# フェルミガンマ線宇宙望遠鏡で探る微弱ガンマ線天体

**深　沢　泰　司**
〈広島大学大学院理学研究科　〒739–8526 広島県東広島市鏡山 1–3–1〉
e-mail: fukazawa@hep01.hepl.hiroshima-u.ac.jp

**片　岡　　淳**
〈早稲田大学理工学術院総合研究所　〒169–8555 東京都新宿区大久保 3–4–1〉
e-mail: kataoka.jun@waseda.jp

**高　橋　忠　幸**
〈宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所　〒252–5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3–1–1〉
e-mail: takahasi@astro.isas.jaxa.jp

**on Behalf of the Fermi LAT Collaboration**

フェルミガンマ線宇宙望遠鏡は，11 カ月のサーベイ観測により，4 シグマ以上の有意度で 1,451 個もの GeV ガンマ線で光る天体を検出し，従来のブレーザー天体やパルサーに加えて，多種の天体からガンマ線放射を見つけつつあります．全検出天体の約半数を占めるブレーザー天体についても精密な種族研究が可能となり，明るさの頻度分布 (log $N$–log $S$) については進化に起因すると思われる折れ曲がりも見つかりました．一方，銀河団や暗黒物質からのガンマ線放射は見つかっておらず，これまでに比べて厳しい上限値がつけられています．さらに，宇宙ガンマ線背景放射も精度良く測定され，EGRET が最初に発表したフラックスに比べて弱く，また急なスペクトルをもつことがわかりました．明るさの頻度分布をもとに見積もられるブレーザー天体の寄与は，2 割ほどにしかならず，大量の微弱な新種の天体，もしくは，本当に広がったガンマ線背景放射の可能性も指摘され始めました．

## 1. はじめに

これまで 4 カ月にわたってフェルミガンマ線宇宙望遠鏡（以下，フェルミ衛星）によるガンマ線観測の最新成果を紹介してきました．ガンマ線バースト[1)]，パルサー[2)]，から始まり，銀河系宇宙線[3)]，近傍銀河[4)]，超新星残骸[5)]，X 線連星[6)]，活動銀河核（今月号掲載，片岡　淳 ほか）と，フェルミ衛星の圧倒的な感度で観測されたガンマ線天体や宇宙線の観測の結果を網羅してきました．最後に本記事ではフェルミ衛星によって検出され始めた微弱なガンマ線天体に焦点を当てて，フェルミ衛星 1 年カタログ，ガンマ線天体の種族研究や明るさの頻度分布 (log $N$–log $S$)，銀河団や暗黒物質の探査，そして，宇宙ガンマ線背景放射に関する成果を紹介し，宇宙天体の形成進化に対してフェルミ衛星が新たに切り込んでいく様子を紹介します．

## 2. フェルミ衛星第一カタログ

フェルミ衛星の約 11 カ月のサーベイデータに

基づいてフェルミ衛星第一カタログが発表されました[7] (http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/1yr_catalog/). これは，2009 年 2 月に発表された 3 カ月間のデータに基づく明るいフェルミ検出天体リスト（以後，3 カ月リスト[8]）に続く公式のフェルミ衛星ガンマ線天体リストです．3 カ月リストでは，10 シグマ以上の有意度で検出された天体 205 個をリストアップしていましたが，第一カタログでは約 4 シグマ以上の有意度までリストアップされ，1,451 個が掲載されています．また，個々の天体のガンマ線に関する情報も増えました．先代 GeV ガンマ線観測装置としてコンプトン GRO 衛星に搭載された EGRET 検出器がその 4 年半の観測期間中に検出した天体が 3 シグマ弱の有意度まで含めて 270 天体であったのに比べると[9]，フェルミ衛星の感度の良さが改めてわかります．なお，同じデータをもとに，第一パルサーカタログ[10]と第一 AGN カタログ[11]も発表され，それぞれの種族天体に特化した詳しい情報が掲載されています．図 1 にフェルミ衛星第一カタログに掲載されたガンマ線天体の全天での位置を示します．

カタログを作成するためのガンマ線天体識別作業は，11 カ月間に蓄積され，200 MeV から 100 GeV のエネルギーの範囲でディフューズクラス（通常の解析で用いられる，バックグラウンド混入の少ないデータ種別）に分類された約 790 万個の光子データに対して行われました．フェルミ衛星の LAT 検出器の点源イメージは大きなエネルギー依存性をもつため，全データを三つのエネルギー帯に分け，それぞれのエネルギー帯でのカウントマップに対して，複数のウエーブレット法を利用して検出が行われました．一部，BZCAT[12] や WMAP[13] のカタログの天体を参照しながら天体探しが行われていますが，基本的には自動検出によります．次に，識別された天体の位置をフィッティングなどの作業を行って精度良く決め，決定誤差とともに求めます．最後に，各種天体カタログとの相関をとることにより，天体の同定作業を行います．時間変動の相関も見つかったものは「同定された」と呼び，時間変動の相関は見つからず位置だけが一致する場合には「関連がある」という呼び方をしています．

表 1 に検出されたガンマ線天体の種族分類を示します．60 個近いパルサーが見つかっています．パルサー星雲 (PWN) と超新星残骸との関連も

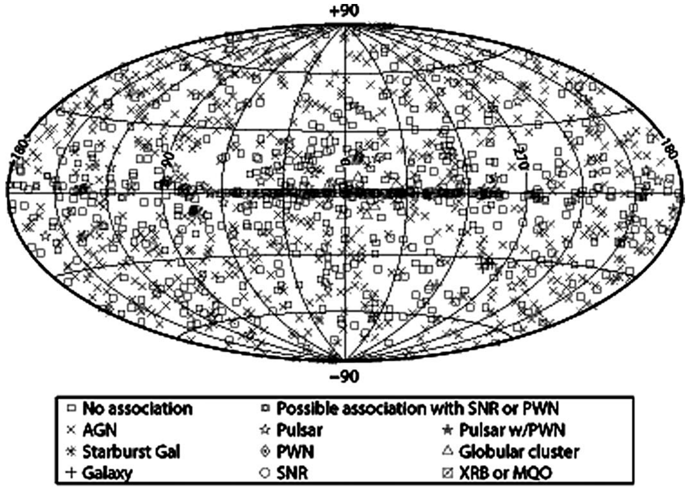


図 1　フェルミ第一カタログに載っている天体の全天分布[7]．1,451 個の天体が掲載されています．相関している天体種族ごとに，印が異なってプロットされています．

表1　フェルミ衛星第一カタログ天体の種族分類[7]とEGRETとの比較.

| 種族 | 関連[a] | 同定[b] | EGRET[c] |
|---|---|---|---|
| パルサー | 7 | 56 | 7 |
| パルサー星雲 (PWN) | 2 | 3 | 0 |
| 超新星残骸 | 41 | 3 | 0 |
| 球状星団 | 8 | 0 | 0 |
| X線連星 | 0 | 3 | 3 |
| BL Lac型ブレーザー | 295 | 0 | 15 |
| FSRQ型ブレーザー | 274 | 4 | 51 |
| 非ブレーザー AGN | 28 | 0 | 3 |
| 種族不明 AGN | 92 | 0 | 8 |
| 通常銀河 | 6 | 0 | 1 |
| スターバースト銀河 | 2 | 0 | 0 |
| 未関連 | 630 | 0 | 185 |

[a] 「関連」は位置が既知天体と相関のあるもの,「同定」は位置だけでなく時間変動やその他の情報により天体が同定されたもの.
[b] 通常銀河は，LMC/SMCの中に複数検出された天体を数えたもの.
[c] EGRETについては，関連と同定を合わせた数.

50個近く発見されていますが，これらはパルサーである可能性も捨てきれません．8個の球状星団との関連は，星団中のミリ秒パルサーの重ね合わせを見ているものと考えられています．ガンマ線連星は三つが同定あるいは関連しています．全体の半数を占めるのがブレーザー天体で，Flat Spectrum Radio Quasar (FSRQ) 型とBL Lac型に分類されるものが大体半々です．ブレーザー天体でない活動銀河核 (AGN) との関連が30個近くあり，これにはCen Aなどの電波銀河も含まれます．90個近くの種族不明の天体が見つかっていますが，これらは暗いブレーザー天体だと考えられています．このほか，スターバースト銀河2個とLMC, SMCなどの近傍銀河からのGeVガンマ線が検出されました．最終的には，630個が未関連となっています．EGRETで検出された天体の約3分の2が未関連だったことと比べると，未関連天体の割合は減少しており，位置決定精度の向上により位置の相関が良くなったためだと考えられます．

今回発表されたカタログには，スペクトル指数，全エネルギー帯のフラックス，五つのエネルギー帯のフラックス，時間変動やスペクトル曲率などの情報も入っていますので，是非活用ください．時間変動とスペクトルの形から，多くの未関連天体はブレーザー天体かパルサーである可能性が大きいことを示しています．特に銀河面から離れたところはブレーザー天体が大多数であろうと考えられます．

## 3.　ブレーザー天体の種族研究

ブレーザー天体は系外ガンマ線天体の大多数を占め，フェルミ衛星第一カタログでは赤方偏移$z=3.10$までのブレーザー天体が載っています．後で述べる宇宙ガンマ線背景放射の起源にもなりうるため，ここではフェルミ衛星でわかってきたブレーザー天体の特徴を簡単に紹介します．今月の片岡他による記事もご覧ください．

ブレーザー天体からの放射は，電波からTeVガンマ線まで広帯域にわたって検出され，基本的に電波からX線の領域のシンクロトロン放射，X線からガンマ線にかけての領域の逆コンプトン散乱の2成分で構成されると考えられています[14]．ブレーザーは，可視域の輝線の強度によりFSRQ型とBL Lac型に分けることができます[15)–17]．この二つは，スペクトルも異なるとされており，逆コンプトン散乱の最大放射波長は，FSRQ型はMeVからGeVガンマ線にかけて，BL Lac型はGeVからTeVガンマ線にかけて存在します．低光度のブレーザー天体ほどBL Lac型のスペクトルをもち，高光度のブレーザー天体ほどFSRQ型になるというシーケンスの考え方も提案されています[18]．EGRETでは主にFSRQ型が検出され，地上のチェレンコフ望遠鏡によるTeVガンマ線観測で検出されているのはBL Lac型がほとんどです．

図2左は，フェルミ衛星が検出したブレーザー天体のスペクトルの光子指数を赤方偏移に対してプロットしたものです[11]．フェルミ衛星は，

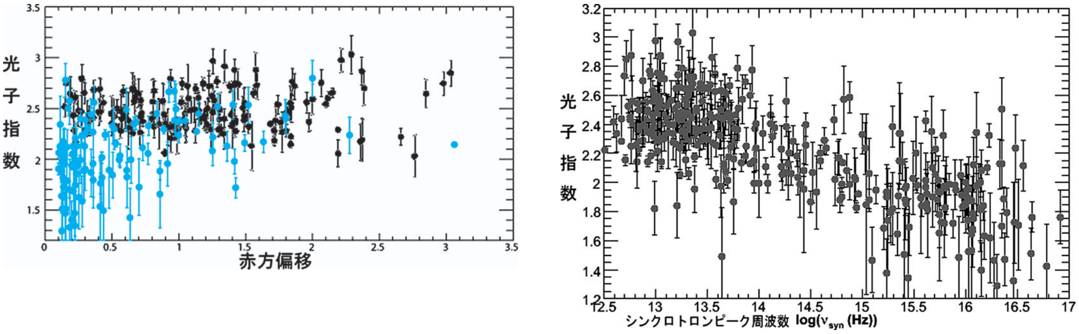


図2　(左)フェルミ衛星で検出されたブレーザー天体のガンマ線スペクトル光子指数を赤方偏移に対してプロットしたもの．黒がFSRQ型，青がBL Lac型．(右)同じく光子指数を多波長スペクトルのシンクロトロン放射のピーク波長に対してプロットしたもの[11]．

EGRETと異なり，FSRQ型とBL Lac型を同じくらいの割合で検出しています．FSRQ型はGeVガンマ線領域では光子指数2–3であり遠方のものまで検出されています．一方，BL Lac型の光子指数は1.5–2.5程度とハードなスペクトルをもち，近傍の天体が主に検出されていることがわかります．フェルミ衛星では，EGRETに比べて1 GeV以上で特に感度の向上が著しいため，EGRETでは検出できなかった暗いBL Lac型天体が多数見つかってきたことになります．図2右は，多波長スペクトルにおけるシンクロトロン放射のピーク波長に対して，GeVガンマ線帯域での光子指数をプロットしたもので，シンクロトロン放射のピーク波長が長くなるにつれて，光子指数が大きくなる傾向がきれいに見えています[11]．

## 4.　他の暗いガンマ線天体

フェルミ衛星以前は，ブレーザー天体が系外ガンマ線天体のほぼ唯一の種族でしたが，フェルミ衛星により，電波銀河，スターバースト銀河が新たにガンマ線を放射することがわかってきました[7]．これらについては，今後さらに数が増えると期待され，統計的な研究が可能となるでしょう．このほか，ガンマ線放射天体として期待されているのが，銀河団と暗黒物質です．

銀河団は，宇宙最大の重力的に閉じた系であり，現在も衝突合体を起こしています．そうした形成合体過程で，衝撃波や乱流が銀河間物質に生じ，それに伴って大規模な粒子加速が起きると予想されています．実際に，多くの銀河団は広がったシンクロトロン電波ハローを伴っていますので，確かに加速された高エネルギー電子が存在しています．まだ確立していないものの硬X線領域での非熱的放射も報告されています[19]．EGRETではガンマ線の上限値のみ示されています[20]．したがって，フェルミ衛星でもガンマ線検出が期待されていますが，現状では検出されていません[21, 22]．上限値から，電子や陽子の量に対する制限がなされていますが，まだ強い制限とはなっておらず，今後のデータ蓄積が待たれます．

暗黒物質については，その候補である超対称性粒子の対消滅に伴うガンマ線放射が理論的に予言されており，フェルミ衛星でも精力的なサーベイがなされています．フェルミ衛星チーム内では，われわれの銀河に伴う暗黒物質を探るために，銀河中心方向のほか，銀河ハローの矮小銀河，暗黒物質のサブハロー探査の解析が行われ，ガンマ線の超過成分やガンマ線輝線の探査が行われていますが，現状では上限値しか得られていません[23, 24]．それでも，ある種の暗黒物質モデルは棄却され始めており，今後観測が進むにつれて上限値も下がり，暗黒物質モデルに強い制限がつくと

期待されています．

## 5. 宇宙ガンマ線背景放射

全天から，ほぼ一様にやってくる宇宙ガンマ線背景放射は，1970年代のSAS-2衛星によって初めて発見され[25]，EGRETによりスペクトルの測定が初めてなされました[26]．この背景放射は，当初から遠方の多数のブレーザー天体からのガンマ線放射の重ね合わせと考えられており，さまざまな理論計算などが行われてきました[27), 28]．その背景放射の測定は，銀河面からの明るいガンマ線放射との切り分けが簡単ではなく，フェルミ衛星の優れた性能による精度良い測定が待たれていました．解析においては，できるだけ宇宙線由来のバックグラウンドを除くため，スタンダードなデータ種別（ディフューズクラス）よりもさらにバックグラウンド混入の少ないデータ種別が用いられました．さらに，明るい銀河面を避けるため，銀緯10度以上の銀河面から離れた領域のデータのみが解析に用いられました．

九つのエネルギー帯でのガンマ線の空間分布を，銀河面放射モデルと明るめの点源の重ね合わせのモデルでフィットすることにより，空から一様にやってくるガンマ線放射のスペクトルが得られます．解析ではバックグラウンドや銀河面放射モデルの不定性も注意深く考慮されました．得られたスペクトルから，宇宙線バックグラウンド混入の寄与を差し引くことにより，図3のような宇宙ガンマ線背景放射のスペクトルが得られました．スペクトルは，EGRETの結果に比べて高エネルギー側で1桁近く弱いもので，光子指数は2.41±0.05となりました[29]．この違いは検出限界によるものではないことがわかっています．また低エネルギー側では，最近のEGRETデータの再解析でも同じような結果が得られていましたが[30]，フェルミの結果では1–100 GeVの高エネルギー側で精度が大きく向上しています．

得られた宇宙ガンマ線背景放射を説明するために，早速，ブレーザー天体の重ね合わせで説明できるかが調べられました．詳細は，フィジカルレビューレターに掲載された論文[31]に譲るとして，得られたブレーザー天体の明るさの頻度分布($\log N$–$\log S$)を図4左に示します．図を見ると，FSRQ型とBL Lac型のどちらもフラックスが$10^{-7}$ ph/cm$^2$/sのあたりで折れ曲がっているのがわかります．これより明るい側は，傾きが−1.5程度であり，3次元空間に一様に分布していると考えることができますが，暗い側は傾きが1程度フラットになっており，遠方のブレーザー天体の数が少なく，宇宙論的な進化が見えていると考えら

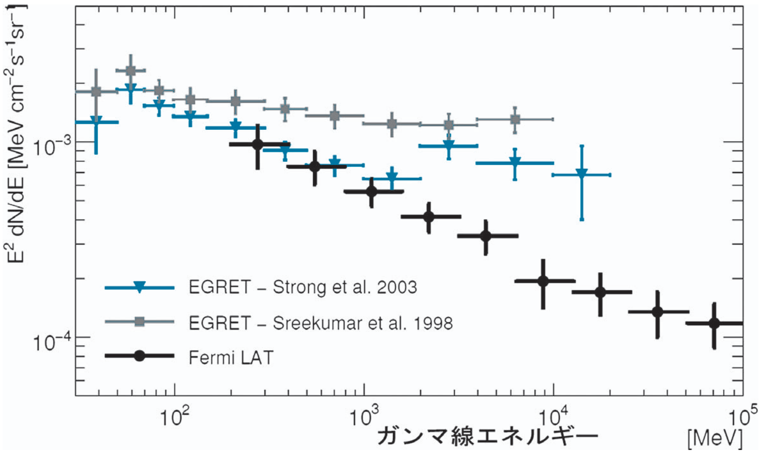


図3　フェルミ衛星で測定された宇宙ガンマ線背景放射（黒）[29]．灰色[26]と青[30]は，EGRETで測定されたもの．

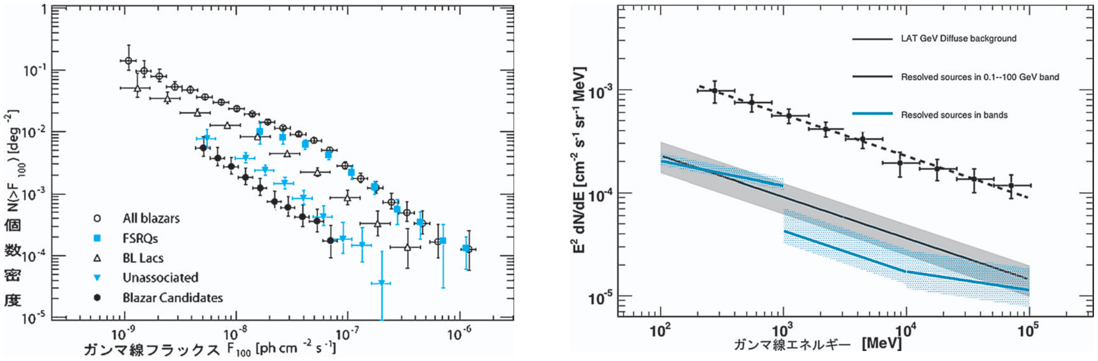


図4　（左）フェルミ衛星で測定されたブレーザー天体の明るさの頻度分布（log $N$–log $S$ の積分形）．天体の種族ごとに印と色を変えています．（右）宇宙ガンマ線背景放射のスペクトル（黒）に対して，フラックスが 9.36 $\times 10^{-10}$ ph/cm$^2$/s 以上の未検出ブレーザー天体の寄与を示したもの（黒線）．灰色は誤差領域を表します．青はエネルギー帯ごとに寄与を評価したもの[31]．

れます．なお，BL Lac 型のほうが暗い側まで検出されているのは，ガンマ線スペクトルがハードであることによります．

次に，得られた log $N$–log $S$ と光子指数分布を用いて，検出された最も暗い天体のフラックス 9.36$\times 10^{-10}$ ph/cm$^2$/s 以上の範囲で log $N$–log $S$ を積分し，このフラックスより明るいが検出されていないブレーザー天体の重ね合わせの寄与を見積もったところ，宇宙ガンマ線背景放射のわずか 16$\pm$1.8%にしかならないことがわかりました[31]．このフラックス以上でのブレーザー天体の表面密度は 0.12$\pm$0.03 deg$^{-2}$ となります．また，フラックスが 0 になるまで積分した場合でも，23$\pm$5%にしかなりませんでした．図4右に宇宙ガンマ線背景放射のスペクトルに対するブレーザー天体の予想される寄与を示します[31]．宇宙ガンマ線背景放射をブレーザー天体で説明できると予想していたモデルに対して，フェルミの結果はそれらを否定するものになっています．これは，観測された log $N$–log $S$ の折れ曲がりが結構明るいところにあるためです．よって，ブレーザー天体以外の非常に暗いガンマ線天体の種族が大量に存在していなければ，宇宙ガンマ線背景放射を説明できないことになります．候補としては，普通の銀河，スターバースト銀河，電波銀河，セイファート銀河などがありますが，まだ定量的に議論できるほどの観測データが得られておらず，フェルミ衛星での今後の進展が期待されます．さらに，これらで説明できない場合には，宇宙初期からの残存暗黒物質からの放射も可能性として出てくることになります．

## 6. 最　後　に

フェルミ衛星は順調に全天サーベイ観測を続けており，まもなく 2 年間のデータが蓄積されます．2010 年 4 月の時点でフェルミ衛星チームの発表した論文が約 70 編（うち，Nature 2 編，Science 8 編），投稿中が約 15 編となっており，順調に成果を出してきました．今後は，フレア天体をポインティングして短時間に統計の良いデータを得る観測も少しずつ入ってきます．データも即座に公開されており，フェルミ衛星チーム以外の研究者によるデータ解析の論文も出始めております．是非，日本の研究者もデータ解析，多波長観測，理論的考察を積極的に行っていただき，フェルミ衛星の切り開く高エネルギー宇宙物理の発展に，よりいっそう参加して欲しいと思います．

## 参考文献


1) 大野雅功 ほか，2010,（ガンマ線バースト）天文月報 103, 315
2) 中森健之 ほか，2010,（パルサー）天文月報 103, 324
3) 水野恒史 ほか，2010,（銀河系宇宙線）天文月報 103, 366
4) 内山泰伸 ほか，2010,（近傍銀河）天文月報 103, 374
5) 片桐秀明 ほか，2010,（超新星残骸）天文月報 103, 438
6) 田中孝明 ほか，2010,（X 線連星）天文月報 103, 430
7) Abdo A. A., et al., 2010, ApJS 188, 405
8) Abdo A. A., et al., 2009, ApJS 183, 46
9) Hartman R. C., 1999, ApJS 123, 79
10) Abdo A. A., et al., 2010, ApJS 187, 460
11) Abdo A. A., et al., 2010, ApJ 715, 429
12) Massaro E., et al., 2009, A&A 495, 691
13) Wright S. S., et al., 2009, ApJS 180, 283
14) Ghisellini G., 1989, MNRAS 236, 341
15) Stocke A. W., et al., 1991, ApJS 76, 613
16) Urry C. M., Padovani., 1995, PASP 107, 803
17) Marcha M. J. M., et al., 1996, MNRAS 281, 425
18) Fossati G., et al., 1998, MNRAS 299, 433
19) Nevalainen J., et al., 2004, ApJ 608, 166
20) Reimer O., et al., 2003, ApJ 588, 155
21) Mori M., 2009, astro-ph/0912.3346
22) Abdo A. A., et al., 2010, ApJL 717, L71
23) Abdo A. A., et al., 2010, ApJ 712, 147
24) Abdo A. A., et al., 2010, PRL 104, 091302
25) Fichtel C. E., et al., 1978, ApJ 222, 833
26) Sreekumar P., et al., 1998, ApJ 494, 523
27) Dermer C. D., 2007, AIP Conf. Proc. 921, 122
28) Inoue Y., Totani T., 2009, ApJ 702, 523
29) Abdo A. A., et al., 2010, PRL 104, 101101
30) Strong A. W., et al., 2004, ApJ 613, 956
31) Abdo A. A., et al., 2010, ApJ に掲載予定，astro-ph/1003.0895


## Faint Gamma-ray Sources Observed with Fermi-LAT


**Yasushi Fukazawa**

*School of Sciences, Hiroshima University, 1–3–1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739–8526, Japan*

**Jun Kataoka**

*Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 3–4–1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169–8555, Japan*

**Tadayuki Takahashi**

*Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 3–1–1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252–5210, Japan*

**on Behalf of the Fermi LAT Collaboration**



Abstract: Fermi-LAT detected 1,451 sources above 4 sigma level by the 11-month all-sky survey. These sources include blazars and pulsars, together with many other classes of celestial objects. Precise population studies of blazars, which are half of detected sources, have become available. The break of the log$N$-log$S$ distribution of the gamma-ray sources is for the first time found and it is possibly due to the cosmological evolution. On the other hand, no significant signals from galaxy clusters or dark matter have been yet detected with a tighter upper limit than ever. Extragalactic cosmic gamma-ray background (EGB) was also measured more accurately than ever, and was found that the spectrum is steeper than ever known. Contribution of unresolved blazars, estimated from the log $N$–log $S$ relation, is only 20% of the EGB, and therefore a large amount of very faint new classes of objects or a truly diffuse gamma-ray emission is indicated.