

超新星残骸において陽子起源ガンマ線の分離測定に初めて成功 ～画期的な新手法で 100 年の懸案「宇宙線の起源」解明に大きな前進～

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院理学研究科の福井 康雄 名誉教授らの研究グループは、国立天文台・アデレード大学（オーストラリア）との共同研究で、超新星^{注1)} 残骸において「宇宙線^{注2)}」の陽子・電子成分の分離に世界で初めて成功しました。

本研究は、「ガンマ線^{注3)} 望遠鏡 H.E.S.S.」の最新成果と星間ガスの解析結果とを融合し、独自の新しい解析手法を適用したものです。本研究によって超新星残骸 RX J1713.7-3946（以後 RXJ1713）において、「宇宙線」陽子によるガンマ線の強度が70%を占めることが明らかになり、未解明であった陽子起源ガンマ線が初めて導かれました。この成果は、宇宙線の超新星残骸による加速を決定づけたものであり、「宇宙線の起源解明」における画期的な一歩です。

宇宙において最高エネルギーを持つ粒子「宇宙線」は1912年に発見されて以来、その起源が大きな謎でした。ほぼ光速で飛び交う「宇宙線」は、銀河系内では超新星爆発にともなって加速されるという説が有力です。最近のガンマ線観測の進展によって多くの超新星残骸でガンマ線が発生していることが分かりました。ガンマ線が「宇宙線」主成分の陽子から発生していれば、「宇宙線」の超新星起源が証明されたこととなります。しかし、ガンマ線は陽子の100分の1存在する電子によってもつくられるため、陽子起源と電子起源のどちらが優勢なのか、2つの寄与の割合を測る必要がありますが、これは未解決でした。本成果によって、「宇宙線」の主成分である陽子成分を起源とするガンマ線の動かぬ証拠が得られ、銀河宇宙線が超新星爆発でつくられていることが決定的になりました。

本研究成果は、2021年7月9日付天文学術雑誌「アストロフィジカルジャーナル」誌に掲載されました。

【ポイント】

- ・宇宙線の主成分である陽子が、超新星残骸 RXJ1713 において加速されているという確証が初めて得られた。
- ・この成果は、最新のガンマ線観測と星間陽子の精密定量を融合した新たな解析手法を用いて、陽子成分と電子成分を分離したことにより可能となった。
- ・今後、建設中のガンマ線望遠鏡 CTA（チェレンコフ望遠鏡アレイ）によってさらに多くの超新星残骸にこの手法は適用され、宇宙線起源の研究が大きく前進すると期待される。

【研究背景と内容】

■ ガンマ線の発生のしくみ

2002 年、ガンマ線による高分解能観測が本格的になり、ガンマ線で最も明るい超新星残骸 RXJ1713 が宇宙線源の最も有力な候補として注目されました。ガンマ線は陽子起源または電子起源の 2 つの過程でつくられます。陽子起源では、星間陽子が宇宙線陽子と衝突・反応してガンマ線をつくり出します（図 1 左）。一方、電子起源では宇宙線電子がエネルギーの低い光子と反応してガンマ線をつくり出します（図 1 右）。もし RXJ1713 の陽子起源が立証できれば、宇宙線の起源が超新星爆発にあることの動かぬ証拠となります。

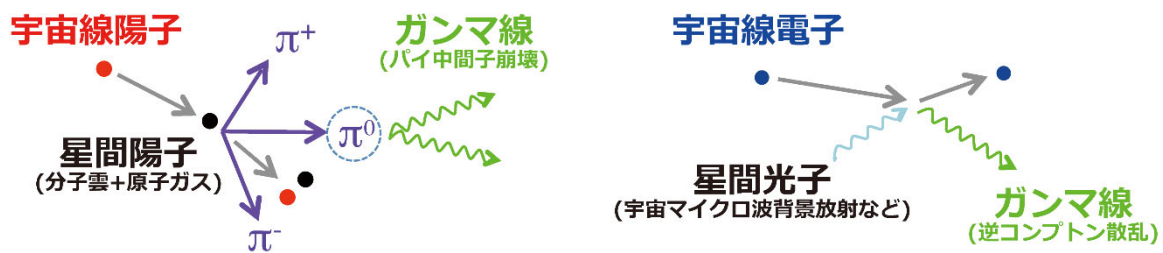


図 1：宇宙線陽子・電子によるガンマ線放射機構の模式図。

■ 本研究の手法

本研究ではまず、ガンマ線強度が星間陽子量と共に増加することを確認、陽子起源の存在を確認しました。さらに、宇宙線電子量の増加によってもガンマ線強度が増加することを確認したのです。そこで研究チームは、ガンマ線が 2 つの起源を合成してつくられているとのスキームによってガンマ線の観測データを解析しました。そのため全ガンマ線強度を陽子起源と電子起源の 2 つのガンマ線の和として表し、3 つの独立な観測量が統一的に理解できることを導いたのです（図 2）。この手法は本研究で初めて創案されたものです。その結果、陽子起源ガンマ線と電子起源ガンマ線がそれぞれ全ガンマ線の 70%と 30%を占めることが導かれました（図 3）。2 つの起源が分離されたのは初めてです。これによって、星間陽子の濃い場所で陽子起源が卓越し、薄い場所で電子起源が増加する様子も可視化されて 2 つの機構が共に働いていることが確実にあり、先行する理論研究の予想の正しさも支持されました。

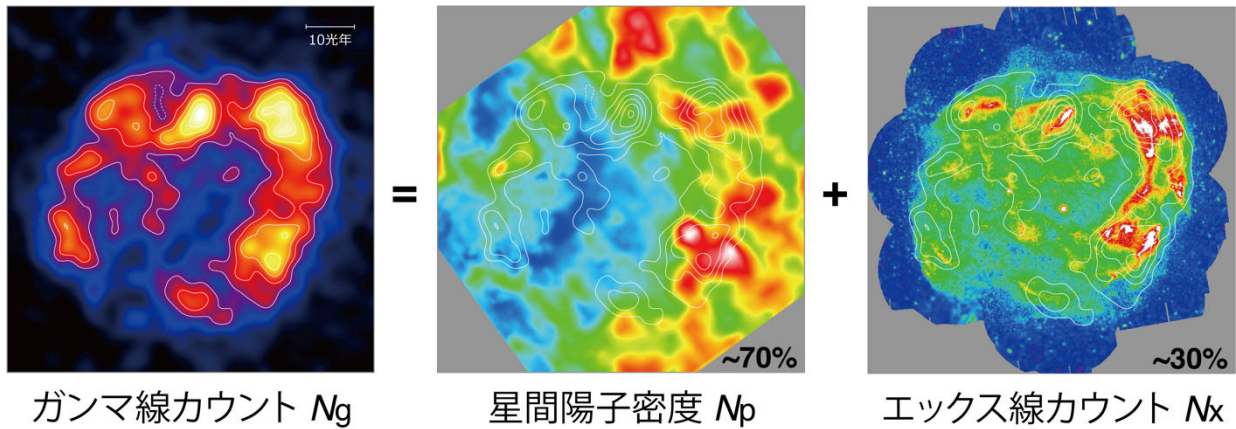


図 2：超新星残骸 RXJ1713 の（左）ガンマ線、（中）星間陽子、（右）エックス線画像。

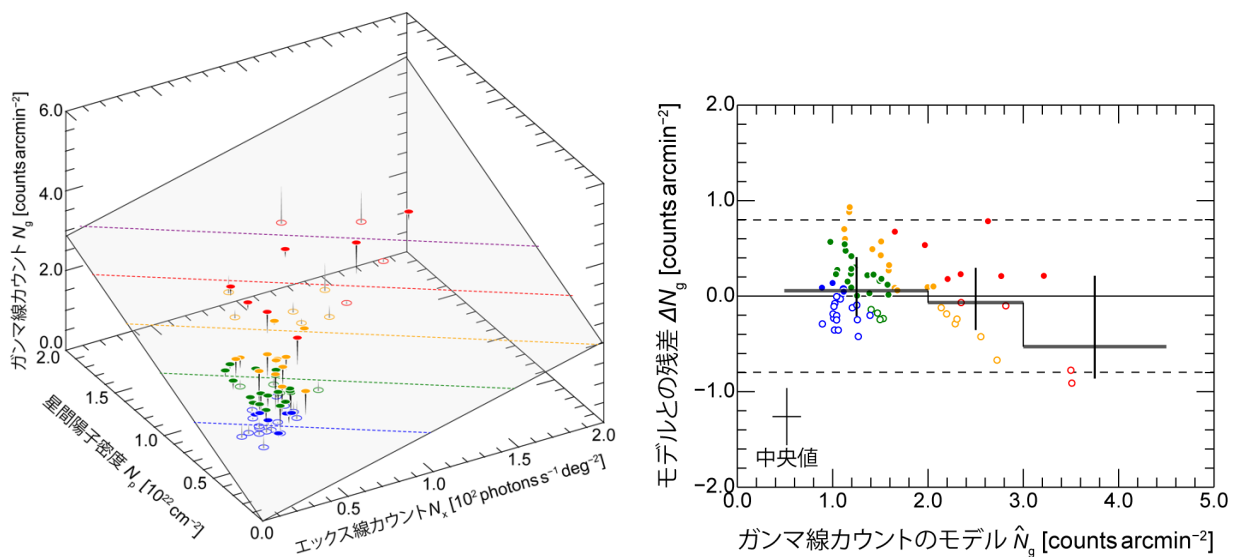


図 3：（左）ガンマ線 N_g 、星間陽子 N_p 、エックス線 N_x の各観測点を、 $N_g = a N_p + b N_x$ の平面でモデル化した結果。塗りつぶし及び白抜きの楕円で示した各観測点は、それぞれモデル平面上側と下側にあることを意味する。青、緑、黄、赤の色分けは、それぞれ $N_g < 1.2$, $1.2-1.7$, $1.7-2.2$, $2.2 < N_g$ の観測点を示す（単位は $\text{counts arcmin}^{-2}$ ）。点線はガンマ線カウントのモデル値 \hat{N}_g を示す（青: 1.0, 緑: 1.5, 黄: 2.0, 赤: 2.5, 紫: 3.0, 単位は $\text{counts arcmin}^{-2}$ ）。（右）ガンマ線カウントのモデル値 \hat{N}_g と、モデルとの残差。

■ 本解析の特徴

本研究の特徴は、星間陽子と宇宙線電子の情報を組み合わせてガンマ線強度を定量するという新たなスキームにあります。ガンマ線と星間陽子との相関がよいことは 2003 年と 2012 年に福井らが発表し、陽子起源の可能性を指摘していました。また、電子成分もガンマ線と正の相関を示すことから、電子起源の可能性も指摘されていました（例 Tanaka et al. 2008）。今回の解析は、電子成分を宇宙線電子の放つエックス線強度によって表現することにより、3 つの独立な観測結果を融合したスキームを創案し、高い精度でガンマ線強度が合成できることを実証したものです。

この手法が適用できた背景には、過去 10 余年にわたって蓄積された H.E.S.S. のガン

マ線データの分解能が向上し、2012年よりもほぼ3倍高い分解能で解析が可能になったことがあげられます。また、星間陽子を精密に定量する手法は、2003年以来名古屋大学グループが先行的に開拓してきたもので、本研究の特長となっています。宇宙線陽子と衝突する全星間陽子は、水素原子と水素分子の和です。水素原子は波長 21 cm の電波で測定され、水素分子は比例関係にある一酸化炭素分子の波長 2.6 mm の電波で測定されます。後者は南米チリに設置した名古屋大学の電波望遠鏡「なんてん」によって得られており、水素原子はオーストラリアの電波望遠鏡で観測されたものです。両者を総合して精度良く全陽子を定量したことは、他の追従を許さない特色であり、もうひとつの鍵となりました。従来のガンマ線解析にも陽子起源を示唆するものも他にありましたが、いずれもガンマ線と星間陽子との関係を十分な分解能で立証しておらず、陽子起源の確証とは言えません。

■ 今後の発展

本研究は、陽子起源ガンマ線の確証を得た画期的な成果です。これは先行研究と一線を画すものであり、今後は「宇宙線の起源」＝「超新星」という理解が様々な銀河系内外の高エネルギー現象の研究に広く波及することが予想されます。また、宇宙線陽子と電子の加速機構の研究はより精密化され、両者の空間分布の理論的理解が進展すると見られます。さらに現在、南北両半球で建設が進んでいる次世代ガンマ線望遠鏡 CTA によって、数年後には新たな高感度ガンマ線観測が実現し、同様の手法が数十個以上の超新星残骸に適用されると予想されます。これによって宇宙線起源の研究は確固とした観測的基盤のうえに展開され、発見以来 100 年余を経て宇宙線研究の新時代が開かれるでしょう。他の波長帯の新装置やニュートリノなどの高エネルギー現象の研究とのシナジーにも期待が寄せられています。

【成果の意義】

百年来の謎であった「宇宙線陽子の起源」が超新星残骸にあることに、最終的な決着をつけました。

【用語説明】

注 1) 超新星：

大質量星の進化の最後に起こる大爆発。爆発の後に残るのが超新星残骸である。爆発の際、毎秒 1000 km から 10000 km で爆風が飛び散る。この爆風の作用でエネルギーの高い陽子などが加速され、宇宙線になるという説が有力である。

注 2) 宇宙線：

宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギー粒子。宇宙線の主成分は陽子、その 100 分の 1 くらいが電子であり、さらに、微量のヘリウム他の粒子（原子核）からなる。太陽の表面のガスは 6000 度であるが、宇宙線のエネルギーは太陽表面の粒子の 6 桁以上（100 万電子ボルト）という大きなものである。この研究で扱っている宇宙線は、典型的に 1 兆（ 10^{12} ）電子ボルトのエネルギーを持つ。

注 3) ガンマ線：

電磁波の一種であり、最も大きなエネルギーを持つ。電磁波は光子という粒でもあり、宇宙線が色々と粒子と反応することによって発生する。

【論文情報】

雑誌名：The Astrophysical Journal（アストロフィジカルジャーナル）

論文タイトル：Pursuing the Origin of the Gamma Rays in RX J1713.7-3946
Quantifying the Hadronic and Leptonic Components

著者：福井康雄¹，佐野栄俊²，山根悠望子¹，早川貴敬¹，井上剛志¹，立原研悟¹，Gavin Rowell³，Sabrina Einecke³

¹名古屋大学大学院理学研究科

²国立天文台

³アデレード大学

DOI：10.3847/1538-4357/abff4a

URL：<https://doi.org/10.3847/1538-4357/abff4a>