamazaki et al. (2014) の前提となっている一様放射領域 (one-zone) 仮定が崩れている可能性を強く示唆することになった。

本研究では、他の 5 つの天体についても、広帯域 X 線スペクトル観測の結果を評価することで、シンクロトロン冷却と電子の拡散についてそれぞれ有意な制限を得ることに成功した。さらに、フィラメント幅の結果 (Bamba et al. 2003) を参照し、それぞれの天体を比較しながら若い超新星残骸での粒子加速場についての議論を加えている。

## 論文の審査結果の要旨

超新星爆発の後に残る超新星残骸は、爆発によって放出された物質が、星間空間に伝搬する衝撃波によって生成される。その内部には加熱されたプラズマが観測されることが多いが、それとは別に、その衝撃波面で粒子加速を行っていることが分かっている (Koyama et al. 1995 など)。加速は diffusive shock acceleration (Bell 1978) 機構によると考えられているが、その物理的パラメータなど詳細はまだ明らかにされていない。超新星残骸での粒子加速は、加速された電子からのシンクロトロン放射を観測することで調べられる。観測される光子スペクトルは、相対論的な速度にまで加速された電子のエネルギーに対応しているため、その rolloff の周波数から電子の最高エネルギーの二乗に磁場を掛けた値が得られ (Reynolds 1998)、さらにシンクロトロンフィラメントの空間的な幅 (Bamba et al. 2003) や時間変動 (Uchiyama et al. 2007) から磁場が求められる。それらを総合することで、その超新星残骸で加速された電子の最高到達エネルギーを求めることができる。中でも光子スペクトルの rolloff 周波数は、若い超新星残骸では X 線帯域に来るので、粒子加速を知るうえで X 線の観測をすることが重要である。

光子スペクトルの形は、統計加速によって作られてべき型のエネルギー分布を持つ電子のスペクトル指数  $p$  と、それにエネルギーの  $a$  乗の指数関数型の rolloff をかける cutoff shape parameter  $a$  によってあらわされる。これらのパラメータから加速現場の環境を知ることができる。スペクトル指数  $p$  は、衝撃波の圧縮率  $r$  によって決定され (Bell 1978)、強い衝撃波の極限では  $p=2$  ( $r=4$ ) となるが、実際の若い超新星残骸のガンマ線観測からは  $p>2$  となっていることがほとんどであり (Abdo et al. 2010)、シンクロトロン冷却が効いているために電子スペクトルの勾配が大きくなっていると予想されている。一方  $a$  からは拡散係数のエネルギー依存性の指数  $\beta$  を求めることができる。Bohm diffusion の仮定では  $\beta=1$  であるが、観測からは  $\beta=1/3$  や  $1/2$  となる例が報告されており (Blandford & Eichler 1987)、磁場の乱流が Bohm diffusion のような単純なモデルでは表せないことが予想されている。また、 $a$  と  $\beta$  の関係は加速の最大エネルギーがどのように制限されるかによっても変わる。これら  $p$  と  $a$  に対して簡便に制限を得る方法として、一様分布を仮定してこれらのパラメータを光子スペクトルの軟 X 線帯域 ( $<10\text{keV}$ ) と硬 X 線帯域 ( $>10\text{keV}$ ) の光子指数の関係から制限する方法が Yamazaki et al. (2014) によって提案されている。

本研究では、Ferrand によりまとめられた銀河系内の超新星残骸 378 個の中から、TeV 放射が観測されており、粒子加速を活発に行っていると考えられる若い自由膨張期の天体であり、超新星の親星としてのパルサーなどの硬 X 線源候補天体がない 6 つの超新星残骸をとりあげている。

まず、これらのうち、これまで信頼できる硬 X 線スペクトルが報告されていない超新星残骸 Vela Jr. については、新たにデータ解析をおこなっている。Vela Jr. は非熱的放射が卓越している、2 度の広がりを持った天体である。本研究では特に軟 X 線で明るい北西の shell 部分のみを抜き出して解析し、背景の宇宙 X 線背景放射、銀河面リッジ X 線放射や、検出器由来の non X-ray background のレベルを評価し、さらに軟 X 線画像を参照しながら、コリメータ型検出器である HXD の広がった天体に対する角度応答を慎重に計算することによって、10—22 keV の硬 X 線放射を高い有意度で検出することに成功した。さらに「すぎく」の X 線 CCD カメラである XIS も用いて 2—22 keV の広い帯域にわたって、軟 X 線と硬 X 線スペクトルを同時に評価することによって、この帯域の全域で、X 線スペクトルが単一指数関数、もしくは硬 X 線側で傾きが緩くなる、下に凸の広帯域スペクトルで表されることを初めて明らかにした。観測されているスペクトルの傾きは、低エネルギー帯域のそれを超えており、X 線帯域では、rolloff 周波数を超えていることが確実である。にもかかわらず、このような広帯域にわたって単一のべき関数あるいは下に凸のスペクトルをしめ

すことは、Yamazaki et al. (2014) で仮定している一様放射モデルとは、そもそも一致しない。

さらに、他の5つの天体について、すでに報告されている X 線スペクトルの形状をもとに、同様の広帯域スペクトルの再評価を行ったところ、Yamazaki et al. (2014) のモデルで説明できる3例と、Vela Jr. と同様にモデルから逸脱する2例 (Vela Jr. を含めて3例) に分かれることがわかった。これは Yamazaki et al. (2014) で仮定されている「一様放射」か「シンクロトロン放射」が満たされていないことを強く示唆する結果である。そこで、本研究では、特に一様放射モデルから逸脱する3例について、X 線画像によるフィラメント形状についての先行研究を調べ、いずれも衝撃波上流にあたるフィラメント幅が、自由膨張で想定されるより有意に狭いという共通の傾向を示していることを指摘している。これは星周物質などによる圧縮・減速が、放射領域の非一様性を引き起こしており、この結果、複数の rolloff 形状をもつスペクトルが広帯域で重なって観測されていることを示唆する結果である。すなわち、このような多様なスペクトルの重ね合わせの結果、見かけの rolloff が弱められるか、あるいは下に凸のスペクトルを作り出していると考えられる。

これは、本研究の慎重なデータ解析から導き出された、新しい知見であり、たとえ若い自由膨張期の超新星残骸であっても、粒子加速機構の空間構造を考慮すべきことを明らかにした重要な成果である。