

論文内容の要旨

論文題目 *Fermi*-LAT Study of Gamma-ray Emission
Associated with Galactic Supernova Remnants

(フェルミ衛星 LAT による超新星残骸からのガンマ線放射の研究)

氏名 勝田 隼一郎

SNR は、その衝撃波中で粒子を高エネルギーにまで加速しており、宇宙線加速源の最有力候補と考えられている。近年、SNR のシェルから TeV ガンマ線が検出され、SNR の衝撃波で 100 TeV にまで加速された高エネルギー粒子の存在が確認された。その一方で、ガンマ線の放射機構の特定はいまだにできていない。これは、GeV ガンマ線の観測情報が乏しかったことが一因である。2008 年 6 月に打ち上げられた *Fermi* 衛星搭載の LAT 検出器は、20 MeV–300 GeV の広帯域で従来の 30 倍以上の感度を持ち、 < 0.7 度の角度分解能 (> 1 GeV) と広視野 (全天の約 20%) を備えた望遠鏡であり、この帯域での SNR 観測の感度を飛躍的に向上させた。

LAT 検出器の SNR 研究チームは、広がったガンマ線源の解析を精力的に進め、打ち上げ後 2 年間で明るい 9 つの SNR からのガンマ線放射の観測に成功し、GeV ガンマ線帯域においてイメージとスペクトルの解析をはじめて可能とした。SNR は銀河面付近に存在しているため、GeV ガンマ線帯域で非常に強く放射する銀河面からのバックグラウンド放射の影響を強く受ける。LAT の解析では、このバックグラウンド放射をモデル化し、それを差し引くことで SNR からの放射を評価している。そのため、このモデルの不定性が SNR の検出感度やスペクトルの形に与える影響を評価することが必須である。さらに、観測天体の数を増やし、GeV ガンマ線を放射する SNR の系統的な研究を行うために、従来のような明るい SNR だけではなく、暗い SNR についても解析を進める必要があり、より正確なモデルの構築が必要である。本研究においては、観測可能な SNR の感度を向上させるために、バックグラウンドの不定性などの系統誤差について評価を行い、正確なエネルギースペクトルの形状と空間的な構造を得るために必要な解析手法の研究を行った。その結果、現時点では、スペクトル形状の不定性が < 1 GeV で $\sim 4\%$ 、 > 1 GeV で $\sim 10\%$ であり、空間構造の不定性が 6% 程度であることがわかった。こうした本研究で得られた知

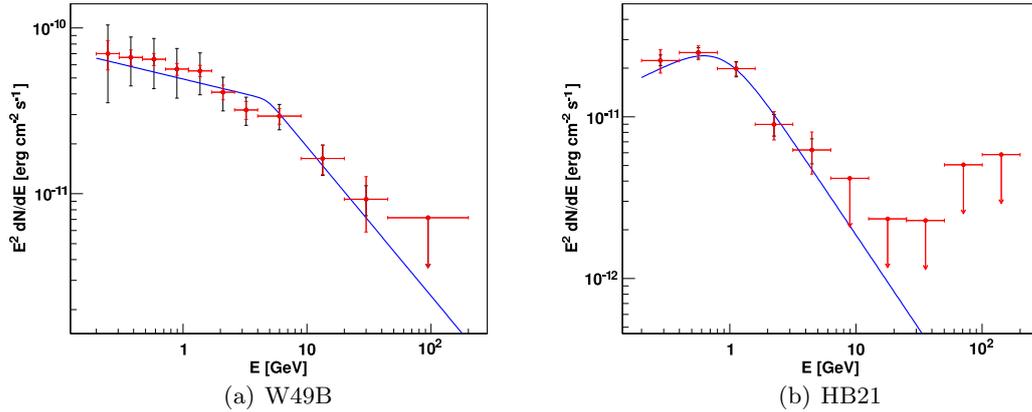


図 1: *Fermi* LAT 検出器による、SNR のガンマ線スペクトル。

見は、現在フェルミ衛星チームの解析において標準的に用いられている。

これまでに観測された SNR は、若い SNR である Cassiopeia A を除いて分子雲と相互作用しており、電波でも明るいという共通の特徴がある。さらに、LAT で空間的な広がりのある 4 つの SNR W51C, W44, IC443, W28 は全て中年 (数万年) の SNR であり、ガンマ線の数 GeV にブレイクを持つという共通点がある。この観測事実は、これらの SNR では粒子の加速過程とガンマ線の放射過程が共通であることを示唆している。実際、スペクトル解析から、放射機構は全ての SNR で、密度の高いガスに加速粒子が衝突することで放射される π^0 崩壊放射か制動放射で説明できることがわかっている。さらに LAT によって、W51C は非常に高い GeV ガンマ線光度 ($\sim 1 \times 10^{36}$ erg s $^{-1}$) を持つことが明らかになっている。このガンマ線光度は、どの SNR の TeV ガンマ線光度に比べても 10 倍以上大きい。これは W51C では、これまで TeV ガンマ線光度を説明するためのモデルの場合よりも、効率よくガンマ線が発生していることを意味する。

このような効率的な放射を説明するため、最近、新たなガンマ線放射モデル (“crushed cloud” モデル) が提唱された。従来、SNR からのガンマ線は、衝撃波中で加速された陽子とその系から逃げ、周囲の分子雲と衝突し生じた π^0 中間子の崩壊ガンマ線によって説明するモデルが主流であった。一方このモデルは、分子雲・原子雲中に駆動された低速衝撃波 ($50 \text{ km s}^{-1} < v_s < 200 \text{ km s}^{-1}$) で加速された宇宙線が、衝撃波下流におけるガスの放射冷却の結果として、ガスとともに断熱圧縮されることに着目している。宇宙線、磁場およびガスが超新星爆風の圧力により同時に強く圧縮される結果、電波とガンマ線の放射率が大幅に増大し、観測されるガンマ線光度を説明可能になる。実際、LAT で観測された SNR W44 に適用した場合、ガス中にもともと存在していた銀河宇宙線を衝撃波によって再加速するという考え方だけで、観測された電波スペクトル・光度とガンマ線光度を同時に説明できている。

これまでの LAT の観測から、SNR の年齢と分子雲との相互作用が、ガンマ線光度に強い影響を持つことが示唆される。この影響を理解するため、我々はこれまで観測された SNR とは異なる特徴を持つ 3 つの SNR、比較的若くガンマ線光度が高い W49B、分子雲と相互作用して光度の低い HB21、分子雲との相互作用のない S147、の観測を行った。

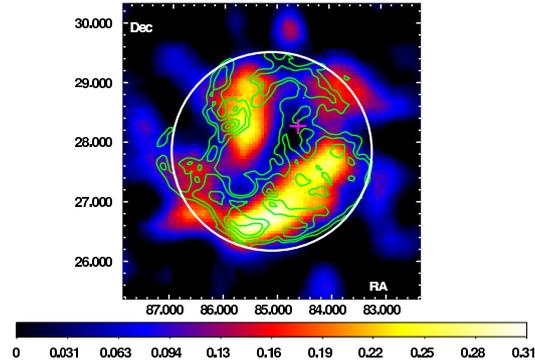


図 2: SNR S147 付近の LAT カウントマップ。緑のコントアは $H\alpha$ の放射を示す。

我々は LAT を用いて、W49B 領域から放射されるガンマ線を検出した。さらにスペクトル解析によって、そのエネルギースペクトルが ~ 5 GeV でブレイクを持つことがわかった (図 1(a))。W49B は、その視直径が $\sim 4'$ と小さいため、LAT では空間的に分解できない。そのため観測されたガンマ線が、SNR に付随するパルサーから放射されている可能性がある。我々は、ガンマ線スペクトルの形状や X 線光度の上限値を評価することで、観測されたガンマ線天体がパルサーである可能性は非常に低いことを確認した。観測されたガンマ線光度は $0.2\text{--}200$ GeV で $1.5 \times 10^{36} (D/8 \text{ kpc})^2 \text{ erg s}^{-1}$ となり、これまで観測された SNR で最も高いガンマ線光度を持つことがわかった。

我々は HB21 領域からガンマ線放射を検出し、そのエネルギースペクトルは ~ 1 GeV でブレイクを持つことがわかった (図 1(b))。HB21 領域のガンマ線は電波のシェルと同程度のサイズを持つことがわかり、その光度は $2.2 \times 10^{34} (D/1.7 \text{ kpc})^2 \text{ erg s}^{-1}$ だった。

SNR S147 は、分子雲との相互作用のない中年の SNR で、そのシェル上に $H\alpha$ のフィラメントが観測されている。S147 は、視直径が $\sim 3^\circ$ で実直径が ~ 70 pc であり、銀河系で最もサイズの大きな SNR の一つである。我々はこの SNR の領域から、S147 と同程度のサイズの広がりを持つガンマ線放射の検出した。これは、中年の SNR であっても分子雲相互作用がガンマ線放射の必須条件でないことを意味する。スペクトル解析により、その形状がベキ関数で表されることがわかり、光度は $1.1 \times 10^{34} (D/1.2 \text{ kpc})^2 \text{ erg s}^{-1}$ だった。

今回の LAT 観測から、我々は 3 つの SNR からガンマ線を初めて検出し、LAT で観測された SNR の総数を 30% 増やした。さらに、この論文で用いた暗い天体への解析方法を応用することで、SNR の観測数をさらに増やすことが可能になる。

我々は、観測した 3 つの SNR のガンマ線と電波のスペクトルを組み合わせることで、多波長における放射機構の計算を行った。ガンマ線の計算では、陽子起源の π^0 の崩壊ガンマ線放射、電子からの制動放射、逆コンプトン散乱による放射、を考慮した。我々は、SNR が様々な物理量をとる場合について検討し、上で述べた 3 つの放射機構がガンマ線の主な放射成分である場合について、それぞれ計算を行なった。この結果、W49B では、その非常に高いガンマ線光度の説明が難しいことから、HB21 や S147 ではガンマ線と電波のスペクトルを同時に説明できないことなどから、観測されたガンマ線の主成分が逆コンプトン放射である可能性が低いことを確認した。さらに、この放射機構の計算によって、

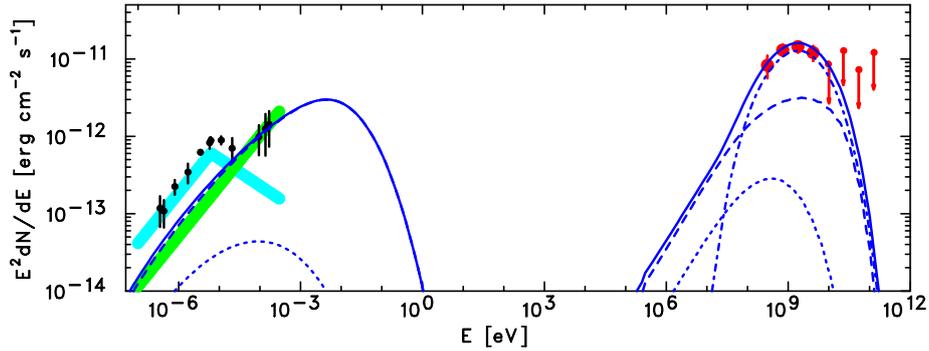


図 3: SNR S147 の多波長エネルギースペクトルと “crushed cloud” モデルによって計算されたエネルギースペクトル (青線)。赤丸は LAT 観測データ、黒丸は電波データ。緑線、青線は、それぞれ電波のフィラメント成分、diffuse 成分を示す。

W49B のシェルに存在する陽子 / 電子のエネルギー密度が $\sim 10^4\text{--}10^5 \text{ eV cm}^{-3}$ と計算された。この値は若い (~ 300 年) SNR である Cassiopeia A を除いて、これまでに LAT で観測されてきた SNR よりはるかに高い値である (e.g., W44: $\sim 100 \text{ eV cm}^{-3}$)。

S147 は分子雲と相互作用していないので、従来のガンマ線放射モデルでは観測されたガンマ線を説明できない。一方で “crushed cloud” モデルでは、ガンマ線は、圧縮されたガスによって形成されるフィラメントからの π^0 崩壊放射として説明される。

S147 のガンマ線のカウントマップは、 $H\alpha$ のフィラメントとの空間的な相関を示唆している (図 2)。さらに、S147 の空間的な形状が円形である場合と $H\alpha$ の形を持つ場合で LAT データのフィットを行い、 $H\alpha$ の形状の方が高い likelihood の値を持つことがわかった。また、SNR を 6×6 の領域に分割して、それぞれの領域でのフラックスを求め比較することで、両者に相関があるという示唆を得た。この解析から、ガンマ線放射が $H\alpha$ のフィラメントから放射されている示唆が得られた。

我々は、“crushed cloud” モデルを用いて多波長エネルギースペクトル解析を行い、密度 $n_0 = 3 \text{ cm}^{-3}$ 、磁場 $B_0 = 3.5 \mu\text{G}$ 、原子雲充填率 (衝撃波を受ける前の原子雲体積/SNR 体積) $f = 0.6\%$ としたときに、モデルが電波とガンマ線のデータを同時に説明できることを確認した。密度と磁場は原子雲としては妥当な値である。この事は、宇宙線の衝突ターゲットとしての分子雲が存在しなくても、フィラメント形成を通してガンマ線強度を容易に説明できることを示し、モデルを裏付ける結果といえる。モデルで得られたスペクトルは、ガス中に元々存在する宇宙線が再加速された高エネルギー粒子からの放射であると仮定して計算している。このことから、中年の SNR S147 では、宇宙線の再加速が行われている、という示唆が得られた。

さらに、W49B と HB21 に対しても “crushed cloud” モデルを適用した。その結果、W49B の高いガンマ線光度を説明するためには、S147 で考えられたような宇宙線の再加速だけでは十分でないことがわかった。これは ~ 2000 年と比較的若い W49 においては、宇宙線の再加速だけでなく、星間ガスを高エネルギー宇宙線にまで加速するプロセスが共存する事を示唆している。この粒子加速の示唆は、多波長スペクトルの計算で得られた非常に高い粒子エネルギー密度とも整合する。また HB21 の光度は、再加速のモデルのみで矛盾なく説明できることがわかった。