

フェルミ衛星による超新星残骸からの ガンマ線放射の研究

片桐 秀明

〈広島大学理学研究科 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: katagiri@hep01.hepl.hiroshima-u.ac.jp

内山 泰伸¹・釜江 常好²・田島 宏康³

〈SLAC 国立加速器研究所 Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Road, Menlo Park, CA 94025, U.S.A.〉

¹ e-mail: uchiyama@slac.stanford.edu ² e-mail: kamae@slac.stanford.edu ³ e-mail: htajima@slac.stanford.edu

田中 孝明

〈Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Stanford University, 382 Via Pueblo Mall, MC 4060, Stanford, CA 94305, U.S.A.〉

e-mail: Taka.Tanaka@stanford.edu

山崎 了

〈青山学院大学理工学部 〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1〉

e-mail: ryo@phys.aoyama.ac.jp

on Behalf of the Fermi LAT Collaboration

超新星残骸は銀河宇宙線の起源の有効な候補ですが、確証は得られていません。フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による超新星残骸からのギガ電子ボルト ($\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$) エネルギー帯のガンマ線観測は、宇宙線の加速・放出の過程を理解する上で突破口となることが期待されていました。2008年のフェルミ衛星打ち上げ以降、若い超新星残骸であるカシオペア A から GeV ガンマ線が初めて検出された一方、比較的古い超新星残骸である W44, W51C, IC 443 では、衝撃波を受けている分子雲から宇宙線原子核との相互作用によると考えられるガンマ線が検出されました。これらの観測で得られたスペクトル解析により、超新星残骸での宇宙線の加速および星間空間への放出過程についての新しい糸口をつかむことができました。

1. はじめに

宇宙線は、1912年にヘス (Hess) によって宇宙から到来する電離放射線として確認された高エネルギーの粒子 (主に陽子) です。宇宙線のエネル

ギースペクトルは $3 \times 10^{15} \text{ eV}$ 付近で折れ曲がっており、それ以下のものはわれわれの住む天の川銀河内で生成されていると考えられています (以下、単に宇宙線と言った場合、銀河系内の宇宙線¹⁾を指すこととします)。宇宙線の平均エネル

ギー密度は約 1 eV cm^{-3} と、星の光、銀河磁場、星間ガスのものと同程度であり、宇宙線は銀河系内においてさまざまな局面で重要な役割を果たしています。宇宙線は荷電粒子であるため銀河磁場により銀河内に長時間閉じ込められています。宇宙線のエネルギー密度を担う GeV エネルギーの粒子では 10^7 年程度で系外へ拡散していくと考えられています。銀河系宇宙線の密度を維持するには、どこかで毎秒 $3 \times 10^{40} \text{ erg}$ ほどの運動エネルギーが宇宙線に与えられる必要があります。銀河系内のどの天体が、どうやって、どのくらいの宇宙線を生成しているのか解明することは、宇宙物理学上の重要な課題となっています。

宇宙線を加速している天体として、超新星残骸が考えられてきました。超新星の発生頻度や、超新星残骸一つ当たりの宇宙線へのエネルギー供給量を粗く見積もると、前述の宇宙線生成率 ($3 \times 10^{40} \text{ erg/s}$) が説明可能であることなどが理由です。超新星爆発の結果、爆発放出物が星間空間を超音速で膨張し、衝撃波を形成します。1970 年代終わりの「衝撃波統計加速」と呼ばれる理論モデルの登場により²⁾、超新星残骸の衝撃波は、宇宙線の加速場所として最有力と考えられるようになりました。1993 年に打ち上げられた「あすか」衛星による超新星残骸 SN1006 の X 線観測³⁾では、「電子」が 10^{13} eV 程度まで加速されている証拠が得られ、超新星残骸で宇宙線が加速されているとする説を大きく後押ししました。しかし、宇宙線の主成分である「陽子」や原子核が高いエネルギーまで加速されている直接的な証拠は得られていません。前述のエネルギー供給の点も含め、確証は欠きながらも、超新星残骸は最有力な宇宙線陽子の供給源とされてきたのです。

地球に到達する宇宙線は直接観測できますが、その到来方向から発生源を突き止めることはできません。宇宙線は荷電粒子なので、星間磁場で進行方向が曲げられ直線で地球に到達できないからです。超新星残骸のように遠く離れた場所での宇

宙線を調べるには、宇宙線が放射する電磁波を観測する必要があります。特にガンマ線が放射される過程は主に次の三つです：(1) 宇宙線原子核と星間物質中の原子核との反応で生じる中性パイ中間子の崩壊ガンマ線、(2) 宇宙線電子が星間物質中の原子核や電子と衝突し出す制動放射、そして(3) 宇宙線電子と光子場（宇宙背景放射、恒星や星間ダストからの赤外線～可視光放射）の逆コンプトン散乱です。超新星残骸からパイ中間子の崩壊ガンマ線を観測し、宇宙線の主成分である陽子をとらえることが、宇宙線の起源を解明するうえで非常に重要です。しかし宇宙線電子が関与する放射と区別する必要があるため、できるだけ広帯域のガンマ線スペクトルを得ることが必要です。5 桁 ($0.02\text{--}300 \text{ GeV}$) にわたるエネルギー領域でガンマ線を測定するフェルミ衛星 LAT (=Large Area Telescope) 検出器⁴⁾は、この目的に最適の観測装置と言えます。

すでに LAT チームによって四つの超新星残骸 (W51C⁵⁾, カシオペア A⁶⁾, W44⁷⁾, IC 443⁸⁾) についての研究結果が論文として発表されています。なおこれらのすべての論文で日本人研究者（釜江、田島、内山、田中）が解析と論文執筆をリードしたことは特筆すべきことです。以下、まず若い超新星残骸であるカシオペア A の結果について解説し、そして分子雲と相互作用している三つの超新星残骸 W44, W51C, IC 443 の観測結果を紹介します。

2. 超新星残骸カシオペア A

活発な宇宙線加速が起きていると期待される若い超新星残骸は、さまざまな波長帯の電磁波で詳細に観測されてきました。特に、2000 年代初頭から地上チェレンコフ望遠鏡を用いた観測によって、複数の若い超新星残骸で TeV ($=10^{12} \text{ eV}$) ガンマ線が検出され⁹⁾、TeV 以上の「粒子」が加速されていることは決定的となりました。そして、LAT 検出器の登場によって、初めて若い超新星

残骸から GeV ガンマ線も検出できるようになったのです。ここでは GeV ガンマ線の最初の報告例であり、広い波長帯域で詳しく調べられているカシオペア A の観測結果を説明します。

カシオペア A は目視観測された記録が残る数少ない超新星爆発の名残りです。ヨーロッパの文献に 1680 年頃にカシオペア A の方向での爆発が観測されたという記載があり、系内の超新星爆発の中では人類が目撃した最後のものだろうと考えられています。系内で最も強い電波源の一つであり他の波長でも非常に明るいことから、カシオペア A は超新星残骸での粒子加速を探る格好の天体となっています。地上チェレンコフ望遠鏡 HEGRA により TeV ガンマ線が発見され¹⁰⁾、粒子が TeV を超えて加速されている証拠が得られました。そのガンマ線発生機構を明らかにすると期待されているのが、GeV 領域のガンマ線の測定です。

LAT 検出器による約 13 カ月間の観測データを詳しく解析した結果、カシオペア A の方向から、 12.2σ の統計的有意度でガンマ線 (0.5 GeV 以上) を検出しました。カシオペア A は半径 2.5 分角の大きさしかないので、GeV ガンマ線の空間分布は得られていません。図 1 はカシオペア A の電波画像に、GeV ガンマ線源の中心位置を重ねています。電波は高エネルギー電子によるシンクロトロン放射によるものです。ガンマ線源の中心位置は約 1 分角程度の精度で決めることができ、地上チェレンコフ望遠鏡で検出された TeV ガンマ線源の位置と統計誤差の範囲で一致します。この位置に背景の活動銀河核が偶然重なっている可能性を排除するため、GeV ガンマ線強度の時間変動が調べられましたが、有意な変動は検出されませんでした。

カシオペア A の中心付近には、超新星爆発時に残された中性子星が発見されています。銀河系内の同定されたガンマ線天体のほとんどがパルサーであるため、この中性子星が今回検出された GeV

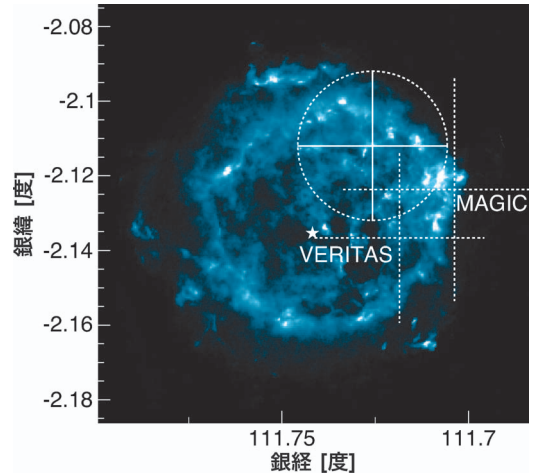


図 1 カシオペア A の電波イメージ (VLA 20 cm) とガンマ線源の位置⁶⁾。白の円が LAT 検出器により決定されたカシオペア A の位置 (円の大きさは統計誤差と系統誤差を足したものに对应する)。星印が中心の中性子星。十字は TeV ガンマ線で決定された位置。

ガンマ線を出しているパルサーである可能性も考えられます。しかし、中性子星の位置がガンマ線源の誤差範囲外にあること、LAT 検出器のパルサーグループによる探査でパルス成分が見つからなかったこと、そしてスペクトルにパルサー特有の数 GeV でのカットオフがないこと、これらのことからこの中性子星が GeV ガンマ線放射に大きく寄与をしていることはなさそうです。超新星残骸の衝撃波で加速された粒子によって GeV ガンマ線は放射されていると考えられます。

次に、ガンマ線の放射機構を考えましょう。図 2 はそれぞれ宇宙線電子による制動放射が卓越する場合 (左図) と、陽子がつくるパイ中間子崩壊が卓越する場合 (右図) を示しています。前者の場合、電波強度とガンマ線強度の整合性から放射領域の磁場は 0.1 ミリガウスとなり、シンクロトロン X 線の観測¹¹⁾から推定されていた磁場強度 (約 0.5 ミリガウス) より低くなってしまいます。そして GeV ガンマ線のスペクトルも、陽子の場合のほうがよりよくデータを再現しているように見えます。

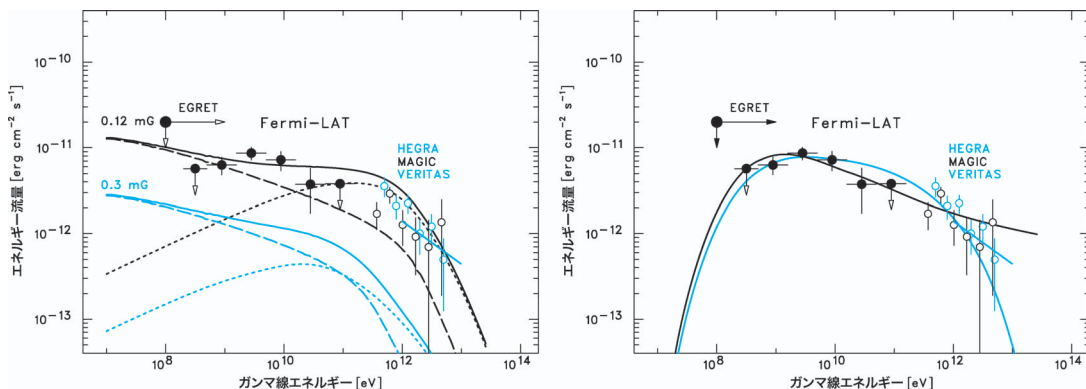


図2 カシオペア A のガンマ線エネルギースペクトル⁶⁾。黒丸が LAT で測定されたデータ点。白抜きは地上チェレンコフ望遠鏡による TeV ガンマ線データ。左: 電子起源モデル。黒の線が、磁場が 0.12 mG のときの電子起源モデル。青が 0.3 mG のときのモデル。破線は物質密度が 26 cm^{-3} を仮定したときの電子制動放射成分、点線が電子の逆コンプトン散乱成分。右: 陽子起源モデル。青の線は、陽子のスペクトルを指数 2.1 のべき関数に 10 TeV でのカットオフを加えた場合。黒の線は指数 2.3 のべき関数を仮定した場合。

す。したがって、陽子起源の放射と考えるのが自然ですが、まだ決定的とは言えず、今後の LAT 検出器による深い観測が必要です。これら二つの放射メカニズムは、標的原子あたり似た放射率をもつため、どちらが卓越している場合でも必要なエネルギー総量は大きく変わりません。X線観測によりわかっているガス密度を用いると、被加速陽子あるいは電子の運動エネルギーの総量が $(1-4) \times 10^{49} \text{ erg}$ 、つまり超新星爆発の運動エネルギーの数%であるとの結論に達します。このように、超新星残骸において宇宙線のエネルギー総量が良い精度で推定できたのは、初めてのことです。

3. 分子雲と相互作用している超新星残骸

超新星残骸の衝撃波が分子雲と衝突している場所は、ガンマ線観測の対象として注目されてきました。なぜなら、分子雲と衝突しているということは周囲の星間物質の密度が高いことを意味し、それによって、より多くの中性パイ中間子が生成され、より明るいガンマ線放射が期待できるからです。LAT 検出器のエネルギー帯域においては、先代にあたるコンプトン衛星搭載 EGRET 検出

器によって、いくつかの分子雲と衝突している超新星残骸の付近にガンマ線源が検出されていますが¹²⁾、位置決定精度が不十分であったため、検出されたガンマ線が本当に超新星残骸からの放射かどうか定かではありませんでした。LAT 検出器による観測によって、ガンマ線が W44, W51C, IC 443 といった超新星残骸からきていると明確に示すことができただけでなく、W44 の例のように、ガンマ線の空間分布についても議論できるようになりました。以下では W44, W51C, IC 443 について、LAT 検出器による結果^{5), 7), 8)}を紹介します。

3.1 W44

W44 は年齢が 2 万年程度と見積もられている中年の超新星残骸です。CO 輝線¹³⁾や OH メーカーの電波観測、衝撃波によって励起された H₂ 輝線の赤外線観測により、分子雲の一部が衝撃波と衝突していることがわかっています。

図 3 左が LAT 検出器によって測定されたガンマ線の空間分布です。詳細な解析から、この分布は LAT 検出器の角度分解能よりも空間的に広がっていることが明らかになりました。これにより、この領域にあるパルサー PSR B1853+01 やそのパルサー星雲 (X線や電波でせいぜい 1 から

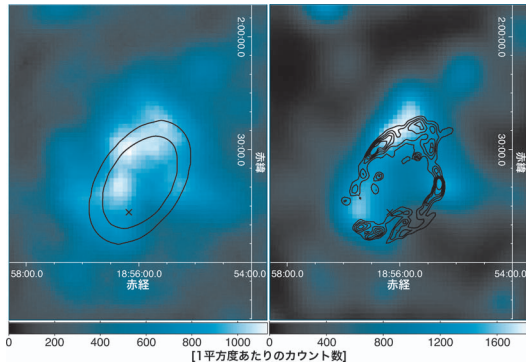


図3 W44のLATによる画像(2-10 GeV)⁷⁾。(左)スムージングをかけたLAT画像。(右)デコンボリューション後の画像。デコンボリューションでは大局的な形状を見ることはできるが、10分角以下の小さい構造は光子統計揺らぎの影響を受けるため、真の構造を必ずしも表さないことに注意。×は電波パルサーPSR B1853+01。右図中の等高線(黒)はスピッツァー衛星による4.5 μmの赤外線画像で、励起された水素分子の分布を示す。左図中の楕円は、モデル検定(最尤法)で用いられたリング状の空間分布。

2分角しか広がっていません)からの放射が主成分であることは否定できません。さらに詳細な空間分布を得るために、LAT検出器用に田島らが開発したデコンボリューションという手法^{*1}を適用し、図3右のような画像を得ました。衝撃波の影響を受けたH₂の分布を反映する赤外線の分布とよく似た形状が見えています。これとは独立に、最尤法を用いて、ガンマ線の分布として一様な楕円やリング状の分布を仮定して結果の比較も行ってみました。リング状の分布のほうが、より観測データをうまく説明できることがわかりました。これらのことは、ガンマ線の大部分が衝撃波の通過した高密度ガス中で放射されていることを支持します。

図4はW44のガンマ線スペクトルを示してい

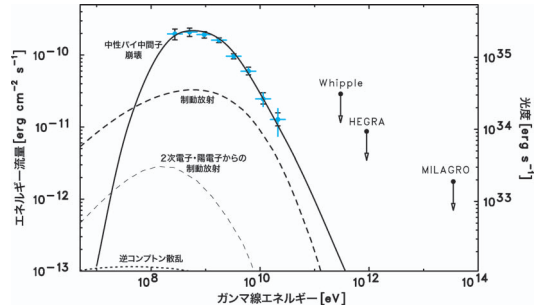


図4 W44のガンマ線エネルギースペクトル。縦方向の誤差は、青が統計誤差、黒が系統誤差。モデルは、実線が中性パイ中間子の崩壊ガンマ線、破線が制動放射、点線が逆コンプトン散乱。二つの制動放射成分はそれぞれ1次電子からの放射および陽子起源の荷電パイ中間子の崩壊で生じる電子・陽電子の放射を示す。

ます。この放射は、電子の逆コンプトン散乱で説明することはできません。なぜなら、ガンマ線光度がおよそ10³⁶ erg/sとかなり大きいため、超新星爆発で解放されるほぼ全運動エネルギーが宇宙線電子に与えられねばならないからです。一方、電子制動放射では、ガンマ線のスペクトルの形と、電波で観測されている同じ電子からのシンクロトロン放射のスペクトルの形の両方を矛盾なく説明することは困難です。フェルミ衛星によって検出されたガンマ線は中性パイ中間子の崩壊による放射と考えるのが妥当です。観測されたガンマ線スペクトルを、中性パイ中間子崩壊によるスペクトルとしてモデル化した結果を図4に示します。ガンマ線スペクトルの注目すべき特徴は、数GeVのところにある折れ曲がりです。中性パイ中間子崩壊による放射でこれを説明するには、超新星残骸で加速された陽子のスペクトルに折れ曲がりがあることが必要となります。陽子のスペクトルとして、E_{br}~10 GeVに折れ曲がりの

*1 検出器の角度分解能によるガンマ線到来方向の不確定性を考慮し、数学的処理を行うことで、真の空間分布に近いと思われる空間分布を求めるアルゴリズム。

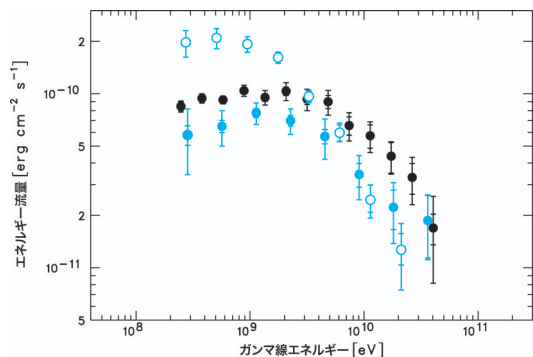


図5 W44 (青白抜き), W51C (青), IC 443 (黒) の GeV ガンマ線スペクトルの比較.

あるべき関数^{*2} (E_{br} よりも低エネルギーでの指数は $s_1 \simeq 1.7$, 高エネルギー側での指数は $s_2 \simeq 3.7$) を仮定すると, ガンマ線スペクトルをよく再現することがわかりました.

3.2 W51C と IC 443

W44 と同様に, W51C と IC 443 も CO 輝線などの観測から衝撃波と分子雲が相互作用していることが確認されている超新星残骸です^{14), 15)}.

LAT 検出器は, この二つの超新星残骸の方向にガンマ線源を検出しました. いずれのガンマ線源も, 電波など他の波長で見えている超新星残骸の大きさ程度の広がりをもっていることがわかりました. これは, ガンマ線が近傍にあるパルサーなどの他の天体からでなく, 超新星残骸から放射されていることを示します. 図5に示したように, W51C と IC 443 から検出されたガンマ線スペクトルにも, 数 GeV のところに折れ曲がりのあることがわかりました. モデル計算の結果も W44 とよく似ていて, 折れ曲がりのある陽子のスペクトルを仮定した中性パイ中間子崩壊によるスペクトルによって観測データを説明できます.

3.3 フェルミ観測が意味するところ

LAT 検出器によって測定された超新星残骸

W44, W51C, IC 443 のガンマ線スペクトルは, 中性パイ中間子の崩壊ガンマ線であると考えられます. 検出されているガンマ線のスペクトルは緩やかに折れ曲がっていますが, これはパイ中間子を生成する陽子のスペクトルが, 7–70 GeV で折れ曲がっていることで説明できます. 陽子スペクトルの低エネルギー側は, 衝撃波加速理論のテスト粒子モデルで予測されるべき指数 ($s=2$) とおよそ一致しています. 一方, 高エネルギー側のべき指数は $s=2.5\text{--}3.7$ とだいぶ柔らかくなっています. 超新星残骸における宇宙線陽子のスペクトルが, GeV のエネルギー領域で折れ曲がっているという結果は, 予期されていなかったことです. その解釈については, 宇宙線の加速を研究している専門家の中で, 今後大いに議論されることになるでしょう. たとえば, 高密度ガス中の中性粒子の影響による乱流磁場の減衰により¹⁶⁾, 衝撃波面から高エネルギーの宇宙線が逃げ出ているためにスペクトルが柔らかくなっていると解釈できるかもしれませんが¹⁷⁾. 折れ曲がりのエネルギーや高エネルギー側のべき指数は, 超新星残骸ごとに異なっているようです. これらの値が, 衝撃波と分子雲と相互作用の詳細にどのように依存しているかを観測的に明らかにできれば, この新しい問題を理解するうえで重要なヒントになるでしょう.

4. おわりに

筆者らは, フェルミ衛星 LAT 検出器により, 宇宙線の加速源として有力である超新星残骸を GeV ガンマ線によって系統的に観測しました. 若い超新星残骸カシオペア A では, 加速された粒子の総エネルギーが超新星爆発の数%程度であることがわかりました. これは, 宇宙線の起源を解明するうえで鍵となる「超新星残骸一つ当たり,

*2 宇宙線陽子のエネルギースペクトルは, 一般的にあるエネルギー範囲ではべき関数型 $dN/dE=KE^{-s}$ で表されます. ここでいう折れ曲がりのあるべき関数とは, あるエネルギー E_{br} でべき指数が $s=s_1$ から $s=s_2$ へ変化しているものです. なお, s の値が小さいときを「硬い」, 大きいときを「柔らかい」と表現します.

どれだけの量の宇宙線が生成されているのか」という問題に対して、初めて一つの具体的な答えを与えるものです。今後のLAT検出器による観測で、他の超新星残骸についても被加速粒子の総量を調べることができるでしょう。一方、衝撃波が分子雲と相互作用していることが知られている中年の超新星残骸W44, W51C, IC 443では、宇宙線陽子起源のガンマ線と考えられるスペクトルを観測し、宇宙線陽子のスペクトルは10 GeV付近で折れ曲がっていることを発見しました。このような超新星残骸では、地上チェレンコフ望遠鏡が観測するTeVガンマ線は、ガンマ線光度にほとんど寄与しません。GeVガンマ線の観測で初めて真のガンマ線光度が明らかになる超新星残骸が存在していたのです。LAT検出器で測定されたガンマ線スペクトルは、従来の衝撃波加速理論を適用するだけでは説明できないようです。宇宙線の加速に関する新しい問題が提起されたと言って良いでしょう。今後、さらに多くの超新星残骸がGeVガンマ線で研究され、宇宙線の起源について、総合的かつ定量的な議論ができるようになることを期待しています。

参考文献

- 1) 水野恒史 (on behalf of the Fermi LAT Collaboration), 2010, 天文月報 103, 000
- 2) たとえば, Blandford R. D., Ostriker J. P., 1978, ApJ 221, L29
- 3) Koyama K., et al., 1995, Nature 378, 255
- 4) 釜江常好, 大杉 節, 2010, 巻頭言 フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡, 天文月報 103, 314
- 5) Abdo A. A., et al., 2009, ApJ 706, L1
- 6) Abdo A. A., et al., 2010, ApJ 710, L92
- 7) Abdo A. A., et al., 2010, Science 327, 1103
- 8) Abdo A. A., et al., 2010, ApJ 712, 459
- 9) Aharonian F. A., Buckley J., Kifune T., Sinnis, G., 2008, Rep. Prog. Phys. 71, 096901
- 10) Aharonian F. A., et al., 2001, A&A 370, 112
- 11) Uchiyama Y., Aharonian F. A., 2008, ApJ 677, L105

- 12) Esposito J. A., Hunter S. D., Kanbach G., Sreekumar P., 1996, ApJ 461, 820
- 13) Seta M., et al., 2004, AJ 127, 1098
- 14) Denoyer L. K., 1979, ApJ 232, L165
- 15) Koo B.-C., Moon D.-S., 1997, ApJ 485, 263
- 16) Ptuskin V. S., Zirakashvili V. N., 2003, A&A 403, 1
- 17) Gabici S., Aharonian F. A., 2007, ApJ 665, L131

Fermi-LAT Observations of Supernova Remnants

Hideaki KATAGIRI

Department of Physical Sciences, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Yasunobu UCHIYAMA, Tsuneyoshi KAMAE, and Hiroyasu TAJIMA

Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, 2575 Sand Hill Road, Menlo Park, CA 94025, U.S.A.

Takaaki TANAKA

Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Stanford University, 382 Via Pueblo Mall, MC 4060, Stanford, CA 94305, U.S.A.

on Behalf of the Fermi LAT Collaboration

Abstract: We review observations of GeV gamma rays from supernova remnants with the Large Area Telescope (LAT) on board the *Fermi* Gamma-ray Space Telescope, which is expected to provide insights into cosmic-ray acceleration and release. Observations of a young SNR, Cassiopeia A, by LAT allowed us to estimate the total energy of particles accelerated by the SNR. The gamma-ray spectra of middle-aged supernova remnants, W51C, W44, and IC 443, interacting with molecular clouds are well modeled with emission due to protons and nuclei with spectral breaks in GeV regime, which provides new constraints on understanding particle acceleration and release in the dense medium.