

# フェルミ衛星がとらえた近傍銀河からのガンマ線

内山 泰伸

〈SLAC National Accelerator Laboratory 2575 Sand Hill Road, M/S 29, Menlo Park, CA 94025, USA〉

e-mail: uchiyama@slac.stanford.edu

## on Behalf of the Fermi LAT Collaboration

フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡（フェルミ衛星）による最初の1年間のガンマ線観測により、大マゼラン雲のガンマ線放射の空間分布が初めて明らかになりました。さらに二つの近傍のスターバースト銀河（M82, NGC 253）からガンマ線が発見されるなど、近傍銀河における高エネルギー現象の研究に新たな地平が拓かれました。大マゼラン雲のガンマ線分布は、電離ガス分布と最も強い相関を示し、大マゼラン雲内の宇宙線が星形成領域に集中していることがわかりました。またスターバースト銀河からのガンマ線の検出は、爆発的な星形成の結果として宇宙線の密度が局所的に大幅に増大していることを意味しています。これらフェルミ衛星の観測結果は、銀河系宇宙線が超新星爆発の衝撃波によって作られているとする長年の仮説を支持する新たな根拠となりそうです。

### 1. はじめに

私たちの住む天の川銀河には、天然の「加速器」が存在し、そこで宇宙線と呼ばれる高エネルギー荷電粒子が作られています。宇宙線は電荷をもつため星間磁場によって銀河系内に閉じ込められ、星間空間を満たし、太陽風に逆らって地球にも降り注ぎます。天の川銀河にたまっている宇宙線（銀河系宇宙線）の起源として有力視されているのは、超新星の爆風です。超新星が星間空間に駆動する衝撃波において、フェルミ加速と呼ばれる過程によって粒子が超高エネルギーに加速されると考えられています。超新星の星間衝撃波こそが銀河系宇宙線を作り出す天然の加速器である、という長年の仮説を検証する新たな方法を提示するのが、本記事の主眼です。

ガンマ線<sup>\*1</sup>を見ることができ「目」をもって空を見上げれば、天の川が煌々と輝いています。

銀河系宇宙線の主成分は陽子です。宇宙線陽子と星間ガス中の原子核との衝突で生成された中性パイ中間子がガンマ線に崩壊し（ $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ）、銀河面上の拡散ガンマ線となっているのです。また宇宙線の電子成分による制動放射や逆コンプトン散乱も銀河面の拡散ガンマ線放射に寄与します。このようなガンマ線は伝播の途中で吸収されるようなこともなく、そのエネルギー分布や空間分布を測定することによって、銀河系宇宙線を調べることができます。（本号の姉妹記事に詳しい解説がありますので、併せてご覧ください。）

天の川銀河と同様に、他の銀河でも超新星残骸などによって宇宙線が作られ、その銀河内に閉じ込められ、星間ガスとの衝突によりガンマ線を放射しているに違いありません。実際に、コンプトン・ガンマ線衛星搭載のEGRET検出器によって、近傍の大マゼラン雲からガンマ線が発見されました<sup>1)</sup>。しかし、EGRET検出器では空間的に分

<sup>\*1</sup> 本稿では、 $10^8$ – $10^{11}$ 電子ボルト（eV）程度のエネルギーをもつガンマ線を単に「ガンマ線」と呼び、それ以上の高エネルギーガンマ線を「超高エネルギーガンマ線」と定義します。

解することはできず、ガンマ線スペクトルの測定も不十分でした。また、観測例は大マゼラン雲の1例のみに限られました。コンプトン衛星の後継機として2008年6月に打ち上げられたフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡<sup>2)</sup>の主検出器 Large Area Telescope (LAT) は、EGRET 検出器をはるかに上回る性能で宇宙ガンマ線を観測することができます。そして期待に違わず、最初の1年間の観測で早くも近傍銀河のガンマ線放射について新発見がもたらされています。本稿ではフェルミ衛星による大マゼラン雲<sup>3)</sup>、そして二つのスターバースト銀河 M82, NGC 253<sup>4)</sup>の観測結果を紹介し

## 2. 大マゼラン雲のガンマ線放射分布が明らかに

天の川銀河の伴銀河であり有史以前から知られていた大マゼラン雲<sup>5)</sup>は、宇宙線とガンマ線放射

の関係を研究するうえで格好の条件を備える近傍銀河です。地球からの距離は約50キロパーセク(1パーセクは3.26光年)と極めて近く、視直径は約8度もあり、LAT 検出器の空間分解能(1ギガ電子ボルトのガンマ線では約0.6度、10ギガ電子ボルトでは約0.1度)によって空間構造を調べることができます。視線方向が銀河円盤の法線方向に近いこと(傾斜角20-35度)もガンマ線分布を理解するうえでとても有利な点です。また星形成の活動も認められ、多数の超新星残骸が発見されており、ガンマ線分布との比較から宇宙線の起源が超新星爆発の衝撃波であるという仮説を検証する材料にもなりそうです。

図1左に、約11カ月間かけて得られたLAT 検出器の観測データをもとに作成された、大マゼラン雲のガンマ線分布を示します。天の川銀河以外で銀河のガンマ線分布が明らかになったのは、初めてのことです。興味深いことに、ガンマ線放射

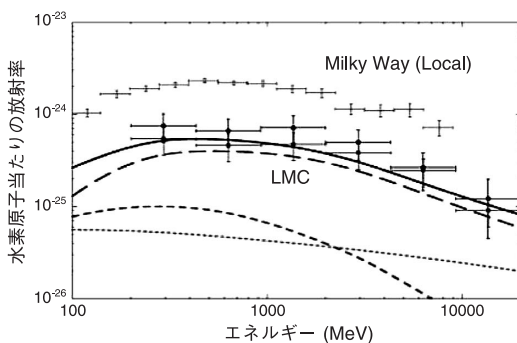
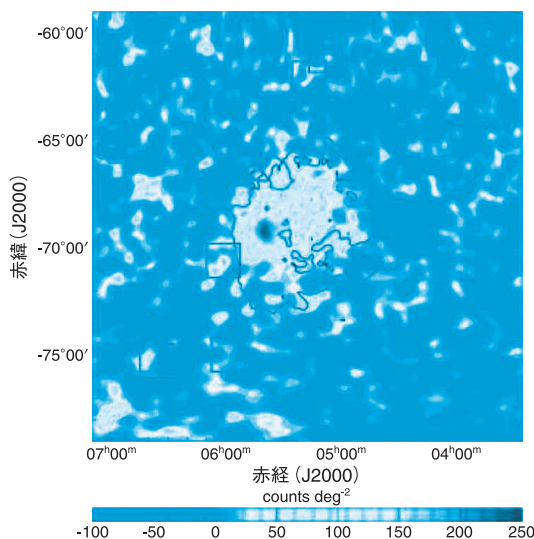


図1 (左) フェルミ衛星 LAT 検出器によって得られた大マゼラン雲のガンマ線分布 (0.2-20 ギガ電子ボルト)。大マゼラン雲外の点源や銀河面拡散ガンマ線放射などのバックグラウンドは差し引いてあります。大マゼラン雲の大きさを示すため中性水素の等高線 ( $1 \times 10^{21} \text{ H cm}^{-2}$ ) が描かれています。(右) LAT 検出器により得られた大マゼラン雲のガンマ線スペクトルと放射モデル曲線。曲線でフィットされている2種類のデータ点が、二つの異なる方法で得られた大マゼラン雲のガンマ線スペクトル。比較のため示されているのは銀河面拡散ガンマ線放射のスペクトルです。長破線はパイ中間子崩壊によるガンマ線、破線は制動放射、点線は逆コンプトン散乱によるガンマ線です。

が最も強いスポットは、タランチュラ星雲という、局所銀河群において最も活発な星形成領域に一致しています。ガンマ線分布を、中性水素原子ガス・分子ガス・電離水素ガスの分布と比較した結果、ガンマ線は電離水素ガスと最もよく相関していることが判明しました。大マゼラン雲の星間ガスはほとんど中性水素原子の形態で存在しており、もし宇宙線が大マゼラン雲内に一様に分布していれば、中性水素ガスとの相関が強いはずで、約1パーセントの質量を担うに過ぎない電離ガスとの相関が強いのはたいへん面白いことです。電離ガスは、活発な星形成活動によって生まれた大質量星からの紫外線によって電離されています。これらの星は短命で超新星爆発を起こします。ガンマ線分布と電離ガス分布の相関は、宇宙線の密度が超新星の発生率を強く反映していることを示唆しています。

LAT 検出器で測定された大マゼラン雲のガンマ線スペクトルを図1右に示し、太陽系近傍の銀河系宇宙線によるガンマ線放射と比較しています。スペクトルの形に大きな違いは見られませんが、大マゼラン雲では宇宙線の平均密度が、銀河系宇宙線の20-30パーセント程度しかないことがわかります。これは星形成率が天の川銀河の1/4程度であること<sup>6)</sup>を反映していると考えられます。

### 3. スターバースト銀河からガンマ線を発見

宇宙には爆発的な勢いで星形成が行われている銀河、スターバースト銀河が存在しています。星形成と同時に超新星爆発も次々と発生しているため、宇宙線の密度も天の川銀河に比べて高くなっていると期待されます。さらにガスが豊富に存在しているので、宇宙線陽子とガスの衝突による中性パイ中間子の生成・崩壊のガンマ線放射が、通常の銀河よりも強いはず<sup>7)</sup>です。コンプトン衛星のEGRET 検出器では有意なガンマ線検出に至

りませんでした。フェルミ衛星のLAT 検出器は二つのスターバースト銀河(M82, NGC 253)からガンマ線を発見しました。どちらの銀河も近傍の有名なスターバースト銀河で、太陽系から3-4メガパーセクの距離にあります。爆発的な星形成活動は銀河の中心部分200パーセク程度のコンパクトな領域で見られ、そこでの星形成率は天の川銀河全体に匹敵しています。平均ガス密度は約 $100 \text{ cm}^{-3}$  (M82)あるいは $600 \text{ cm}^{-3}$  (NGC 253)と高く、さらにシンクロトロン放射による電波強度も大きいので宇宙線密度も高いと推定されています。どちらの銀河でも銀河中心に鎮座していると考えられる大質量ブラックホールに活動銀河核の性質は見られません。

爆発的な星形成の領域から銀河外部に向けて「銀河風」と呼ばれる大規模なガスの流出現象が見られます。ガスとともに宇宙線も流れ出し、銀河円盤を囲む巨大な宇宙線の「ハロー」を作っています<sup>8)</sup>。しかし、LAT 検出器がM82, NGC 253から発見したガンマ線源は「点源状」で、銀河の中心部のコンパクトな領域からの放射と考えてよさそうです。フェルミ衛星によるガンマ線放射の発見と同時期に、地上の大気チェレンコフ望遠鏡によって、これらの銀河から超高エネルギーガンマ線が発見されました<sup>9), 10)</sup>。特にH.E.S.S.望遠鏡がとらえたNGC 253の超高エネルギーガンマ線は、放射領域が銀河よりもかなり小さく、中心の爆発的な星形成領域からのガンマ線であることを明確に示しています。

両スターバースト銀河のガンマ線スペクトルを図2に示します。フェルミ衛星LAT 検出器と大気チェレンコフ望遠鏡の組み合わせによって、広範囲のエネルギー帯域にまたがるガンマ線スペクトルが得られています。測定されたガンマ線放射は、理論的に予想されていた強度とおおむね一致しています。今後のフェルミ衛星による観測で、スペクトル測定の誤差を小さくすれば、ガンマ線スペクトルの形状と理論モデルとの照合によっ

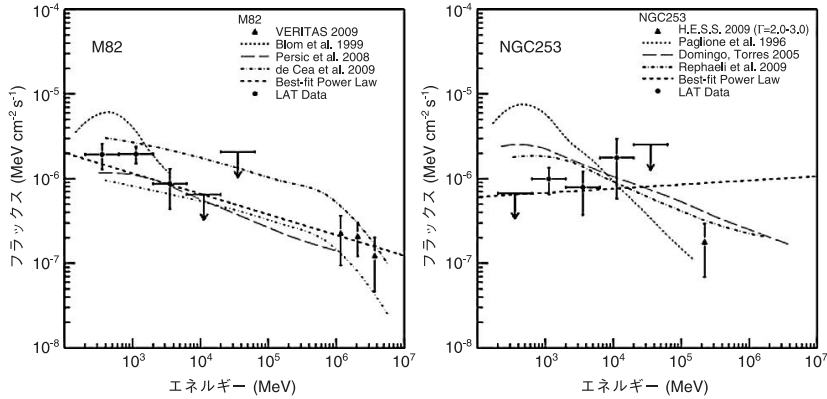


図2 スターバースト銀河 M82, NGC 253 のガンマ線スペクトル. フェルミ衛星 LAT 検出器と大気チェレンコフ望遠鏡を組み合わせることで, 広範囲のエネルギー帯域がカバーされています. ガンマ線の発見以前に予想されていた, いくつかのスペクトル・モデルも描かれています.

て, 宇宙線の加速や伝播を研究することができるでしょう.

天の川銀河と大マゼラン雲を除けば, 今までは銀河系外からのガンマ線放射は, すべて活動銀河核や大質量星の重力崩壊によって射出される相対論的ジェットに起因するものでした. 一方, 新たに発見されたスターバースト銀河からのガンマ線は, 星形成領域で作られた宇宙線によるものと考えられ, 銀河系外のガンマ線天体の研究の歴史に新たなページが開かれたと言えます.

#### 4. 銀河のガンマ線強度と超新星発生率との関係

フェルミ衛星による大マゼラン雲とスターバースト銀河の観測は, どちらもガンマ線強度が星形成活動と密接に関係していることを示しています. 大質量星の星風や超新星放出物の運動エネルギーが, 宇宙線として非熱的エネルギーに転化し, 周りの豊富なガスとの衝突を通して, ガンマ線になると考えられます. 特に超新星爆発の衝撃波は, 銀河系宇宙線の起源として最有力であり, これらの近傍銀河の宇宙線も超新星起源であると考えてよさそうです. 図3では, 大マゼラン雲, 天の川銀河, 二つのスターバースト銀河のガンマ線光度を, (超新星発生率)×(全ガス質量) に対し

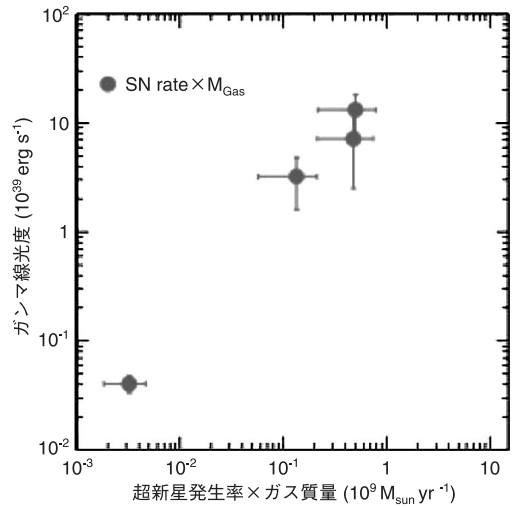


図3 (超新星爆発の発生率)×(銀河ガス質量) とガンマ線光度の関係. データ点は, ガンマ線光度の低いほうから, 大マゼラン雲, 天の川銀河, スターバースト銀河です.

てプロットしてあります. 両者に比例関係が成立することが認められ, ガンマ線放射に関する上記の解釈を支持しています. しかしこの少ないサンプル数ではまだ結論づけられません. また大マゼラン雲, スターバースト銀河では, 宇宙線は非一様に分布し, 宇宙線密度とガス密度の相関もあるので, ガンマ線光度が (超新星発生率)×(全ガス質量) でスケールできると期待するのは単純すぎ

るかもしれません。今後、宇宙線加速源の分布と銀河内での宇宙線伝播のモデルを構築し、多波長観測と比較するなどの研究が必要です。

フェルミ衛星の登場により、近傍銀河内の宇宙線を研究する新たな手段が得られました。近傍銀河の宇宙線は、銀河系宇宙線と同じ過程で作られているのか、宇宙線は加速源からどのように伝播しているのか、など興味深い研究課題が目の前に提示されています。フェルミ衛星 LAT 検出器は、約 2.4 ステラジアンという大きな視野をもち、3 時間ごとに全天を探査することが可能で、天空のあらゆる方向からのガンマ線を日々観測し続けています。今回紹介した観測データの質は観測時間とともに向上し、また新たな近傍銀河からのガンマ線も検出されるに違いありません。今後の地上チェレンコフ望遠鏡の観測と合わせ、近傍銀河からのガンマ線放射は重要な研究テーマとして発展することでしょう。

### 参考文献

- 1) Sreekumar P., et al., 1992, ApJ 400, L67
- 2) 釜江常好, 大杉 節, 2010, 天文月報 103, 314
- 3) Abdo A. A., et al., 2010, A&A 512, 7
- 4) Abdo A. A., et al., 2010, ApJ 709, L152
- 5) Westerlund B. E., 1997, The Magellanic Cloud (Cambridge Astrophysics)

- 6) Tammann G. A., Loeffler W., Schroeder A., 1994, ApJS 92, 487
- 7) Voelk H. J., Aharonian F. A., Breitschwerdt D., 1996, Space Sci. Rev. 75, 279
- 8) Heesen V., Beck R., Krause M., Dettmar R. J., 2009, A&A 494, 563
- 9) Acero F., et al., 2009, Science 326, 1080
- 10) VERITAS Collaboration, et al., 2009, Nature 462, 770

### Fermi-LAT Observations of Nearby Galaxies

Yasunobu UCHIYAMA

*SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Road, M/S 29, Menlo Park, CA 94025, USA*

on Behalf of the Fermi LAT Collaboration

Abstract: Observations of the Large Magellanic Cloud (LMC) and two nearby starburst galaxies, M82 and NGC 253, with the Large Area Telescope (LAT) onboard the Fermi Gamma-ray Space Telescope provide a new probe of cosmic-ray production in galaxies. The spatial distribution of gamma-ray emission in the LMC was shown to correlate with an ionized gas map, which traces massive star formation. The detections of the starburst galaxies with the LAT indicate a link between cosmic rays and supernovae. The Fermi LAT results support the idea that cosmic rays are produced in supernova remnants.