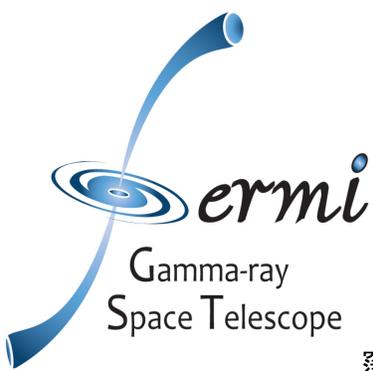


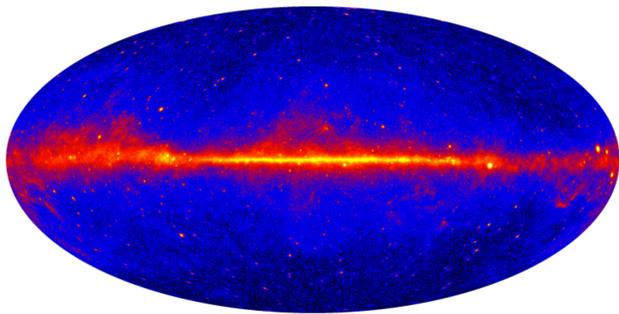
# フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡による 2013年の成果



深沢泰司、大杉節、水野恒史、高橋弘充、大野雅功、田中康之(広島大)、  
河合誠之、谷津陽一、有元誠(東工大)、片岡淳(早稲田大)、  
高橋忠幸、Lukasz Stawarz、尾崎正伸、佐藤理江、小高裕和、**林克洋**(ISAS/JAXA)、  
片桐秀明(茨城大)、釜江常好、牧島一夫(東京大学理学研究科)、Shiu-Hang Lee(理化学研究所)、  
浅野勝晃、林田将明、花畑義隆(東京大学宇宙線研究所)、田島宏康、福井康雄、山本宏昭、奥村暁(名古屋大)、  
窪秀利、田中孝明(京都大)、山崎了(青山学院大)、内山泰伸(立教大)、中森健之(山形大)、勝田隼一郎(SLAC)、  
他 Fermi LAT collaboration

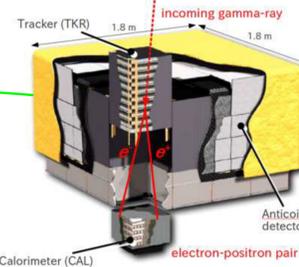
フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡(フェルミ衛星)は、日米欧の国際協力により開発された大型のガンマ線天文衛星である。その主検出器であるLAT(Large Area Telescope)は、20 MeVから 300 GeV以上までの広いエネルギー帯域に感度を持つ全天サーベイ型の検出器であり、我々日本グループの貢献によって開発された。2008年6月の打ち上げ以降、5年以上に渡って順調に観測を続け、太陽フレアやガンマ線バーストなどの突発現象の他、パルサーや巨大ブラックホールにおけるガンマ線放射機構の解明、宇宙線の発生起源ならびに暗黒物質の探査など、高エネルギー宇宙物理学における様々なサイエンステーマについて、数々の著しい成果を挙げている。本発表では 2013年以内に得られた成果のうち代表的なものについて、その概要を報告する。

## フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡



フェルミ衛星は、2008年6月11日に打ち上げられた。高度~550 kmの上空をおよそ 90分かけて一周している。全天サーベイ型検出器(LAT)と、突発天体観測専用の検出器(GBM)を有する。

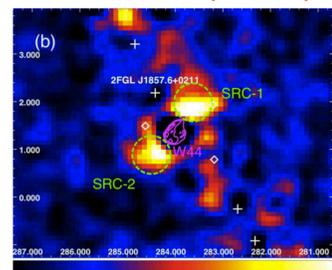
左図は、LATの5年間に渡る観測で得られたガンマ線全天マップ(>1 GeV)。これまでの観測で2000個近くに及ぶガンマ線点源が検出されている(Nolan+2012)。



LAT(Large Area Telescope)  
 • シリコンストリップ型検出器を多層化し、電子・陽電子対の飛跡を検出  
 • CsI カロリメータでエネルギーを測定  
 • エネルギー帯域: 20 MeV - >300 GeV  
 • 約3時間で全天をカバー

GBM(Gamma-ray Burst Monitor)  
 • NaI(Tl)×12+BGO×2 で構成  
 • エネルギー帯域: 8 keV - 30MeV

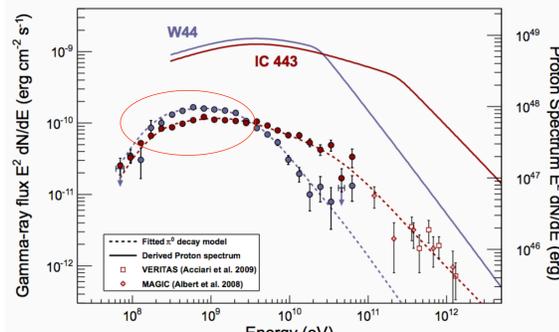
## 超新星残骸(SNR)における宇宙線加速



W44とその周辺領域のガンマ線カウントマップ(SNR本体のガンマ線領域は差し引いてある)。周辺の分子雲領域がガンマ線で明るくなっている。(Uchiyama+2012)

宇宙線核子は星間物質と衝突することで  $\pi^0$ 中間子を生成し、その崩壊過程でガンマ線が放射される。従って、このガンマ線を観測することで、宇宙線加速起源の現場に迫ることができる。

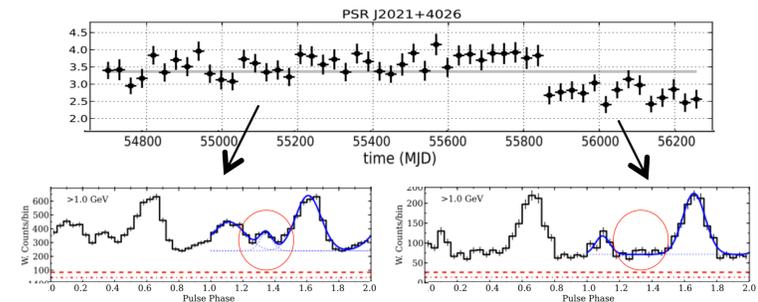
銀河系内宇宙線の最も有力な加速起源候補として SNR の研究が数多くなされてきたが、宇宙線の主要な成分である陽子の加速に対する明確な証拠は得られていなかった。そのような中、Tanaka, Uchiyama らは、 $\pi^0$ 中間子の崩壊によるガンマ線の ~100 MeV の特徴的なスペクトルに着目し、LAT のエネルギー帯域で最もフラックスが高い SNR、IC443 と W44 の解析を行った。その結果、ガンマ線で明るい帯域において、1 GeV付近で盛り上がり、~100 MeV付近では急激にフラックスの下がる  $\pi^0$ 中間子起源特有のガンマ線スペクトルが検出された(右図)。これは、当 SNR において陽子が加速されている明確な証拠である。これらの結果は、米国サイエンス誌に掲載され、2013年「ブレークスルー・オブ・ザ・イヤー」トップ10にも選出された。また、2月には JAXA プレスリリースとしても報告されている。



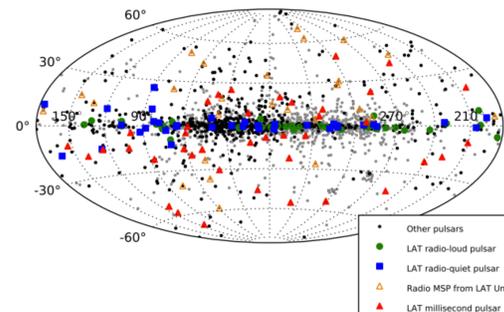
プロットがFermiによるガンマ線データ。破線は $\pi^0$ 中間子の崩壊で予想されるガンマ線スペクトル、実線は親粒子である宇宙線陽子のスペクトル。(Ackermann+13)

## ガンマ線パルサー

5年間に渡る観測を通じて、LAT は全天で117個ものガンマ線パルサーを検出した(右図 Abdo+2013)。それらのデータを使ったガンマ線パルサーの理論的研究の功績がたたえられ、2013年1月には Alice や Romani が高エネルギー宇宙物理学の権威であるロッシン賞を受賞した。個々のガンマ線パルサーの研究においても、白鳥座領域(Allafort+2013)や、かに星雲のガンマ線パルス変動(Mayer+2013)などが話題となった。ここではそのうち、白鳥座領域パルサーの観測結果について紹介する。



Tibaldo と Razzano らは、白鳥座領域の若いガンマ線パルサー PSR J2021+4026 に着目し、Fermi による長期間観測を通じて、当パルサーが 100 MeV 以上の帯域で、1週間以内のタイムスケールで 20%程度急激な減光をしていることを発見した(左図上)。その減光と同時に、スピンドアウンレートの周波数がわずかに上昇し、有意なパルスプロファイルの変化が確認された(左図下)。フラックスとパルスプロファイルの同期的な変化は、これらの変動現象がパルサーを起源としていることの証拠である。これまでも電波の波長帯域では、このような variability を見せる特徴的なパルサーは発見されているが、ガンマ線の帯域では初めてとなる。こうした変動は、パルスのビーミング放射の変化によるものだと考えられ、パルサーの突発的な磁場構造の変動によってもたらされたものと思われる。

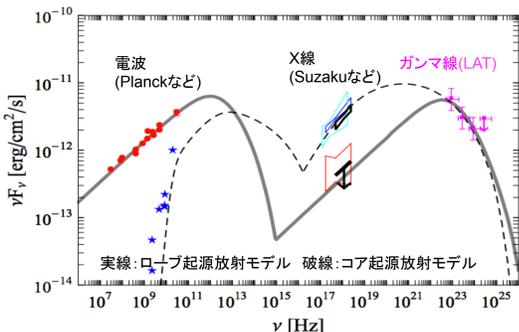


## 活動銀河核(AGN)

AGNの研究においては、ガンマ線の観測に加えて、X線や可視光なども交えた多波長観測にもとづく研究(Katsuta+2013, Itoh+2013, Filippo+2013など)の他、超高エネルギー光子の検出やその放射プロセスの研究(Tanaka+2013)などが進められた。

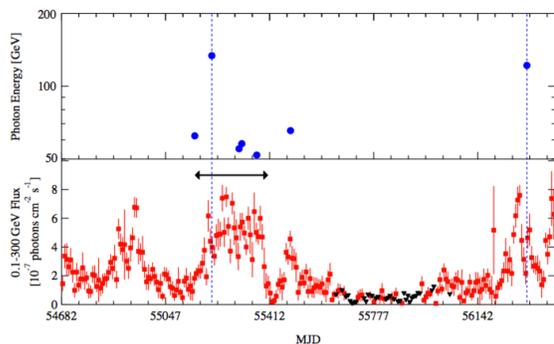
### 1. 電波銀河 Centaurus B (Cen B) の多波長観測 (Katsuta+2013)

Fermi によるガンマ線観測の他、Suzaku による周辺の電波ローブのX線観測が行われた。電波ローブの広がったX線とガンマ線の相関を考慮すると、Cen Bからの放射プロセスとして二つのシナリオが考えられる。X線フラックスがこの上限とほとんど変わらない場合、観測されるガンマ線は電波ローブ中の逆コンプトン散乱を起源とし、ローブ内では効率のよい電子加速が起きていることが示唆される。一方でX線のフラックスが上限を大きく下回る場合、ガンマ線はローブ外の、Cen B本体のジェットの核でつくられると思われる。どちらのシナリオでも、Cen B のブロードバンドスペクトルデータを説明できる(右図)。



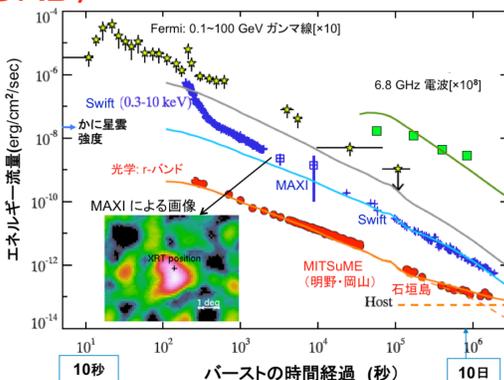
### 2. ブレーザーからの超高エネルギーガンマ線光子の検出 (Tanaka+2013)

$z = 1.1$  (80億光年)の距離にあるブレーザー PKS 0426-380 から二発の超高エネルギーガンマ線(>100 GeV)を検出した。これは既知のAGNとしては、最遠の超高エネルギーガンマ線源となる。その超高エネルギー光子の放出は、当天体のフレアと同期していると思われる(左図)、一度目の放出ではスペクトルがハード( $\Gamma \sim 1.4$ )になることも確認された。このような  $z \sim 1$ 程度の天体から >100 GeVの超高エネルギーガンマ線が検出されることは、最近の宇宙背景放射の研究でも「観測できる限界」として予言されており(Inoue+13など)、本観測結果はその理論的研究とも一致するものである。



## ガンマ線バースト(GRB)

2013年4月27日、Fermi はこれまで数々の衛星で検出・観測された GRB の中でも、極めて明るい GRB (GRB130427A)を検出した(Ackermann+2013)。この GRB からは、20時間に及ぶ長時間有意なガンマ線が検出され(右図)、95 GeVに達する高エネルギー光子も検出された。



東工大などの研究グループを中心に、残光がMAXIや光学望遠鏡でも観測され、発生源が38億光年と、比較的近傍で発生したGRBであることが分かった。その即時放射の特徴は他のGRBと類似しているが、残光については、これまで広く受け入れられてきたモデル(残光の非熱的放射は外部衝撃で加速された電子のシンクロトロン放射)では説明し難いものであり、従来のGRBの放射モデルが改めて見直されつつある(Preece+2013)。これらの結果は、米国サイエンス誌にも掲載されるとともに、11月にJAXA プレスリリースとしても報告された。

GRB130427Aの多波長バンドでのフラックス時間変化 (http://www.hp.phys.titech.ac.jp/GRB130427Aより)

## References

• Nolan, P., et al. 2012, ApJS, 199, 31  
 • Ackermann, M., et al. 2013, Sci, 339, 807  
 • Abdo, A., et al. 2013, ApJS, 208, 17  
 • Allafort, A., et al. 2013, ApJ, 777, L2  
 • Mayer, M., et al. 2013, ApJL, 775, L37  
 • Katsuta, J., et al. 2013, A&A, 550, A66  
 • Tanaka, Y., et al. 2013, ApJL, 777, L18  
 • Ackermann, M., et al. 2013, Sci, 1242353  
 • Preece, R., et al. 2013, Sci, 1242302