

フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡で見た 銀河系宇宙線の姿

水野 恒 史

〈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: mizuno@hep01.hepl.hiroshima-u.ac.jp

on Behalf of the Fermi LAT Collaboration

高エネルギー宇宙線が星間ガスや光子と反応して作る拡散ガンマ線放射は、銀河系内の宇宙線のエネルギーや空間分布を探る強力な手段です。フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡搭載 LAT 検出器は、その優れた能力でこの銀河系宇宙線の姿を明らかにしつつあります。まず中銀緯領域の観測で、100 MeV–10 GeV*1の範囲で過去最高品質のガンマ線スペクトルを取得し、地球上で直接観測された陽子スペクトルが、太陽系近傍のそれをよく代表することを示しました。一方では銀河面の観測により、銀河の外側の領域で、宇宙線強度が他波長観測による超新星残骸の分布と標準的な宇宙線伝播モデルから期待されるよりも高いことがわかりました。また直接観測で得られた電子陽電子の超高統計のスペクトルは、PAMELA 衛星による陽電子比のデータなどと組み合わせることで、近傍の電子陽電子源の存在を確からしいものにし、またモデルに強い制限をつけています。

1. はじめに

地球には宇宙空間から、光速に近い速度で走る高エネルギー荷電粒子が降り注いでおり、宇宙線と呼ばれます¹⁾。宇宙線研究の始まりは1912年、V. F. Hess による発見にまでさかのぼることができ、彼はこの業績により1936年にノーベル賞を受賞しました。これまでに観測された最大のエネルギーは、 10^{20} eV（陽子の静止質量の1,000億倍）以上に達し、これは地上の加速器で実現されたエネルギー 10^{12} eV²⁾ の実に1億倍にあたります。また、エネルギー密度は 1 cm^3 あたり 1 eV 程度で、これは星間空間でのガスや磁場および光子のもつエネルギー密度に匹敵し（むしろ上回っており）、星間空間で主要な役割を担っていると考えられて

います。こうした特質をもつことから、宇宙線は発見以来100年たった今なお、宇宙物理学の主要な研究対象の一つとなっています。

宇宙線のエネルギースペクトルは、べき関数形（粒子数フラックスを N 、エネルギーを E として、 $dN(E)/dE \propto E^{-\Gamma}$ となる分布、 Γ をスペクトル指数という）の非熱的分布をしていますが、詳しく見るといくつかの構造をもち、加速源などの情報を反映していると考えられます。最も顕著な構造は 10^{15} – 10^{16} eV あたりで傾きが急になる折れ曲がりであり、人間の足にたとえて、「ひざ」という意味の **knee** と呼ばれます。これより低いエネルギーの宇宙線は、主に銀河系内の超新星残骸により作られると考えられており³⁾、銀河系宇宙線と呼ばれています。10 TeV = 10^{13} eV までのエネルギースペ

*1 10^6 電子ボルトを MeV, 10^9 電子ボルトを GeV, 10^{12} 電子ボルトを TeV と呼びます。

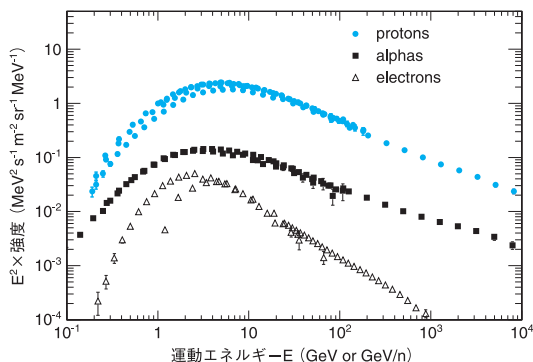


図1 地球上で気球実験や人工衛星を用いて直接測定された、宇宙線陽子（青の○印）、 α 線（黒の四角）および電子陽電子（白抜き△）のエネルギースペクトル（参考文献4のデータをもとに作成）。縦軸は粒子数フラックスに、エネルギーの2乗をかけたものです。 α 線は核子あたりのエネルギーで表示してあります。電子陽電子スペクトルには、最新のフェルミ衛星による結果が含まれています（5章参照）。低エネルギー側で観測によって多少ばらついているのは、太陽活動の影響が見えているためです。

クトルを図1に示します。縦軸は単位エネルギーあたりの粒子数フラックスに、エネルギーの2乗をかけているので、高さがエネルギー密度に比例します^{*2}。この図から、陽子を主成分とする核子がほとんどであること、100 GeV以下の核子成分がエネルギー密度の大部分を占めること、電子も1-0.1%程度存在し、核子より急なスペクトルの傾きをもつことなどがわかります。ここで示したのは、地球に到達した宇宙線のスペクトルですが、銀河系内のエネルギー分布や空間分布はどうなっているのでしょうか？今回のお話の主役は、この銀河系内の宇宙線です。以下では単に宇宙線と言えば、この銀河系宇宙線（または銀河宇

宙線）のことを指すこととします。

2. ガンマ線を用いた宇宙線研究

宇宙線は荷電粒子なので、星間磁場（数マイクロガウス程度）に強く巻きついた運動をし、地球に到達したときには到来方向の情報は完全に失われています。しかし、宇宙線は星間空間を伝播する間に、星間空間中の物質（ガス）、光子、磁場と相互作用することで、さまざまな波長域で電磁波を放射し、自らの情報を伝えてくれるのです。エネルギーが1 MeV程度以上のガンマ線領域では、核子-核子衝突で生じた中性パイ中間子の崩壊（宇宙線陽子と星間ガスの間の反応）、電子が原子核のクーロン力で曲げられる際に出す制動放射（宇宙線電子と星間ガスの間の反応）、低エネルギー光子を電子がたたき上げる逆コンプトン散乱（宇宙線電子と星間光子の間の反応）が主な素過程になります。このガンマ線放射は、ガンマ線点源に対して真に広がった放射という意味で拡散ガンマ線放射（diffuse gamma-ray emission）と呼ばれ、銀河系宇宙線のエネルギー分布や空間分布を探るユニークな手段として古くから知られています（日本の早川やMorrisonなどによるアイデア⁵⁾）。特に中性パイ中間子の崩壊によるガンマ線^{*3}は、宇宙線の主成分である陽子を調べる重要なプローブです。

しかし残念ながら、以前のガンマ線衛星による観測⁶⁾では、装置の性能が限られていたため、断片的な知識しか得られていませんでした。ここで満を持して登場したのが、われらがフェルミ衛星です（正式名称は、フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡といいます⁷⁾）。フェルミ衛星搭載LAT検出器

^{*2} 図は地球上で測られたスペクトルなので、太陽風の影響を受けて低エネルギー側のフラックスが実際の星間空間の宇宙線のそれより下がっています。この太陽風の影響を受けない生の宇宙線の情報を伝えてくれるという意味でもガンマ線観測は重要です。

^{*3} 中性パイ中間子は、その静止系では寿命 1.8×10^{-16} sで2個のガンマ線に崩壊し、そのエネルギーは静止質量の半分の約70 MeVとなります。観測者からみると（ローレンツ変換）、種である宇宙線陽子のエネルギーを反映して高いエネルギーに伸びた分布をします¹⁾。

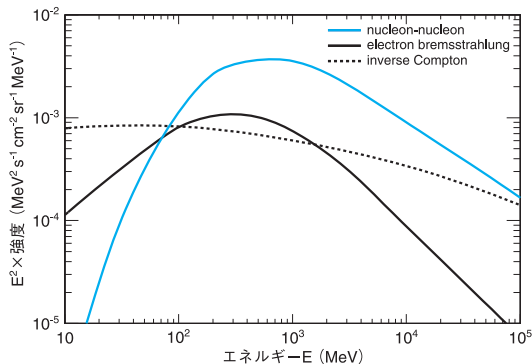


図2 地球上で観測された宇宙線スペクトルをもとに宇宙線の空間分布を仮定して得られた、拡散ガンマ線放射の予想。宇宙線の伝播とガンマ線放射を数値計算するツールである GALPROP コード¹¹⁾で得られた全天平均スペクトルです。青の実線が宇宙線陽子と星間ガスの反応でできた中性パイ中間子の崩壊によるもの、黒の実線は電子の制動放射、黒の点線が電子による逆コンプトン散乱の寄与を表します。各成分の比は観測する領域によって変わりますが、フェルミ衛星が高い感度をもつ 100 MeV-10 GeV の領域は、宇宙線陽子を調べるのに適しているのがわかります。

は、日本の誇る半導体技術を駆使して作られた装置であり⁴⁾、以下のような優れた性能をもちます⁹⁾。(1) 大きな有効面積 (1 GeV で 6,000 cm² 以上) をもつ。(2) 視野がたいへん広い (一度に全天の 20% をカバー) (3) 広いエネルギー帯 (20 MeV-300 GeV 程度) にわたり感度を有する。性能 (1) の重要性は説明の必要がないでしょう。性能 (2) は、均一な感度で全天をスキャンできることを意味し、拡散ガンマ線のような大きく広がった対象の観測には特に有効です。またガンマ線のエネルギーは、種である宇宙線陽子のエネルギーのおよそ 10 分の 1 になるため¹⁰⁾、性能 (3) は、エネルギー密度の大部分を担う、100 GeV 以下の宇宙線陽子に優れた感度をもつことを意味します。図 2 に、地球上で測られた宇宙線のエネルギースペク

トルをもとに、銀河系内での宇宙線の分布、星間空間のガスや光子の分布を適当に仮定して得られた拡散ガンマ線放射スペクトルの予想を示します。フェルミ衛星が高い感度をもつ GeV 領域は、宇宙線の主成分である陽子を調べるのに適しているのがよくわかるでしょう。ここで各成分の強度は、種である宇宙線の強度と、ターゲット (高エネルギー宇宙線が反応する相手) である星間ガス、もしくは星間光子の密度の積に比例します。特に星間ガスの分布は電波観測などで直接測ることができるので、宇宙線分布を調べるのに適したターゲットだと言えます。

先月号の天文月報の表紙にフェルミ衛星によるガンマ線全天マップが掲載されましたが、個々のガンマ線天体の背後に、大きく広がった放射があるのがわかると思います。これが銀河系宇宙線と、星間ガスや星間光子の反応で生じた拡散ガンマ線放射です。

3. フェルミ衛星による拡散ガンマ線放射の観測 (1): 宇宙線陽子スペクトルの詳細測定

ここから観測の紹介に移ります。すでに述べたように拡散ガンマ線の強度は、宇宙線の強度と、ターゲットとなる星間ガスもしくは星間光子の密度の積に比例するので、他波長観測と組み合わせることで、宇宙線分布に制限をつけることが可能です。フェルミチームは、特に宇宙線の主成分である陽子を詳しく調べるため、電子による逆コンプトン散乱が強くなる銀河中心方向を避け、また銀河面から離れた領域をまず調べることにしました¹²⁾。星間ガスは銀河面に集中して (半値幅が数百 pc 程度¹³⁾) 分布しているので、このような中高銀緯領域をみることで、太陽系近傍、距離にしておよそ 1 kpc 程度内の宇宙線を精度良く調べるこ

⁴⁾ LAT 検出器は、荷電粒子バックグラウンドを落とすアンチコインシデンス検出器、ガンマ線の到来方向を測るトラッカーとエネルギーを測るカロリメーターからなります。このうちトラッカーにはシリコン半導体がいわれています⁸⁾。

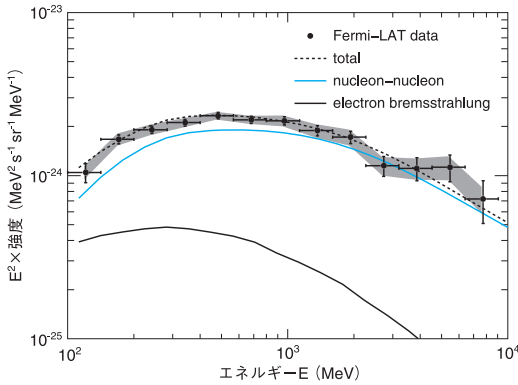


図3 フェルミ衛星により得られた、中高銀緯領域の拡散ガンマ線放射のスペクトル（銀経は200度から260度、銀緯 $|b|$ は22度から60度）。参考文献12より転載しました（見やすさのためにモデル線の一部を省略しています）。データ点の周りの影は、系統誤差を示します。これはターゲットとなる星間ガス中の、水素原子1個あたりのガンマ線放出率スペクトルであり、太陽系近傍の宇宙線スペクトルを反映します。併せて示してあるのが、地球上での直接観測に基づいて計算された、宇宙線陽子（より重い核子を含む）による中性パイ中間子の崩壊で生じるガンマ線放射（青の実線）、電子による制動放射の寄与（黒の実線）および両者の和（黒の点線）のモデルです。地球上で直接観測された宇宙線陽子スペクトルが、太陽系近傍のそれをよく代表することが示されました。

とができます。視野内で宇宙線のスペクトルが一定であれば、観測されたガンマ線の輝度分布は、電波観測（中性水素原子からの21 cm線スペクトル）から推測される星間ガスの柱密度の分布に比例するはずで、そこで両者の相関を見ることで、ターゲットである星間ガス中の水素原子1個あたりのガンマ線放出率を求めたのが図3になります。ここで視野内のガンマ線点源や、逆コンプトン散乱成分、銀河系外からやってくる一様なガンマ線およびバックグラウンドは差し引いてあります。100 MeVから10 GeVという広いエネルギー範囲で、これだけ高品質のスペクトルが得られたのは初めてのことで、

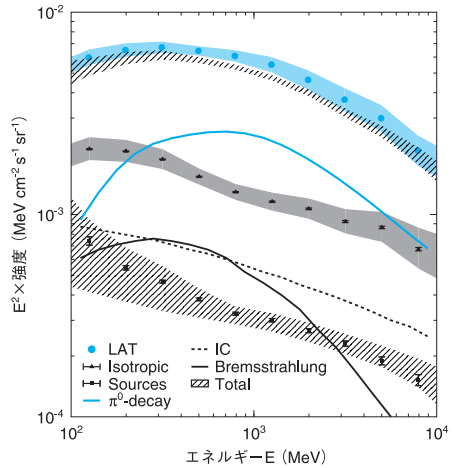


図4 フェルミ衛星による、中低銀緯領域（銀緯 $|b|$ が10度から20度、銀経は全天にわたる）の拡散ガンマ線放射のスペクトル。参考文献14より転載。最もフラックスの大きい、○印で示されているのが観測データで、影は系統誤差を表します。すぐ下のハッチで示しているのがモデルスペクトルで、その他の線はモデルを各成分に分解したものです。やはり太陽系近傍の宇宙線は、地球上で観測されたものとおおむね等しいことがわかりました。この観測は、先代EGRET検出器による、いわゆる「GeV超過信号」を否定する結果ともなりました。

このガンマ線放出率スペクトルは、宇宙線のスペクトル情報を直接反映します。そこで、地球上で観測された宇宙線（電子、陽子、およびより重い核子）のスペクトルに基づいて得られた、ガンマ線放出率のモデルも、重ね書きしてあります。観測データとほぼ一致しており、地球上で直接測定された宇宙線陽子のスペクトルが、太陽系近傍のそれをよく代表していることを、これまでになく精度で示すことができました。ここで得られたガンマ線放出率は、われわれの銀河系と、大マゼラン雲など他の銀河の宇宙線密度を比較するのにも用いられています。詳しくは今月号のフェルミ特集の後半の記事を参照してください。また数GeV以上のガンマ線スペクトルの傾きは、宇宙線陽子のスペクトルの傾きをそのまま示すので、よ

りデータを蓄積し、特に 10 GeV 以上の高エネルギーガンマ線まで見るができるようになれば、宇宙線スペクトルの形状まで議論することができるでしょう。ここでは不定性を減らすため限られた領域のガンマ線放射を議論していますが、より広い領域を扱った関連論文¹⁴⁾でも同様のガンマ線スペクトルが得られています(図4)。ここでデータとモデルの間のわずかなずれ(10-15%程度)は、仮定した宇宙線スペクトルの不定性や、視野内の星間分子ガスの量の不定性などで説明がつくと考えています。

4. フェルミ衛星による拡散ガンマ線放射の観測 (2): 宇宙線陽子の空間分布

それでは、銀河系スケールでの宇宙線分布はどうなっているのでしょうか？ これには銀河面上のガンマ線放射を調べる必要があります。視野方向のさまざまな距離にある星間ガスや星間光子からの放射が重なるうえに、銀河面上のガンマ線天体が混入するので、解析は難しくなります。

幸い、星間空間中の原子ガスの分布は 21 cm ラインで直接測ることができ、分子ガスの分布も一酸化炭素のラインなどを用いておおむね推測できるので、銀河の回転曲線¹⁵⁾を用いることで、いろいろな距離・形態にある星間ガスを分離することが可能です。ここでも銀河中心方向は不定性が大きくなるので、反対の方向、つまり銀河系の中で太陽系より外側の領域をまず扱うことにしました。われわれが最初に扱ったのは銀経 100-145 度の、いわゆる第二象限と呼ばれる領域(の一部)になります。よく知られているように、われわれの銀河系は渦状腕構造をもちますが、この領域は、太陽系のごく近傍(300 pc 程度)に若い星がディスク上に分布している Gould Belt、太陽系の属する渦状腕である local arm、さらに外側の Perseus arm および outer arm などの構造が顕著であり、これらに付随したガンマ線放射と宇宙線スペクト

ルを精度良く調べることができます。各構造の星間ガスの柱密度分布とガンマ線放射の輝度分布を比べることで、それぞれの領域からのガンマ線放射を求めるわけで、先に紹介した研究をより複雑にしたものと理解してください。このような解析は以前の衛星でも行われていましたが¹⁶⁾、フェルミ衛星の優れた能力に加え、星間ガス、星間光子に対する知見が増えたことで、大きく精度を高めることができました。詳しくは論文¹⁷⁾を見ていただくとして、宇宙線に関して得られた結果は以下の二つに大別されます。(1) 近傍のガンマ線スペクトルは、地球上で直接観測された宇宙線に基づく予想と大体一致する。ただし、銀河の外側では若干スペクトル指数が小さくなる傾向が見られる。(2) ガンマ線強度(放出率)は、銀河の外側ほど小さくなる。またその下がり方は、銀河系宇宙線の源とされる超新星残骸の分布から予想されるより緩やかである。

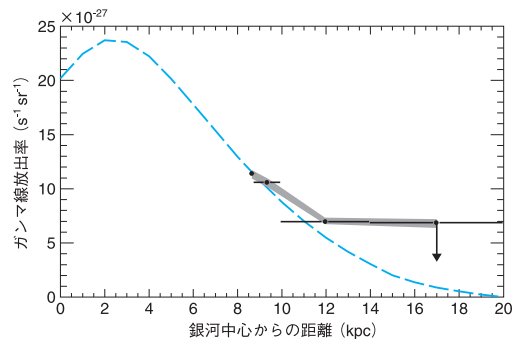


図5 フェルミ衛星を用いて、銀経 100 度から 145 度の銀河面を観測して得られた、200 MeV 以上のガンマ線強度(放出率)の空間分布¹⁷⁾。これはそのまま宇宙線のエネルギー密度の空間分布を示します。横軸は、Gould Belt, local arm, Perseus arm, および outer arm の、それぞれの構造がおおむね対応する、銀河中心からの距離になります。併せて示したのは、GALPROP コード¹¹⁾を用い、電波観測で得られた超新星残骸の分布¹⁸⁾から予想したガンマ線の強度分布です。観測データはモデルよりもなだらかな分布をしているのがわかります。

結果 (1) は、銀河系宇宙線のスペクトルの形が場所によって異なるという可能性を含む、興味深い結果です。ただし点源の混入の可能性も今のところ否定できません。結論を出すには、より統計をためた、精度の良い議論が必要になります。結果 (2) をまとめたのが図 5 です。銀河の外側に行くにつれて、ガンマ線強度が徐々に下がっているのがわかります。定性的には、銀河系宇宙線の源である超新星残骸の数密度が下がるため¹⁸⁾と理解できます。実際には加速源から星間空間に抜け出した宇宙線は、星間プラズマ中の磁気乱流による散乱を受けて頻繁に向きを変え、拡散運動を行いながら伝播していくと考えられています^{19, 11)}。このため、もともとの加速源の空間分布がなまされ、若干ならかな分布になります。つまり宇宙線の銀河系内での空間分布は、宇宙線加速源の分布と宇宙線の伝播効果の二つを反映します（主に宇宙線の拡散係数と、宇宙線の閉じ込め領域の大きさが空間分布を決めます¹¹⁾）。図中のモデル線は、宇宙線が星間ガスと衝突してできた二次粒子の地球上での観測^{*5}をもとに、宇宙線の伝播の仕方を推測して計算されたものです。観測のほうが大分緩やかであり、宇宙線のエネルギー密度が、銀河の外側で予想よりも大きいことがわかりました。ガンマ線の分布がこのように「なだらかな」であることは以前から指摘されていましたが¹⁹⁾、フェルミ衛星の観測によって精度を大きく高め、この傾向を確かなものにできました。このフェルミ衛星の結果は、従来考えられていたよりも多くの宇宙線源が銀河の外側に存在するという面白い可能性を示唆します。あるいは宇宙線の伝播の仕方が、これまでの予想と大きく異なるのかもしれませんが。確かな答えを出すには、詳しいモデルとの比較と、さまざまな領域でのガンマ線の観測が必要になります。実際そのような研究が精力的に行われており²⁰⁾、銀河系宇宙線の大局的な姿が明

らかになりつつあります。

5. 高エネルギー電子の観測

さてここから話は、宇宙線電子（および陽電子）に移ります。高エネルギー電子は、星間空間でシンクロトロン放射、逆コンプトン散乱でエネルギーを失い、またエネルギーが高いほどエネルギー損失が顕著になります。1 TeV 以上の電子の冷却時間は数十万年以下であり¹⁾、典型的な拡散係数をあてはめると、1 kpc 以下しか伝播できません。よって地球上で観測された高エネルギー電子は、太陽系近傍に起源をもつはずで、つまり宇宙線電子の直接観測は、近くの宇宙線加速源をみることになります²¹⁾。拡散ガンマ線による宇宙線陽子の観測と、さまざまな意味で相補的であることがわかるでしょう。幸いなことに、フェルミ衛星搭載 LAT 検出器は、ガンマ線を電子陽電子対に変えて検出する装置です。したがって宇宙線電子に対しても性能の良い検出器になります²²⁾。高エネルギーガンマ線のエネルギーを精度良く測るために、細長い棒状のユニットを多数並べた CsI シンチレーターが、電子陽電子に対する優れた解像型カロリメーターとして働くのです。磁石を搭載してはいないので、電子と陽電子の区別はつきませんが、有効面積と観測時間の面では、他の追従を許しません²³⁾。

この宇宙線電子に関しては、ここ 1-2 年で重要な報告が相次ぎました。まず挙げられるのは ATIC 気球実験による、600 GeV 付近の特徴的なバンブ構造の報告で²⁴⁾、電子陽電子に高い確率で崩壊する暗黒物質を含むさまざまな解釈が提唱されました。また PAMELA 衛星は、電子に対する陽電子の比（陽電子比）が、数十 GeV 以上で、エネルギーが高いほど大きくなっていることを見いだしました²⁵⁾。陽電子は、宇宙線陽子が伝播の過程でエネルギーを失い（よりソフトになり）、その

*5 炭素に対するホウ素の比や、ベリリウムの同位体比などを用います。一次宇宙線にはほとんど存在しないこれらの元素から、宇宙線の伝播に関する情報が得られます^{19, 11)}。

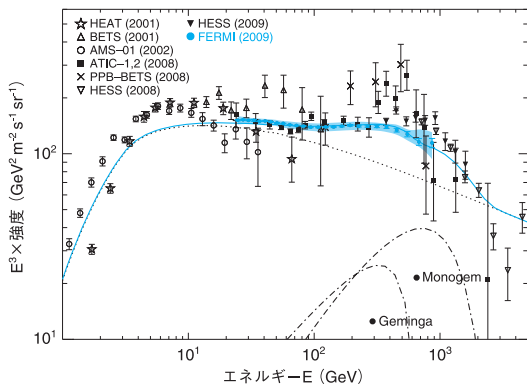


図6 フェルミ衛星で得られた、宇宙線電子陽電子の直接観測によるスペクトル^{27), 28)}。他のミッションの観測により得られたスペクトルも併せて示してあります。系統誤差を示すハッチに囲まれた高統計のデータ（青の○印）がフェルミ衛星の結果です。図中の実線はこれを銀河系全体になだらかに分布する加速源と、近傍のパルサーからの寄与で再現したモデルの例で、モデルの各成分を点線および一点鎖線で示してあります。フェルミ衛星データのエネルギー範囲より低いところ（20 GeV 以下）でこのモデルが実データを必ずしも再現していないのは、このエネルギー帯のデータに対するチューニングをしていないためです。

最中に星間物質と衝突して生成されます。もし観測された陽電子がすべてこの星間空間で生じた二次粒子なのであれば、陽電子比はエネルギーが高いほど小さくならなければなりません。これもまた、星間空間で生じる二次的な陽電子以外の、暗黒物質の信号や近場の電子陽電子加速源の存在を強く示唆します^{*6}。フェルミ衛星のもたらす結果に対する期待は、いやがおうにも増すばかりでした。

フェルミ衛星で得られた、電子陽電子スペクトルを図6に示します。合わせてプロットしてある他のミッションの結果に比べ、エネルギー範囲と

統計の面で圧倒しているのがわかるでしょう。電子の1,000倍あまりもある陽子のバックグラウンドを効率良く落とし、また精度良く見積もるためにさまざまな努力が費やされています²⁷⁾。この図から二つの重要なことがわかります。(1) 数百 GeV のバンブ構造は見られない。(2) エネルギー分布はのっぺりしており、スペクトル指数がおおよそ3の、単一のべき関数でほぼ記述できる。

結果(1)はATIC, PAMELAの結果を受けて提唱されていた、さまざまな理論に対し大きな制限をつけます。結果(2)は、一次電子線が従来考えられてきたよりも高エネルギー側に多いことを意味し^{*7}、これはPAMELA衛星の報告した「陽電子過剰」をより強調することになります。近場の電子陽電子源の存在がますます確からしいものとなりました。フェルミとPAMELAの結果を統一的に説明するべく、近傍のパルサー、超新星残骸、最近起きたガンマ線バースト、暗黒物質など、さまざまなモデルが提唱され活発な議論を呼んでいます^{28), 29)}。図6には一例として、近傍のパルサーの寄与のモデルを示してあります。いずれの説に対しても、フェルミ衛星の超高統計のデータはモデルパラメーターに強い制限をかける重要な役割を担っています。また近傍の加速源が正体であれば、到来方向に高エネルギー領域でわずかな(1%程度)異方性をもつと予想され、その検出を目指した解析も続けられています。宇宙線源からの信号を直接捕らえる日も遠くないかもしれません。

6. まとめ

われわれの銀河系は、高いエネルギーをもつ宇宙線で満ちています。銀河系の高エネルギー現象の理解には、この宇宙線を作り出すエンジン（加速源）と、宇宙線の大局的な分布の双方の研究が

^{*6} 陽電子比が10 GeV以上で盛り上がる傾向にあることは以前から知られており、近傍の加速源の存在などが議論されてきました²⁶⁾。ただし観測データの不定性は大きく、確定的なことは言えない状況にありました。

^{*7} これまで電子のスペクトル指数はおおよそ3.3程度とされてきましたが、特に100 GeV以上は観測があまりなく、少なからぬ不定性がありました。

欠かせません。ガンマ線はこの二つの研究を同時に行うことのできる優れた波長域です。GeV ガンマ線に高い感度をもつフェルミ衛星により、銀河系宇宙線の姿が徐々に明らかになりつつあります。

参考文献

- 1) Longair M. S., 1992, *High Energy Astrophysics*, 2nd edition (Cambridge Univ. Press, Cambridge); Geisser T. K., 1990, *Cosmic Rays and Particle Physics* (Cambridge Univ. Press, Cambridge)
- 2) 2009年12月の時点で、LHCの達成した1.18 TeVが最高記録。 <http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2009/PR.18.09E.html> を参照してください。
- 3) 天野考伸, 2009, 天文月報 102, 9; 馬場 彩, 山崎了, 2004, 天文月報 97, 679
- 4) <http://www.mpe.mpg.de/~aws/propagate.html>
- 5) Pinkau K., 1996, *A&AS* 120, 43 に初期のガンマ線観測と宇宙線研究の歴史が簡潔にまとめられています。
- 6) Bloemen G. M., et al., 1986, *A&A* 154, 25; Hunter S. D., et al., 1997, *ApJ* 481, 205
- 7) Atwood W. B., et al., 2009, *ApJ* 697, 1071
- 8) Ohsugi T., et al., 2005, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 541, 29
- 9) Rando R., et al., 2009, arXiv:0907.0626
- 10) Mori M. 1997, *ApJ* 478, 225
- 11) Strong A. W., Moskalenko I. V., 1998, *ApJ* 509, 212
- 12) Abdo A. A., et al., 2009, *ApJ* 703, 1249
- 13) Dickey J. M., Lockman F. J., 1990, *ARA&A* 28, 215; Nakanishi H., Sofue Y., 2003, *PASJ* 55, 191
- 14) Abdo A. A., et al., 2009, *PRL* 103, 251101
- 15) Clemens D. P., 1985, *ApJ* 295, 422
- 16) Digel S. W., et al., 1996, *ApJ* 463, 609
- 17) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ* 710, 133
- 18) Case G. L., Bhattacharya D., 1998, *ApJ* 504, 761; Lorimer D. R., 2004, arXiv:astro-ph/0308501
- 19) Bloemen H., 1989, *ARA&A* 27, 469
- 20) Fermi Symposium 2009 での, Ormes J. や Porter T. の発表を参照してください。 <http://confluence.slac.stanford.edu/display/LSP/Fermi+Symposium+2009>
- 21) Kobayashi T., et al., 2004, *ApJ* 601, 340
- 22) Moiseev A., et al., 2007, *Proc. of 30th ICRC* 2, 449 (arXiv:0706.0882)
- 23) Baldini L. の *TeV Particle Astrophysics 2009* での発表などを参照してください。 <http://www-conf.slac.stanford.edu/tevpa09/Talks.asp>
- 24) Chang J., et al., 2008, *Nature* 456, 362
- 25) Adriani O., et al., 2009, *Nature* 458, 607
- 26) Aharonian F. A., et al., 1995, *A&A* 294, L41
- 27) Abdo A. A., et al., 2009, *PRL* 102, 181101
- 28) Grasso D., et al. 2009, *Astroparticle Physics* 32, 140
- 29) Ioka K., 2008, arXiv:0812.4851; Fujita Y., et al., 2009, *Phys. Rev. D* 80, 063003; Kawanaka N., et al., 2010, *ApJ* 710, 958 (多数あるので, 日本人が主著者となっている論文の一部だけを挙げてあります。)

Fermi LAT Study of Galactic Cosmic Rays

Tsunefumi MIZUNO

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

on Behalf of the Fermi LAT Collaboration

Abstract: Diffuse gamma-ray emission is a powerful probe to study Galactic cosmic rays (CRs). Fermi LAT observation of the intermediate latitude region shows that CR nuclei spectra in the vicinity of the solar system are close to those directly measured at the Earth. Gamma-ray emissivity gradient towards the outer Galaxy in the 2nd quadrant is flatter than expectations by a conventional model, indicating higher CR densities beyond the solar circle. Precise measurement of the inclusive CR electron and positron spectrum, particularly when taking account of the positron fraction reported by PAMELA, gives strong constraints on the model of nearby CR electron/positron sources.