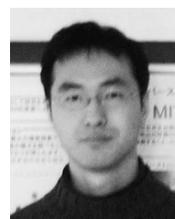


フェルミの発見した珍種 —電波で暗いミリ秒パルサー—



谷津

谷津 陽一 ・ 河合 誠之

〈東京工業大学大学院理工学研究科・基礎物理学専攻 〒152-8551 東京都目黒区大岡山2-12-1〉
e-mail: yatsu@hp.phys.titech.ac.jp; nkawai@phys.titech.ac.jp

片岡 淳 ・ 高橋 洋輔

〈早稲田大学理工学術院総合研究所・先進理工学研究科 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1〉
e-mail: kataoka.jun@waseda.jp; s072803523@akane.waseda.jp

フェルミ衛星が発見した高銀緯の明るいガンマ線源、2FGL J2339.6-0532および2FGL J1311.7-3429が、これまで知られていなかった新しいタイプのパルサー、すなわち「電波で暗い」ガンマ線ミリ秒パルサーであることがわかりました。これまでの研究では、波長帯ごとにパルスの放射源・放射範囲が異なるという描像が確立されてきました。これは特定の波長帯でのみパルス放射が見られるようなパルサーが存在することを予言するものですが、いままで回転周期の短いミリ秒パルサーでは電波とガンマ線が両方見られる天体しか知られていませんでした。今回発見された電波で暗かつガンマ線で明るいミリ秒パルサーの存在は、若い回転駆動型パルサーで議論されてきた放射モデルが、伴星からの質量降着期を経験してきたリサイクルド・パルサーにも適用できる普遍的な機構であることを示唆しています。今後、さらに同様の天体が見つかり、パルサーからの電磁放射現象の系統的な理解が進むと期待されます。

1. はじめに

2008年に打ち上げられたフェルミ (Fermi) 衛星は、極めて高い感度で全天を観測し、これまでに知られていなかった数多くのガンマ線天体を発見しています。打ち上げから現在までに検出されたガンマ線源は1,800個を超え¹⁾、そのうち約3割はいまだに正体がわかっていません (図1)。その一方で、系内から発見されたガンマ線源のほとんど (検出された全ガンマ線源の10%以上) は、パルサーやパルサー星雲に関連していることもわかってきました²⁾。パルサーという天体種族は、1967年にHewishらが発見してからすでに45

フェルミ衛星がガンマ線で発見した天体

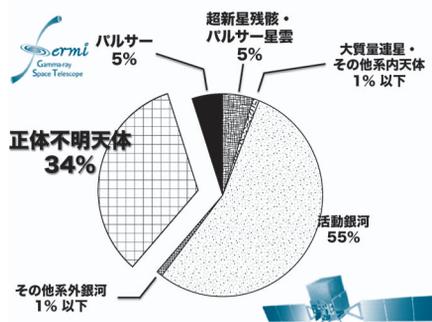


図1 フェルミが発見したガンマ線天体の内訳。発見された全ガンマ線源の1割、同時に系内のガンマ線源のほとんどはパルサーに関連している。

年が経ちました³⁾。回転する磁化した星という一見シンプルな物理系であるにもかかわらず、最も馴染み深く理解が進んでいると思われていたかに星雲が突然ガンマ線フレアを起こしてみたりと⁴⁾、その周辺における物理現象はいまだに謎に包まれています。

本稿では、昨年から今年にかけて立て続けに2例発見された「電波で暗い」ミリ秒パルサーと思われるガンマ線天体について紹介します⁵⁾⁻⁸⁾。これまで、なぜかスピン周期が30ミリ秒以下の「ミリ秒パルサー」では、電波で暗い天体が見つかっていませんでした。“当然あるべきなのになぜか見つからなかった”この種のパルサーの発見は、これまで積み上げられてきたパルス放射機構の理解が、本質的に間違っていないことを裏づけるたいへん貴重なサンプルです。また、これら二つの天体は、伴星を自身のパルサー風で蒸発させつつある珍種「ブラック・ウィドウ (Black widow) パルサー」でもあります。次章では、フェルミ衛星の登場によって大きく変化したパルサー観の変遷を簡単にまとめ、次にミリ秒パルサーの生い立ちとブラック・ウィドウについて紹介します。4章ではこれらの天体発見の経緯を解説し、5章ではわれわれの観測結果から得られる新しい示唆、そして今後の展望について議論したいと思います。

2. フェルミ時代のパルサー観測

パルサーはよく「巨大な発電機」にたとえられます²⁾。その発見当初から、パルサー周辺の回転磁気圏が誘導電場を作り、その結果、荷電粒子が加速されてガンマ線が放射されるというシナリオができあがっていました。ところが、フェルミ衛星が打ち上げられるまでは、約2,000個ものパルサーが見つかったにもかかわらず、ギガ電子ボルト以上の高エネルギーガンマ線を放射するパルサーは、若くて活動的な六つしか知られていませんでした。この状況が、フェルミ衛星の打ち上

表1 これまでに見つかっているパルサーの内訳

周期	電波	ガンマ線	個数
30 ms以上	○	○	36
	×	○	35
	○	×	1658
30 ms以下 (ミリ秒 パルサー)	○	○	27 ^a
	×	○	0
	○	×	189

注一 ○: パルスが検出されているもの。

×: パルスが未検出のもの (2012年3月の統計)。

^aこのうち5天体はガンマ線放射を伴うもののパルス検出には至っていない。

げによって一変し、数多くのガンマ線パルサーが発見されました。この一連の発見により、パルサーは一躍、銀河系内における最もメジャーなガンマ線源として認知されるようになりました。

また、フェルミ衛星に搭載されたLarge Area Telescopeは広い視野と優れた検出感度を持ち、ガンマ線の観測データだけを用いてパルサーを探査する、いわゆる「ブラインド・サーチ」を可能にしました。この検出感度の飛躍的な向上により、打ち上げから1年でそれまで知られていなかった新しいパルサーを数多く発見しています^{11), 12)}。特に興味深いのは、ガンマ線で見えているのに、電波では見えていないパルサーの存在です。それまで、ふたご座のガンマ線源ゲミガ (Geminga) がその唯一の例として知られていましたが、フェルミ衛星の観測により、このようにガンマ線だけで光るパルサーがより一般的な存在になりました。表1に示すのは2012年3月までに見つかっているガンマ線パルサーの内訳です。フェルミで見つかっている周期30ミリ秒以上のパルサー (ほとんどは若く活動的な天体) の約半数は電波パルスが見られないのです。

これまで、パルサーからのガンマ線放射を統一的に説明するモデルとして、ポーラーキャップ (polar cap) 起源説、スロットギャップ (slot gap) 起源説、アウターギャップ (outer gap) 起源説などが有力視されてきましたが、フェルミによって

得られたガンマ線のパルスプロファイルやスペクトルの形状により、現在ではアウターギャップが最有力視されています²⁾。このアウターギャップ起源説の予言するガンマ線放射は大きな立体角に広がっており、さまざまな方向から見るができます。一方、電波パルスは（実はまだよく理解されてはいないのですが…）、これまでの状況証拠から磁極の近くから細いビームで放射されていると推定され、中性子星の磁極がわれわれを向いたときのみパルスが見えると考えられています。このように、「電波とガンマ線とでパルスの放射領域が異なる」という描像では、電波・ガンマ線のパルス放射の有無を磁極の構造とわれわれから見込む角度の組み合わせで説明できてしまいます^{*1}。

そもそも、電波パルスは放射範囲が狭く実際には放射されていてもわれわれからは見えない確率が高いため、波長ごとに放射源・放射方向が異なる場合にはガンマ線でパルスが見えても電波パルスが同時に受かる必然性はありません。フェルミのブラインド・サーチで見つかったパルサーの統計結果はこの描像でよく説明され、多数のパルサーから電波放射が見られない事実は、むしろ妥当といえます（表1）。その一方で、パルス周期が30ミリ秒より短い「ミリ秒パルサー」では全く状況が異なり、ガンマ線だけでブラインド・サーチをすることが困難であったため、これまでに見つかったサンプルでは、電波パルスが検出されているものに限られていました（表1）。

3. ミリ秒パルサーの生い立ち

図2は既に知られているパルサーのパルス周期と周期変化率を示した $P-\dot{P}$ ダイアグラムです。一般的な電波パルサー（図の中央付近に分布してい

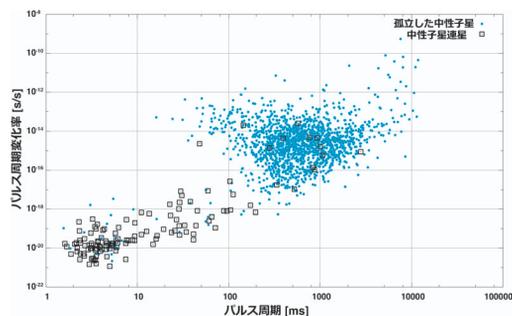


図2 $P-\dot{P}$ ダイアグラム（パルス周期・周期変化率はThe ATNF Pulsar Catalogue^{13), 14)} から抜粋）。青丸は伴星の見つからない孤立したパルサー、黒四角は連星系をなすパルサーを示す。

る一群）と比べて、ミリ秒パルサーの分布は図の左下側に寄っており、回転周期が極めて短く、周期変化率が小さいといった特徴をもっていることがわかります。また、ミリ秒パルサーの多くが連星系（図中にある黒四角）をなしていることが知られています。これらのスピン特性に加え、その多くが伴星を伴うこと、さらに低質量X線連星と同様に球状星団から多く見つかったことなどから、ミリ秒パルサーは伴星のガスが星表面に降りつもることで少しずつ角運動量を得て、1秒間に数百回転するまでにスピンアップしてきたと考えられています¹⁵⁾。また、ミリ秒パルサーの多くが銀河面から離れた位置で見つかったことも、これらの種族が極めて古い天体種であり、超新星爆発の反動で蹴り出され長い時間をかけて銀河面から離れつつあることを示唆しています。この様に、すでに年老いて冷えてしまった中性子星が、伴星からの質量降着により数億年の時を経て再度輝き出すことから、これらの天体はリサイクルド・パルサーとも呼ばれています。

さらに時間が経つと、何らかの原因で降着が止まり、自身の回転エネルギーだけで光る回転駆動

*1 この描像では、電波で見えないパルサーも実際にはわれわれからは見えない方向に電波パルスを放射していることが示唆されます。また、電波ビームの縁、もしくはサイドローブがわれわれをかすめている可能性もあり、より高精度な電波観測が可能になれば、将来電波パルスが検出される可能性もあります。

型パルサーになります。なかでも、特にエネルギー放出が大きく、伴星との距離が近接している連星系の場合には、パルサーからの磁化したプラズマ（パルサー風）が伴星を加熱・蒸発させ、最終的には単独のミリ秒パルサーだけが残ると考えられています。近年発見されたパルサー（SDSS J102347.6+003841）は、パルス周期が約1.7ミリ秒のミリ秒パルサー連星ですが、降着円盤がときおり消失するため、今まさに降着が止まろうとしていると考えられています¹⁶⁾。さらに進化の進んだ例としては、1988年に発見されたPSR B1957+20が有名です。この天体ではすでに質量降着が終わっており、復活したパルサーからのパルサー風が伴星を加熱し、連星の軌道周期に従った可視光の激しい光度変化が観測されています。このように、長年養ってくれた伴星を蒸発させてしまうミリ秒パルサーは、交尾した後にオスを食べてしまうクロゴケグモ（黒後家蜘蛛）の生態になぞらえて、「ブラック・ウィドウ (black widow)」と呼ばれています。

実は、ミリ秒パルサーからガンマ線パルスが出ていることもフェルミ衛星が初めて発見しました¹⁷⁾。図3に示すのはフェルミが観測した比較的若い回転駆動パルサー（PSR J0007+7303）とミリ秒パルサー（J0030+0451）のガンマ線パルスプロファイルの比較です。P- \dot{P} ダイアグラム上でも明らかに異なるスピン特性をもっているにもかかわらず、

ミリ秒パルサーからのガンマ線放射は若いパルサーと同様のダブルピーク構造をもち、スペクトルはべき関数型の高エネルギー側が切れ落ちた形をしているなど、周期を除けば全く同じ特徴をもっていました。このようなパルス波形やスペクトル形状の一致は、若いパルサーとミリ秒パルサーとでガンマ線放射機構が全く同じであることを示唆していると考えられます。

このような統一したパルス放射の描像を完成させる最後のピースとなるのが「電波で暗い」ミリ秒パルサーです。しかしながら、これらの天体をブラインド・サーチで見つけるには広い周波数空間を精査する必要があるため、同じガンマ線放射強度であっても通常の電波パルサーに比べるとその検出は格段に難しくなります。連星系にあることもドップラー効果による周期変動を引き起こすためパルス検出を妨げます。果たして電波で暗いミリ秒パルサーが見つからなかったのはこのような観測上の困難からでしょうか？ はたまた、リサイクルの過程や弱い表面磁場強度のために根本的に異なる電波放射機構をもつようになったのでしょうか？ このような中であって、高い感度を有するフェルミ衛星こそが、その疑問に答えてくれると期待されていました。

4. 電波で暗いミリ秒パルサーの発見

私たちは、フェルミの発見した正体不明の未同

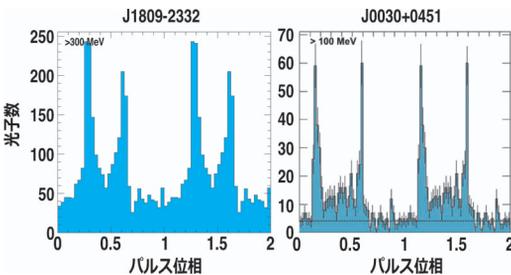


図3 フェルミ衛星の観測した若い回転駆動型パルサー J1809+2332 ($P=146.8$ ms)¹²⁾ と、ミリ秒パルサー J0030+0451 ($P=4.9$ ms)¹⁷⁾ のガンマ線パルスプロファイル。

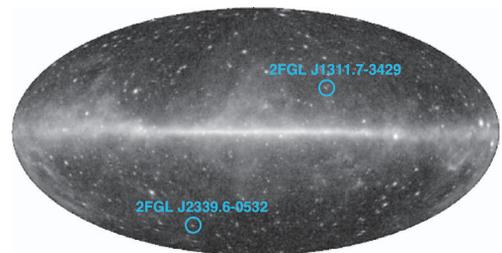


図4 フェルミ衛星が観測したガンマ線による全天画像。新たに見つかった電波で暗いミリ秒パルサーは天の川から遠く離れた天域で見つかった。

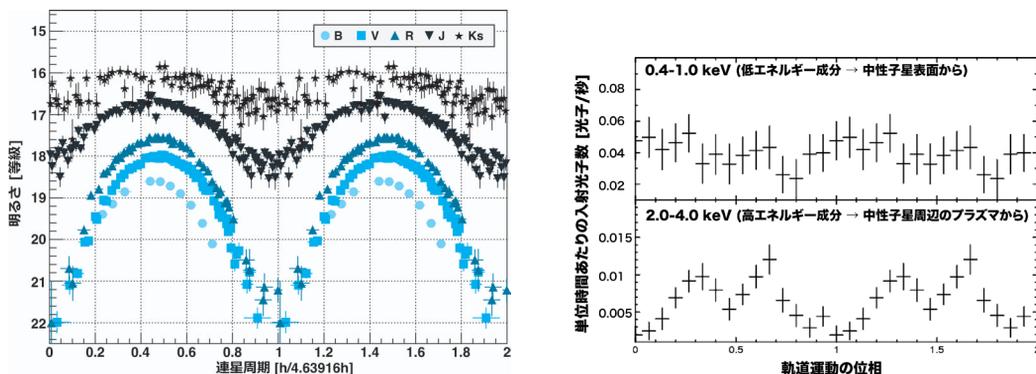


図5 (左)一軌道周期で畳み込んだ可視・近赤外線光度曲線(光・近赤外線大学間連携による観測)。データ系列はそれぞれ、●: B-band, ■: V-band, ▲: R-band, ▼: J-band, ★: Ks-bandに対応。(右)一同じく「すざく」で観測したX線光度曲線。低エネルギー成分が強度一定なのに対して、高エネルギー成分はふた山の変動を示す。また、硬X線のダブルピークは可視光の増光に同期している。

定ガンマ線天体を日本のX線天文衛星「すざく」や可視光・近赤外線望遠鏡などを用いて追観測し、いままで知られていない新種の天体や高エネルギー現象の発見を目指しています。図4に示すのはフェルミが観測したガンマ線の全天画像であり、今回発見された二つの「電波で暗い」ミリ秒パルサーの位置は丸で示してあります。当時は特に銀河面から離れた高銀緯の未同定天体にターゲットを絞って観測を行っており、むしろ、パルサーや活動銀河核以外の奇妙な天体や、ダークマター起源のガンマ線が見つからないかと密かに期待していました^{9), 10)}。

4.1 一例目: 2FGL J2339.6-0532

第一のターゲットである2FGL J2339.6-0532は天の川からかなり離れた位置に見つかったガンマ線源であり、正体のわかっていない天体の中では最も明るいものの一つでした。このガンマ線源は1カ月オーダーの長期的な時間変動を見せていなかったことから、少なくとも活動銀河核(AGN)ではないと予想されていました。そのガンマ線スペクトルは~5ギガ電子ボルト付近の折れ曲がりをもつ「パルサー的」な特徴を備えていましたが、電波での対応天体は見つかっていませんでした。その後、X線天文衛星チャンドラ(Chandra)によりX線対応天体が発見されたこ

とを受けて、可視光・近赤外線・X線による追観測が行われました。

まずわれわれは、可視光対応天体の測光観測を行い、その明るさが激しく変動していること、さらにその変化が4.6時間の周期性をもっていることを発見しました。この結果は、ガンマ線源が連星系であることを示唆すると考えられます^{5), 7)}。図5の(左)は昨年発足した光・近赤外線天文学大学間連携の望遠鏡ネットワークで観測した可視光対応天体の光度曲線です。可視光のRからVバンド付近で約4等級の最大振幅が見られ、軌道位相の変化に従い伴星表面の温度が3,000 Kから7,000 Kにまで周期的に変化していることを示唆しています。さらに、最大光度における分光エネルギー分布から推定される光源の半径は~ 1.1×10^{10} cmであり、伴星がおおよそ1/10太陽質量程度の矮星であることを示唆しています。一方、スタンフォード大学のRoger W. Romaniらも極小期の可視光分光を行っており、冷たい側からみた特徴はM型~K型星であるという描像を得ています⁷⁾。

また、われわれは「すざく」を用いた100キロ秒の観測を実施しました。図5の(右)は「すざく」が取得したエネルギーごとのX線光度曲線です。1キロ電子ボルト以下の低エネルギー側ではほとんど明るさが変動していないのに対して、2

キロ電子ボルト以上の高エネルギー側では軌道位相に応じたふた山の光度変動が観測されました。これらエネルギーごとの振る舞いの違いは、X線の放射源がエネルギーバンドごとに異なることを示唆していると思われます。さらにこのデータを使ってスペクトル解析を行ったところ、べき関数と黒体放射の足し合わせで観測結果をよく説明できることがわかりました。特に低エネルギー側で見つかった黒体放射は、サイズ $R \sim 1.6$ km, 温度 $T \sim 0.15$ keVと小さく高温な放射源を示唆しており、主星が中性子星であることの決定的な証拠となりました¹⁸⁾。

本来であれば3,000 K程度しかないはずの矮星が異様な温度上昇を示していること、そしてX線で光るほど高温でコンパクトな主星の組み合わせは、過去に発見されたブラック・ウィドウパルサー (PSR B1957+20) と酷似しています。これまでの電波～ガンマ線での観測では有意なパルスは検出されていませんが、伴星の加熱具合から推定されるシステムへのエネルギー供給は 10^{34} erg s^{-1} に達すると推定され⁷⁾、これを説明する熱源は回転磁気圏の作るパルサー風以外には考えられません。これらを総合した結果、2FGL J2339.6-0532は「電波パルスのない」ミリ秒パルサーであるという結論に至りました。

4.2 二例目: 2FGL J1311.7-3429

次にわれわれが注目したのは、2FGL J1311.7-3429という未同定天体です。この天体も高銀緯(銀緯 28°)にあり、たいへん明るいガンマ線源として1990年代からすでに存在が知られていました。一方で、他の波長帯での対応が特定できずに、なんと20年もの間、孤高の未同定天体として君臨した難攻不落の天体です(図4)。われわれの当初の認識は“銀河系外の得体のしれない謎天体”という程度でしたが、2FGL J2339.6-0532の発見から、同様なパルサーがまだ潜んでいる可

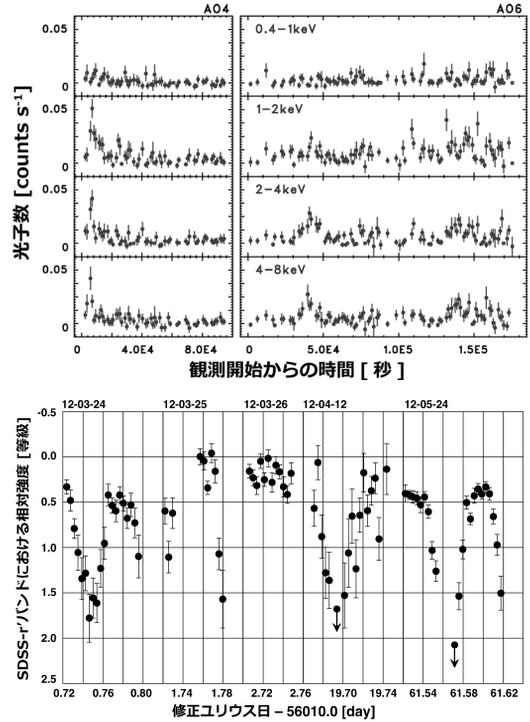


図6 (上)―「すざく」で観測した2FGL J1311.7-3429のX線光度曲線。2009年・2011年の観測ともに不規則なフレアが見られる⁶⁾。(下)―Lulin 1 m望遠鏡で観測した可視光光度曲線。

能性が示唆され、さらなるチャレンジへの意欲を与えてくれました。

Swift衛星に搭載された紫外線・可視光望遠鏡(UVOT)による可視光対応天体の発見を受けて、われわれは「すざく」によるX線観測を2009年、2011年の2度にわたって実施しました。図6の(上)はエネルギーバンドごとのX線光度曲線です。2FGL J2339.6-0532からのX線放射は軌道周期に合わせた小さな変動しか見せなかったのに対して、こちらの天体は不規則で激しい時間変動を見せています。特徴的なのは、まるでブレーザー^{*2)}のような左右対称な形のフレアが散見されることです。各フレアのタイムスケールはおおよそ数時間程度で、特に高エネルギー領域で顕著に

*2) 活動銀河核の一種で、超巨大ブラックホールから放出される相対論的ジェット天体現象。電波からガンマ線にわたる広い波長域で変動する。

見えます。これまでにパルサーからのX線でのこのような不規則なフレア現象が見られた例はなく、新天体発見の期待がますます募ります。一方、スペクトルはべき型で、光子指数は $\Gamma=1.3\sim 1.7$ と活動銀河核としても許容できるものでした。

不規則フレアの存在に惑わされてまいち正体がかめないうまま、次にわれわれは可視光観測を行いました。日本からだとかかなり低空になるため、石垣島天文台・台湾Lulin天文台に協力を呼びかけて複数晩にわたって測光観測を行いました。図6の(下)はLulinでの5回の観測で得られたSDSS-r'バンド(中心波長=6,222 Å)の光度曲線です。各晩の観測はおおよそ1-2時間程度ですが、最初の観測で急激な光度変動が見られました。「またしてもブラック・ウィドウ～」という想像が頭をよぎりますが、2晩目、3晩目の観測では期待したような周期変動が見られません。先に示した2FGL J2339.6-0532の光度曲線は、軌道周期で畳み込むまでもなく綺麗なサインカーブを描いていたのに対して、こちらは日によって変動が見えたり見えなかったり、見えてもピーク光度が変わってしまったりと、かなり不思議な振る舞いを見せています。不運にも、この時期の石垣地方は天候が優れず、最初の晩と同じ形の光度曲線が再度観測されたのは2カ月も後のことでした。

ちょうど同じ頃、Romaniも4 m級の望遠鏡を動員してより詳細な周期解析を行っており、2FGL J1311.7-3429が軌道周期~1.56時間の近接連星系であることを明らかにしました⁸⁾。X線のフレア・可視光の不規則な増光を除けばブラック・ウィドウに似ていること、電波の対応天体がないことなどから、この天体は2例目の電波で暗いミリ秒パルサーだと考えるに至りました^{8),6)}。

5. 解釈と今後の展望

若いパルサーやミリ秒パルサーなどの「種族を超えた」パルス放射の描像を検証するという観点

から、「電波で暗いミリ秒パルサー」の発見が期待されていました¹¹⁾。これまでに紹介してきたとおり、フェルミ未同定天体の中から立て続けに二つの候補天体が見つかりました。ガンマ線のパルス放射については目下探査中ですが、伴星が加熱されているという間接的な証拠から、これらの天体がミリ秒パルサーであるという結論に至っています。これは連星系のパルサーが軒並み弱磁場であることや、伴星を蒸発させるほどの強いパルサー風を生成するためには高速で回転している必要があることなどから、もっともらしいと言えます。

さらに、パルサー本体からのガンマ線放射からもこの天体がパルサーらしいという証拠が見えてきています。図7に示したのはこれまでに見つかったガンマ線源のスペクトル形状と時間変動の比較です。縦軸・横軸は、それぞれ月単位の

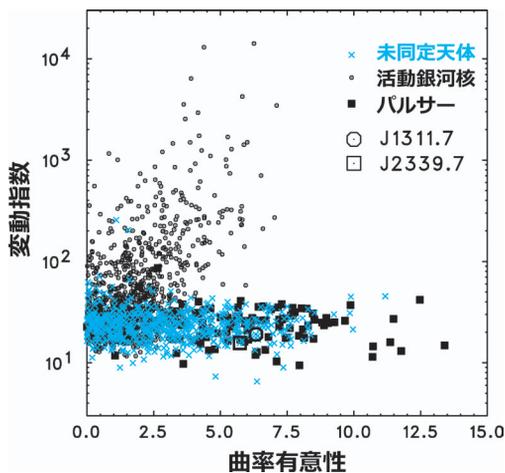


図7 フェルミで見つかったガンマ線源のスペクトル光度変動の特徴。横軸はスペクトルの折れ曲がりの有意性 (Curvature significance¹⁹⁾), 縦軸は変動の有意性 (Variability index¹⁹⁾) を示す。

ガンマ線光度変動の有意性 (Variability index)¹⁹⁾, スペクトルの折れ曲がりの有意性 (Curvature significance)¹⁹⁾ を表しています. この空間上では, 活動銀河核とパルサーが見事に異なる分布を見せており, 活動銀河核が激しく変動して折れ曲がりのないスペクトルをもつものに対して, パルサーは放射強度が一定で, 折れ曲がり (カットオフ) のあるスペクトルをもつらしいことが読み取れます. 今回見つかった二つの候補天体も, このプロット上では典型的なパルサーの領域に納まっています. 可視光やX線で激しい時間変動を示した2FGL J1311.7-3429も, ガンマ線ではほとんど変動していないことが伺え, フェルミの検出したガンマ線がパルサー起源であることを強く支持しています. 今のところ, ガンマ線パルス検出の報告はありませんが, フェルミによる観測は日々続いており, 近い将来, ガンマ線データの蓄積と, 光学観測による連星軌道情報の改善によってパルスが発見されることが期待されます.

ところで, 図7には活動銀河核やパルサーの他に, 依然として正体のわかっていない天体も多数プロットしてあります (図中の×マーク). そもそも, 暗い天体の時間変動・スペクトルの形状は正確には決められないため, 確度が低くなって図中では左下の領域に集中する傾向にあります. しかし, それらの暗い天体の寄与を差し引いても, ガンマ線パルサーはまだまだたくさん見つかりそうです. 電波で暗いミリ秒パルサーは現時点ではたったの2例に過ぎませんが, 今後これらの未同定天体の正体を一つ一つ明らかにしていくことで, より系統的な描像が得られると期待できます.

もう一つ, 今回の観測で発見された極めて興味深い現象が2FGL J1311.7-3429の示すX線・可視光での不規則で激しいフレア現象です. これまでのところ, 回転駆動型のミリ秒パルサーでこのようなフレアが見られた例はほかに知られていません. その特徴は, ライトカーブが左右対称な三

角形であるという点で, 活動銀河核 (特にブレーザー) のものと酷似しています. 活動銀河核のジェットでは, 中心から断続的に撃ち出されるジェットが速度差をもって進行し, 後から出てきた物質が先行する物質に追突することで内部衝撃波が発生すると考えられています. この衝撃波により電子が加速され増光が起こり, やがて冷えて暗くなるのですが, 電子加速・放射冷却のタイムスケールに対して光源のサイズが大きく, 光が放射源 R を横切るのにかかる時間 (light crossing time) のほうが卓越するため, 観測者から見ると増光も減光も一様に R/c のタイムスケールで鈍され, 左右対称な光度曲線を描くと理解されています.

やや乱暴ですが, この解釈をそのまま今回のケースに適用すると, $R/c \sim 10$ ks となり, 光源のサイズは 10^{14} cmと見積もることができます. 一方で, 1.56時間という公転周期からは2FGL J1311-3429連星間距離が $\sim 5 \times 10^{10}$ cm程度になると推定されるため, 光源のほうが4桁も大きいことになってしまいます. これほどの大きさのものが瞬時に増光・減光するというのは考えにくいので, この天体では何か異なる機構が働いているものと考えられます. 容易に思いつくところでは, 伴星表面で激しいフレアが起こっているとか, パルサー風の放出そのものが数時間スケールでアウトバースト的に供給されているなどの可能性が考えられますが, 現時点ではその原因はわかっておりません. また, 一例目として紹介した2FGL J2339.7-3429 (軌道半径 $\sim 10^{10}$ cm) ではこの不規則なフレアが見られていないというのも興味深い点であり, 何がこの違いを生むのか, 今後, すばる望遠鏡などの大型観測装置を使った詳細な分光観測を行うことで, 長い連星進化の歴史やこれまで直接観測されることのなかったパルサー極近傍における粒子加速現象の解明が期待されます.

