

フェルミ衛星が解き明かす「加速器」 パルサーとパルサー星雲

中 森 健 之¹・河 合 誠 之²・金 井 義 和³

〈東京工業大学理工学研究科基礎物理学専攻 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

¹ e-mail: nakamori@hp.phys.titech.ac.jp

² e-mail: nkawai@hp.phys.titech.ac.jp

³ e-mail: kanai@hp.phys.titech.ac.jp

高 橋 弘 充

〈広島大学宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

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

on Behalf of the Fermi LAT Collaboration

フェルミ衛星搭載 LAT 検出器は、過去最高感度の全天観測によって 1 年間におよそ 50 個のガンマ線パルサーを検出しました。その約半数は LAT によって初めてパルサーと判明したガンマ線源です。これらと電波パルサーとして既知だった残り半数とは、電波が弱いことを除いて違いは見られません。また、近隣のミリ秒パルサーからのガンマ線パルスの検出にも初めて成功しました。得られた詳細なスペクトルとパルス波形は放射領域が中性子星表面から遠いことを強く示しています。一方でパルサー星雲から得られたスペクトルを TeV ガンマ線観測結果と合わせることで、逆コンプトン放射の全貌が明らかとなりました。電子加速機構や磁場環境の理解が大きく前進すると期待されています。

1. ガンマ線パルサーとフェルミの夜明け前

宇宙の灯台とも呼ばれるパルサーは非常に正確な周期的パルスを出す電波源として発見され¹⁾、その正体は高速回転する中性子星であることが知られています。中性子星の自転と同期したパルスの周期はわずかずつ長くなっている、すなわち回転速度が一定の割合で減速していることがその後の観測で判明しました。磁気双極子放射によって回転エネルギーを電磁波の形で放出していると考えたときに、回転周期とその増加率から中性子星

表面の磁場の大きさを見積もることができます。これによってパルサーは典型的に 10^{12} ガウスという非常に強い表面磁場をもつことがわかり、なかには量子電気力学的な効果が現れる 4.4×10^{13} ガウスを超えるような強い磁場をもつパルサー（マグネター）も見つかっています。このようにパルサーは地上では再現できないような極限状態の実験室として、あるいは一般相対論の検証にも使える正確な時計として、天文学を超えた広い分野から注目されています。

現在では 1,800 を超えるパルサーの存在が確認されていますが²⁾、そのほとんどは電波観測に

よって発見されたものです。一部のパルサーは X 線でパルスが見つっていますが、可視や赤外では限られたものからしか見つかっていません。数十 MeV^{*1}を超える高エネルギーガンマ線領域では、気球実験によってカニパルサー（33 ミリ秒周期）が最初に見つかりました³⁾。SAS-2 衛星（1972 年打ち上げ）はこの結果を確認しただけでなく Vela（帆座）パルサー（89 ミリ秒周期）も検出しています⁴⁾。つづく COS-B 衛星（1975 年打ち上げ）はさらに、Vela パルサーのパルス位相（最も明るくなるタイミング）がガンマ線と電波で異なること、パルス波形も異なることを明らかにしました⁵⁾。これは電波とガンマ線では放射領域や放射機構が異なることを示唆しています。1990 年代にコンプトン (CGRO) 衛星の COMPTEL 検出器 (Imaging Compton Telescope) と EGRET 検出器 (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) は合わせて七つのパルサーから周期的なガンマ線放射を検出しました⁶⁾。そのうち六つはすでに電波によってその周期や周期増加率が知られているものでしたが、ゲミングと呼ばれるパルサーは素性が異なります。ゲミングはまずガンマ線点源として最初に発見されましたが、電波では検出されず X 線観測によってパルサーであることが明らかとなった天体で、その後ガンマ線でもパルスが確認されました。

こうしてガンマ線パルサーには電波で明るいものと暗いものが存在することが明らかとなりました。同時に、パルサーを統一的に理解しようとしたときに電波の明るさ以外に違いはあるのか、という疑問が浮かび上がってきました。両者をつなぐ手がかりは共通点であるガンマ線のパルス放射が握っているはずですから、ガンマ線パルスの放射機構を調べるのが非常に重要になります。またガンマ線パルサーは、電波で放出するエネ

ギーの 100 万倍以上をガンマ線として放出しています。この点でもエネルギーの大きな流れを理解するためにはガンマ線が重要です。EGRET で測定されたガンマ線スペクトルとパルスの形状を説明するさまざまなモデルが提唱されました (2.2 で少し詳しく説明します)。しかしながら EGRET では感度が不十分だったため、十分な光子統計が得られず、個々のパルサーのガンマ線放射機構や放射領域の推定に至りませんでした。また系統的な研究もサンプル数が少ないためにかゆいところまで手が届かない状態が続いていました。EGRET の後継であるフェルミ衛星は、パルサーの統一的理解を目指す研究者にとっては待ちに待った装置だったのです。

2. フェルミ衛星の登場

フェルミ衛星は 2008 年 6 月 11 日に打ち上げられました。主検出器である大面積望遠鏡 (Large Area Telescope; 以下 LAT) は高エネルギーガンマ線に対する巨大な有効面積、全天の 1/5 という広い視野、不感時間の低減など、EGRET に比べて格段に優れた性能をもっており、20 MeV–300 GeV^{*2}以上という広いエネルギー帯域を 3 時間ごとに全天観測します⁷⁾。パルサーは銀河面上に多く分布していて、GeV 帯域では銀河面拡散ガンマ線が明るいバックグラウンドとなります。そのため EGRET のパルサー観測では苦労を強いられました。LAT は角度分解能が良くなる高エネルギー帯域の感度が飛躍的に向上したため、点源であるパルサーの放射を効率良く捕らえることができるようになりました。その期待された性能を余すところなく発揮して、LAT は 1 年間の継続観測で約 50 個のパルサーを検出することに成功し、LAT パルサーカタログを発表しました⁸⁾。図 1 に LAT パルサーの分布図、図 2 にパルス波形の例

*1 MeV=10⁶ 電子ボルト

*2 GeV=10⁹ 電子ボルト

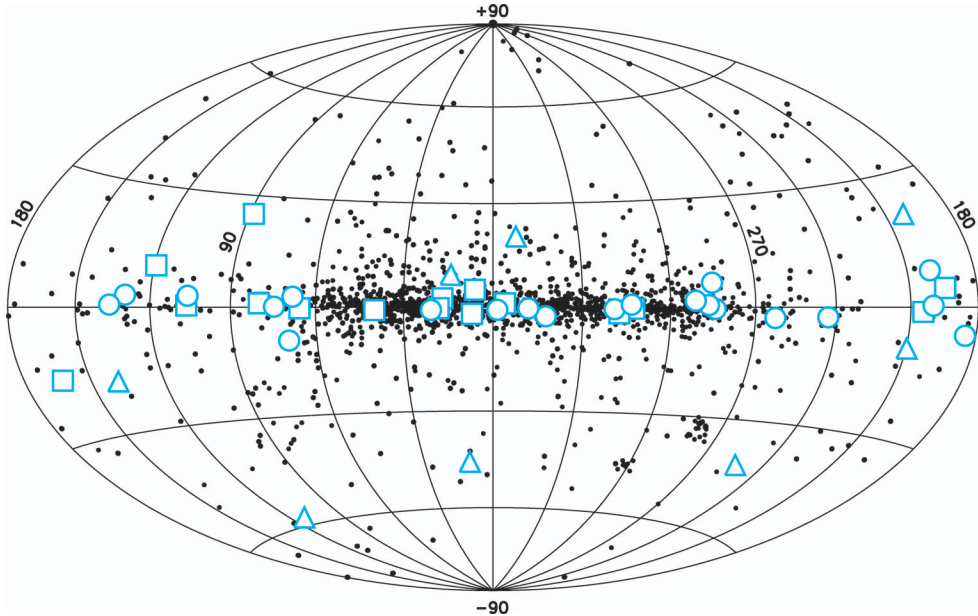


図1 LATが1年間に検出したパルサーの銀河座標上分布⁸⁾。丸：電波パルサー，四角：ガンマ線で見つかったパルサー，三角：ミリ秒パルサー。黒点は既知の電波パルサーの位置。

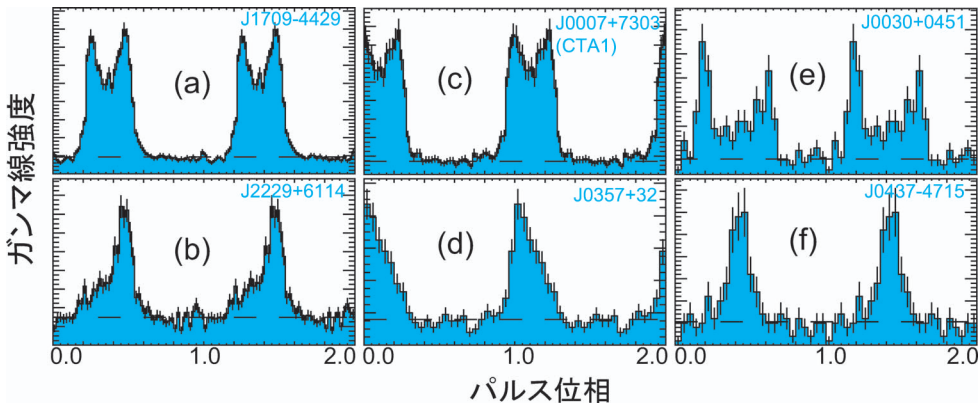


図2 LATが検出したガンマ線パルサーのパルス波形例⁹⁾。電波パルサー (a, b)，ガンマ線で見つかったパルサー (c, d)，ミリ秒パルサー (e, f) のいずれも，細い二山か幅広い一山の波形をもっています。

を示します。ガンマ線パルサーの数を飛躍的に増やしたことも自体も大切な成果ですが、そのほかにも非常に興味深い結果がたくさんあります。ここではその中から主だったものを紹介します。

2.1 ガンマ線でパルサーを見つける時代

われわれLATチームが最初に発表した論文はCTA1と呼ばれる超新星残骸の中から、これまで知られていなかったパルサー（周期316ミリ秒）

を発見したというものでした⁹⁾。つまり、パルサーであることがガンマ線でわかった最初の天体だったのです。図2(c)がそのパルス波形です。1にも書いたとおり、ゲミングはガンマ線で発見された天体でしたが、パルサーであることを突き止めたのはX線の観測でした。CTA1の中心部にもパルサーと思われるスペクトルをもつX線点源の存在は知られていましたが、これまでどの波長

でもパルス周期の発見には至っていませんでした。CTA1 パルサーの場合 EGRET の 5 年にわたる観測でガンマ線源が存在することはわかっていましたが¹⁰⁾、放射位置決定精度が十分でなかったためこのガンマ線源がパルサーなのかあるいは周囲の超新星残骸なのかを特定するには至りませんでした。LAT はこれをたった 2 カ月余りの観測で成し遂げたしたわけですから、その性能の違いがわかっていただけだと思います。未知のパルサーから周期を見つけ出すためには、高い光子統計が必要ですから、LAT の高感度・高角度分解能のおかげで初めて実現したと言えます。しかしここで忘れてはならないことは、効率良く系統的にパルス探索を行うアルゴリズムの改良など、LAT の打ち上げ前から入念な準備が行われていたことです。万全の態勢で打ち上げを迎えたことはこの成功の大きな要因でした。

CTA1 パルサーの発見を皮切りに、LAT はこれまでに全部で 25 個の電波が弱いガンマ線パルサーを検出しました。つまり、ガンマ線パルサーでは電波で暗いものは決して珍しい存在ではなく、およそ同数程度存在することがわかりました¹¹⁾。LAT による発見を受けて世界中の電波望遠鏡による対応パルサー探査が行われ、数個が電波パルサーでもあることがわかりました¹²⁾。しかし、残りは精密な観測でもやはり電波で暗いことが確認されています。

電波と比べるとガンマ線観測の感度はやはり劣りますが、近傍の明るいものに限れば今やパルサーはガンマ線だけで探すこともできるようになりました。電波で暗いパルサーが普遍的に存在するという LAT の観測事実は以下のような仮説で自然に説明できます。ガンマ線パルサーは通常電波ビームをもっているが、磁極付近から放射される電波ビームはガンマ線ビームよりもずっと細いためにビームが地球を向かないことがある、というものです。逆に言うと、ガンマ線の放射は大きな立体角に広がったビームであることが予想で

き、2.2 で述べるスペクトルと併せてガンマ線放射モデルを大きく制限することになります。

LAT は常に全天観測を行っているため、すべてのパルサーを常時モニターすることができる点は大きな特色です。例えば、中性子星表面で地震のように殻が破壊されたときに生じるグリッチと呼ばれる突発的な回転周期の減少を、LAT は逃さず捕らえることができます。視野が限られている電波や X 線望遠鏡では難しい観測に LAT は貢献できるので、他波長と連携してパルサーの理解が大きく前進すると期待されています。

2.2 放射モデルに制限

パルサーは回転する磁石なので起電力が発生しますが、パルサーの磁気圏にはその起電力を打ち

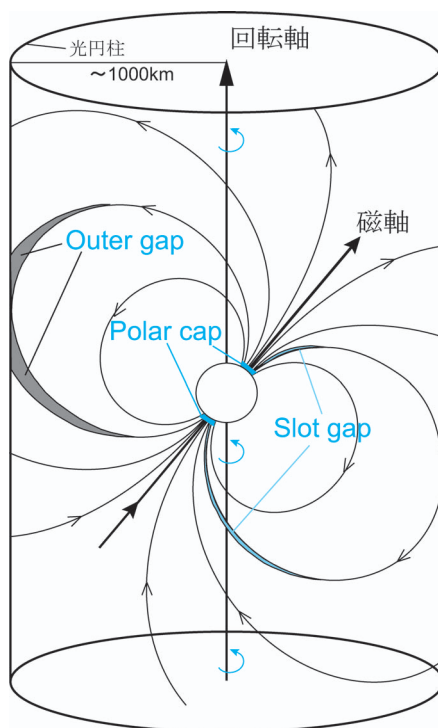


図3 各モデルが予言するパルサー磁気圏のガンマ線放射位置¹³⁾。磁極近くの Polar cap、閉じた磁力線に沿って磁極から外に広がる Slot gap、そして光円柱付近に形成される Outer gap があります。光円柱とは、パルサーと共に回転すると光速になる場所です。

消すようにプラズマが分布していると考えられています。しかしその一部で電場が0にならないプラズマの「ギャップ」が存在していて、電場で加速された電子・陽電子が磁力線に沿って運動する際に曲率放射でガンマ線を放射します。このギャップのできる場所、つまりガンマ線パルスの放射位置は長年議論されてきました。

EGRET で観測されたガンマ線スペクトルとパルスの形状を再現するモデルは大きく3種類に分類され、それぞれギャップの形成場所が異なります(図3)。パルサーの磁極付近を预言する polar cap モデル¹⁴⁾、磁極付近から遠ざかる方向にシート状に伸びた領域を主張する slot gap モデル¹⁵⁾、そして光円柱付近まで扇状に広がった磁気圏外縁部を主張する outer gap モデル¹⁶⁾です。パルサーの1周期を平均したスペクトルは数 GeV 付近で指数関数的に減衰する(カットオフ)ことが示唆されており、さらに高いエネルギー帯である TeV ガンマ線の観測もそれを(間接的にですが)支持しています¹⁷⁾。これはガンマ線を出す加速された電子の最大エネルギーを反映していて、上記三つのモデルのすべてで再現される特徴です。しかし、放射領域が中性子星の磁極近くだった場合、磁場が非常に強いためにガンマ線が電子・陽電子対生成を起こして消えてしまう効果が高エネルギー光子ほど無視できなくなります。その結果、パルサーの放射スペクトルはさらに急激なカットオフ(超指数関数的とも呼びます)を起こすことが予想されます。

Vela パルサーは全天で最も明るい定常ガンマ線点源で、EGRET でもスペクトルが得られていました。しかし 10 GeV 付近より高エネルギー側では統計が足りずに、上記モデルによるカットオフの違いを識別することができず、LAT が待ち望まれていたのです。そして満を持して LAT は素晴らしい精度のスペクトルをわれわれに見せてくれました¹⁸⁾。図4に得られたエネルギースペクトルを EGRET の結果とともに示します。低エネ

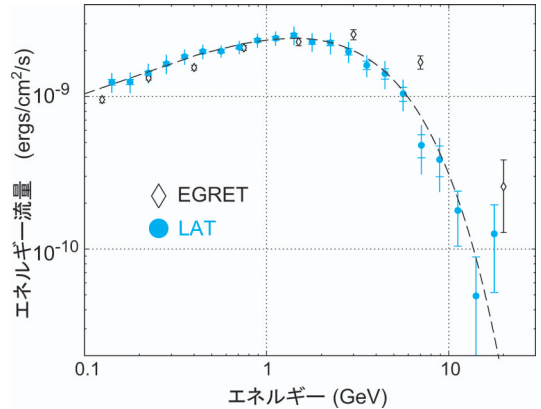


図4 Vela パルサーのスペクトルとモデル曲線¹⁸⁾。黒が EGRET、青が LAT の観測データで、破線はべき型+カットオフのモデル曲線です。「急でない」カットオフであることが決まりました。

ルギー側では系統誤差が、高エネルギー側では統計誤差が支配的ですが、非常に良い精度でカットオフを測定していることがわかります。LAT のデータ点を、べき型とカットオフを組み合わせた関数 $E^{-a} \times \exp(-E/E_c)^b$ で表すと、カットオフの強さを表すパラメーター b は 0.88 ± 0.04 と決まりました。磁極付近でガンマ線が放射されるモデルでは $b=2$ が予想されていたから、統計誤差のみを考慮したときにこのモデルは棄却されることがわかったのです。残り二つのモデルは $b=1$ 程度を预言していますから、スペクトルの面からは両者は共に生き残ったことになります。LAT の結果では b が 1 より小さくなっていますが、パルス位相ごとに少しずつ異なるスペクトルを重ね合わせて見ているためだと考えられています。このスペクトルの形状は、Vela パルサーに限った話ではないことも LAT によって判明しました。電波で明るいパルサーも暗いパルサーでも「急でない」カットオフによって広い立体角をもった領域でのガンマ線放射が共通であることを突き止めました。

LAT はパルス波形の詳細な研究も可能にしました。Vela パルサーの波形は非常に鋭い二山のパ

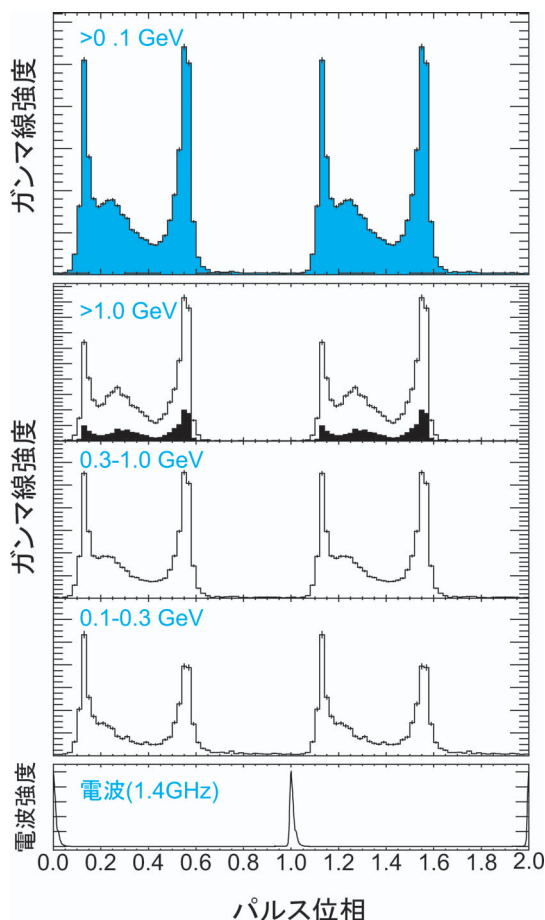


図5 Vela パルサーのエネルギー別ガンマ線波形と電波波形⁹⁾。エネルギーが高くなるほど二山の高さの比が変わり、「橋」にも新しい山が現れ、その位置がずれていく様子がわかります。

ルスとその間をつなぐ「橋」と呼ばれる構造をもつことが知られていました。EGRET でわかってきたエネルギーが高くなるにつれて二山の高さの比が変化することを確認しただけでなく、LAT は高い統計を生かして「橋」の部分に新たなピークが存在すること、さらにその新たなピーク位置がエネルギーに応じて動いていくことを明らかにしました(図5)。また Vela パルサーは非常に明るいため、かつてない精度でパルス位相ごとに分解したスペクトル解析が可能となりました¹⁹⁾。ガンマ線放射領域の詳細な空間的な構造やギャップ

の構造などがしだいに明らかになるでしょう。

2.3 ミリ秒パルサーと球状星団

ミリ秒パルサーとは、パルサーとしての活動を停止した老いた中性子星(1-100億歳)が近接連星系を組んで伴星からガスが降着することによって角運動量を獲得し、回転周期が数ミリ秒まで再加速されたものです。パルサーの「検出しやすさ」は回転エネルギー放出率(スピンドウン光度)と距離が指標となります。スピンドウン光度が大きいほど、距離が近いほど地球では明るく見え、観測しやすくなるわけです。ミリ秒パルサーは若いパルサーに比べてスピンドウン光度は2-3桁も低いため、遠方になると観測がより難しくなります。LATは地球近傍にある九つのミリ秒パルサーからのガンマ線パルスを検出し、このような古いシステムでもガンマ線を出すくらいにパルサーは復活できることを初めて確かなものにしました^{20), 21)}。そしてLATが捕らえたスペクトルやパルスの形状は他の若いガンマ線パルサーと明らかな差異は認められず、「急でないカットオフ」スペクトルと「細い二山または広い一山」のパルスを共通してもつことを明らかにしました。このことから、磁極から離れた領域からガンマ線が放射されるというガンマ線パルサーの普遍的な性質が、ミリ秒パルサーにも当てはまることがわかりました。

球状星団は、年齢100億年にも達する古い星が10万個以上高密度に集まった集団です。その一つ、きょしちょう座47(以下、47 Tuc)をLATはガンマ線源として検出しました²²⁾。球状星団の中心は星の密度が高く、星の遭遇によって近接連星系が形成される確率が高いため、ミリ秒パルサーやその前身であるX線連星系が多数存在します。そして47 Tucでも23個のミリ秒パルサーの存在が電波観測から知られています。LATは球状星団に属さない近傍のミリ秒パルサーからのガンマ線を検出しましたが、47 Tucは距離が遠いために(5.1 kpc)、一つひとつのパルサーの信号を検出す

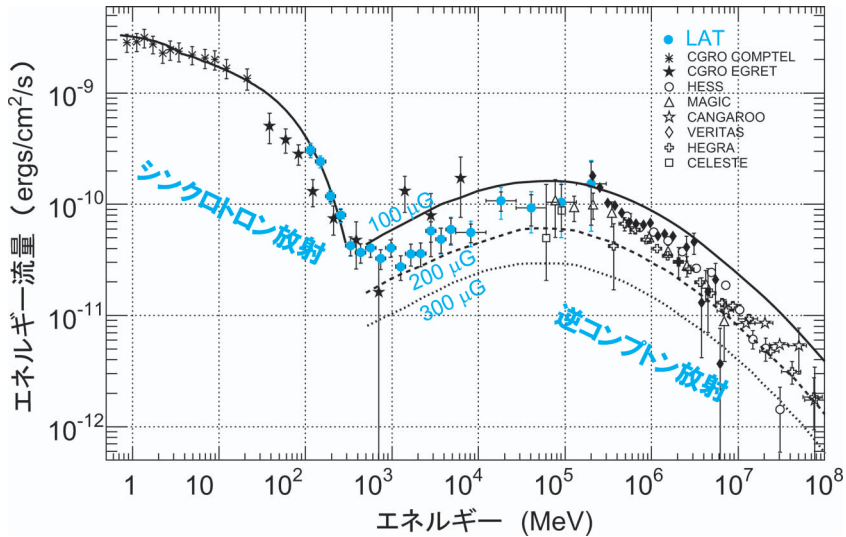


図6 カニ星雲のエネルギースペクトル²⁴⁾。LATの観測点(青丸)を他装置による観測結果とともに示します。TeVガンマ線の観測点と隙間なくつながって逆コンプトン放射全体を捕らえ、シンクロトロン放射とのつなぎ目も精度良く決まりました。仮定する磁場に強さに応じた逆コンプトン放射のモデル曲線と比較して磁場が求められました。

ることは困難です。しかし、47 Tucのガンマ線スペクトルは近傍のミリ秒パルサーのものと同様の特徴(「急でない」カットオフ)を示し、47 Tucに含まれる多数のミリ秒パルサーのガンマ線放射をまとめて観測したものと考えられます。またガンマ線強度からは、47 Tucに存在するミリ秒パルサーの総数は60個以下と推定されました。

3. 終段加速器パルサー星雲

パルサー磁気圏で加速された電子・陽電子は、開いた磁力線に沿って光円柱の外へと相対論的プラズマ流として流れ出しており、これをパルサー風と呼びます。パルサーは超新星爆発とともに生まれるので、通常その周囲は爆発噴出物で満たされています。パルサー風はこれらの周囲の物質と衝突して衝撃波を形成し、ここでも粒子加速が起こっていると考えられています。

この加速された相対論的電子が、磁場にまきついて運動する際に電波からX線にわたる広い帯

域でシンクロトロン放射で輝きます。これをわれわれは「パルサー星雲」と呼ばれる天体として観測しています。近年目覚ましい進歩を見せているTeV^{*3}ガンマ線の観測、特にH.E.S.S.望遠鏡による銀河面探査によって多数のパルサー星雲とその候補天体が見つかりました²³⁾。宇宙マイクロ波背景放射、宇宙塵や星の光などのエネルギーの低い光子がTeV以上までに加速された電子と衝突してエネルギーをもらってTeVガンマ線が生じる(逆コンプトン散乱)と主に考えられています。パルサー星雲を観測することによって、パルサー磁気圏から継続的にこれまで注入された電子群を間接的に観測できます。さらに高エネルギー電子の加速機構と拡散過程を直接観測できる重要な天体です。

特に幅広い波長帯で明るいカニ星雲は観測的・理論的な研究が進んでいるその代表例です。カニ星雲の中にあるカニパルサーも明るいガンマ線パルサーなので、星雲の放射を知る際には邪魔にな

*3 TeV=10¹²電子ボルト

ります。LATの角度分解能では空間的にパルサーを取り除くことはできませんが、パルス放射の出ている位相から光子を取り出して、図6に示したようなカニ星雲のスペクトルが得られました²⁴⁾。100 MeV以上で急に弱くなるシンクロトロン放射と、1 GeV以上で立ち上がる逆コンプトン放射の接続部をかつてない精度で測定することができました。COMPTELとEGRETの観測点があったとはいえ、逆コンプトン散乱のスペクトルは理論の予想でしかありませんでした。しかしTeVガンマ線の観測結果を合わせることでその全貌が確かめられた、非常にインパクトのある結果だといえるでしょう。

LATでは現在のところ中年のVelaパルサー(1万歳)と若いパルサーPSR B1509-58(1,700歳)のパルサー星雲(両者ともTeVガンマ線も検出)をそれぞれ検出しています^{26), 27)}。PSR B1509-58をはじめとする多くのパルサーとパルサー星雲は、銀河中心方向に位置しているため、特に赤外線で弱く広がった放射を捕らえることが困難なことがあります。このことはシンクロトロン放射の全体を観測することが難しいことを意味しており、対応するエネルギー(~GeV)の電子の振舞いを調べるのが困難ということです。しかしLATを用いると、同じエネルギー帯の電子が出す逆コンプトン放射を捕らえることができるため、電子スペクトルを調べる数少ない(もしかすると唯一の)手段となります。パルサー星雲を満たしている電子スペクトルを正確に知ることは、パルサーの進化を反映しているであろう電子注入の歴史や銀河空間への電子拡散の様子を知るための手がかりになります。このためLATによるスペクトル観測は非常に重要です。今後もLATパルサー星雲は数が増えていくことが期待されます。ガンマ線だけでなく他波長のデータを駆使して、パルサー磁気圏で加速された電子がパルサー星雲の外に旅立つまでというパルサー加速器の全貌を明らかにする日がやってくることを期待して

います。

4. 最後 に

フェルミ衛星はガンマ線パルサーの数を飛躍的に増やし、電波・X線・ガンマ線を駆使したパルサーの系統的な研究が本格的に始まりました。より遠く暗いパルサーが今後の継続観測によって検出されるであろうことは想像に難くありませんが、すでに高い有意度で検出された点源の中にも多くのパルサーが埋もれていと考えられています。実際に、数百個にも上る他波長で対応天体がない未同定LAT天体の中から、電波によってミリ秒パルサーが発見されたりX線でパルサーらしいスペクトルをもつ点源が見つかったりしています。LATによるパルサーの研究はまだまだ始まったばかりで、これからもパルサーの秘密のヴェールが一枚一枚はがされていくでしょう。

参考文献

- 1) Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D. H., Scott P. F., Collins R. A., 1968, *Nature* 217, 709
- 2) Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., Hobbs M., 2005, *AJ* 129, 1993
- 3) Browing R., Ramsden D., Wright P. J., 1971, *Nature* 232, 99
- 4) Thompson D. J., Fichtel C. E., Kniffen D. A., Oegelman H. B., 1975, *ApJ* 200, L79
- 5) Kanbach G., et al., 1980, *A&A* 90, 163
- 6) Thompson D. J., 2004, *ASSL* 304, 149
- 7) Atwood W. B., et al., 2009, *ApJ* 697, 1071
- 8) Abdo, A. A., et al., 2010, *ApJ*, in press
- 9) Abdo, A. A., et al., 2008, *Science* 322, 1218
- 10) Hartman R. C., et al., 1999, *ApJS* 123, 79
- 11) Abdo A. A., et al., 2009, *Science* 325, 840
- 12) Camilo F., et al., 2009, *ApJ* 705, 1
- 13) Aliu E., et al., 2008, *Science* 322, 1221
- 14) Harding A. K., Usov V. V., Muslimov A. G., 2005, *ApJ* 622, 531
- 15) Muslimov A. G., Harding A. K., 2004, *ApJ* 617, 471
- 16) Zhang L., Cheng K. S., 2004, *A&A* 398, 639
- 17) Aharonian F. A., et al., 2007, *A&A* 466, 543
- 18) Abdo A. A., et al., 2009, *ApJ* 696, 1084
- 19) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ*, in press

- 20) Abdo A. A., et al., 2009, *Science* 325, 848
- 21) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ*, in press
- 22) Abdo A. A., et al., 2009, *Science* 325, 845 in press
- 23) Aharonian F. A., et al., 2006, *ApJ* 636, 777
- 24) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ* 708, 1254
- 25) Atoyan A. M., Aharonian F. A., 1996, *MNRAS* 278, 525
- 26) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ*, in press
- 27) Abdo A. A., et al., 2010, *ApJ*, in press

Fermi-LAT View of Pulsars and Its Wind Nebulae

Takeshi NAKAMORI, Nobuyuki KAWAI and Yoshikazu KANAI

Tokyo Institute of Technology, Dept. of Physics 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan

Hiromitsu TAKAHASHI

Hiroshima Astrophysical Science Center, Hiroshima University 1-3-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima739-8526, Japan

on behalf of the Fermi LAT Collaboration

Abstract: Fermi-LAT detected ~ 50 gamma-ray pulsars by all-sky observations with the highest sensitivity in the first year. About half of those are first identified as pulsars by the gamma-ray observations, having quite similar characteristics except for radio brightness. Pulsations from nearby millisecond pulsars are also detected. Detailed gamma-ray spectra and pulse profiles obtained put critical constraints on magnetospheric emission models, strongly implying that the emission region far from neutron star surface. In addition, spectra from pulsar wind nebulae reveal an inverse Compton component. We expect drastic progress in understanding electron acceleration and its magnetic environment.