

# ミリ秒パルサーからの 非熱的 X 線パルス放射の発見

齋藤 芳隆

宇宙科学研究所 三陸大気球観測所 〒229-8510 相模原市 由野台 3-1-1

E-mail : saito@balloon.isas.ac.jp

私たちは、X 線天文衛星「あすか」を用いてミリ秒パルサーからも非熱的 X 線パルスが放射されていることを発見しました。「普通のパルサー」と比較してみるとパルサーからの X 線パルスの放射量は、回転エネルギー放出量の 3/2 乗に比例しているように思われます。私たちは、パルサーの磁気圏が相似な構造をしているところが説明できるのではないかと考えています。

## 1. パルサーとミリ秒パルサー

博士課程も二年が過ぎんとする春のことでした。私は学会発表の準備のために、徹夜をしていました。解析していたのは X 線天文衛星「あすか」によって観測した球状星団 M28 のデータでした。M28 の中にはミリ秒パルサー PSR B1821-24 が存在しています。私たちは X 線領域でのパルス放射を探そうと解析を進めていたのです。

パルサーは、周期的に明滅を繰り返す天体で、1967 年に電波領域で発見されました(たとえば 1)。一瞬、宇宙人からの信号かと騒がれましたが、すぐに非常に強い磁場をもった ( $10^{12}$  ガウス = 地球磁場の一兆倍)、高速で自転する(周期 100 ミリ秒 = 一秒間に 10 回転)中性子星であることがわかりました。燈台のように一部の方向だけに光を出しており、それが私たちの方向を横切ると明るく見えるというわけです。いまでは 600 天体以上から電波領域でのパルスが見つかっています<sup>2)</sup>。私たちが観測した PSR B1821-24 もその一つです。

どんなパルサーが知られているのかを記したのが図 1 です。これは電波領域で観測された周期を横軸に周期の変化率を縦軸にとってパルサーを分類しています。その上に、これらから推測した、回転

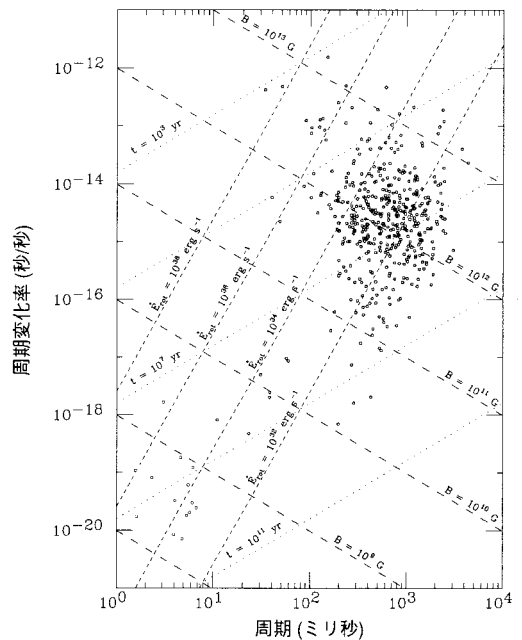


図 1 周期を横軸に周期の変化率を縦軸にとってパルサーを分類しました (2) のデータを元にしています)。Erot は回転エネルギーの放出量, B は磁場の強さ, t は年齢を表します。右上の固まりが「普通のパルサー」、左下が「ミリ秒パルサー」。両者は生まれ方が違うと考えられています。

エネルギーが減っていく量、年齢、磁場の強さを表す点線が重ね書きされています。これをみるとパルサーは大きく二種類に分けられることがわかります。右上にある大きな固まりで、周期が数百ミリ秒、磁場の強さが  $10^{12}$  ガウス程度のパルサーたち。これをここでは「普通のパルサー」と呼ぶことにします。これに対して、左下の方にも小さな固まりがあることに気がつきます。周期が数ミリ秒、磁場の強さが  $10^8$  ガウス程度のパルサーたちで、「ミリ秒パルサー」と呼ばれています。実は「普通のパルサー」と「ミリ秒パルサー」では生まれ方が違うと考えられています<sup>3)</sup>。

太陽の数倍の重さの星が最後に超新星爆発を起こす時に中心部が重力で収縮して中性子星は生まれます。この時、元の星の角運動量を保存することで「高速で自転する普通のパルサー」が生まれると考えられています。その後、徐々に回転が遅くなって数億年ほどでパルス放射の活動をやめるようです。この間、回転エネルギーは電磁的に粒子を加速することに費やされており、その結果としてパルスが放射されることになります。

それでは「ミリ秒パルサー」の場合はどうでしょうか? 「ミリ秒パルサー」は「再生パルサー」とも呼ばれており、一度死んだパルサーが復活したものだと考えられています。活動をやめたパルサーは、宇宙を漂い、稀に、他の星につかまって連星をなすことがあります。そのとき、パートナーから物質が降ってくると共に角運動量が運びこまれ、再び回転が早くなります。となりの星が白色矮星に進化するなどで物質が降って来なくなると、パルスしている中性子星が見えてきます。これがミリ秒パルサーだと考えられており、古い年齢や早い回転周期、そして、白色矮星との連星が多いことがうまく説明できます。私たちが観測したミリ秒パルサー PSR B1821-24 のように球状星団の中に見つかるものが多いことも、球状星団では星の密度が高く、古い星が多くあることとの関連づけでうまく説明できます。

## 2. パルサーからのパルス放射と「あすか」

私たちは、パルス放射のメカニズムがわからないものかと X 線領域でのパルス放射の観測を行ってきました。パルサーでは、粒子が数十兆キロボルトもの電圧で加速され、そうしてできた高エネルギー電子、陽電子からはガンマ線や X 線が放射されています。地上で人工的に作られる加速器よりも高いエネルギーまで粒子が加速できる場所が天然に存在するのです。しかも、この加速器は非常に効率が良く、ほとんどの回転エネルギーを粒子を加速することに費やしています。しかし、残念ながら具体的な加速の方法や場所は未だによくわかっていません。これを調べるためには、加速された粒子から出されるガンマ線や X 線の放射を調べることが必要です。

1980 年代までの X 線、ガンマ線検出器では、かにパルサーのようないくつかの明るい天体からしかこの放射を観測することはできませんでした。ですから、粒子の加速の場所や方法を考えるためには手がかりが乏しく、天体の個性によるものなのか共通する性質であるのかを見きわめることができなかつたのです。パルサーの性質を決めているのは磁場の強さと自転周期なのですが、回転軸と磁軸のなす角度や見ている方向といったことにも見え方が左右されてしまいます。

1990 年代に入るとパルサーについての新しい情報が次々と手に入るようになりました。それは、アメリカの CGRO 衛星の EGRET 検出器によるもの<sup>4)</sup>や、ドイツの衛星ローサットによるもの<sup>5)</sup>でした。EGRET 検出器は数十兆キロボルトもの電圧で加速された高エネルギー電子、陽電子からのガンマ線をとらえることができるので、その観測によって加速領域本体に迫ることができる検出器です。この検出器は新たに四つの天体からのガンマ線パルスを発見し、これまで知られていた二つの天体をより詳しく観測しました。ローサットには X 線領域の検出器が載っています。パルサーは先にお

話した高エネルギー粒子による X 線放射の他に、高温のバルサーの表面からも黒体放射による X 線が放射されます。ローサット衛星は黒体放射の観測を精力的に行なうと共に、生まれてから数十万年ほどたったバルサーにも高エネルギー粒子による X 線放射も混ざっていることに気がつきました。両者は、熱的 X 線、非熱的 X 線とよばれ、表題の非熱的 X 線パルスは高エネルギー粒子による X 線パルスを指します。両方をきちんと区別して、非熱的 X 線パルスだけを取り出すことはできないのでしょうか？

「あすか」にはこの期待に応えることができる X 線検出器、SIS と GIS が載っています。レントゲン衛星よりも高いエネルギーの X 線を測定することができ、そのエネルギーでは非熱的 X 線の方が熱的 X 線よりも明るくなるのです。EGRET 検出器が加速された粒子そのものからの放射を眺めるのに対して、「あすか」はその粒子から生まれた二次的な粒子か

らの放射をよくとらえることができます。これらの粒子は、ずっとバルサーから離れたところにかに星雲のようなバルサー星雲を形づくりします。バルサー全体のエネルギーの流れを考える上でも両者の中間を調べることは大切です。

### 3. ミリ秒バルサーから X 線パルス！

ようやく、私たちの観測したミリ秒バルサー PSR B1821-24 の話になります。何か粒子加速の現場をよりよく調べる方法はないでしょうか。私たちが提案したのは「ミリ秒バルサーを X 線でよく調べ、普通のバルサーと比較すること」でした。これまでは「普通のバルサー」からしか非熱的な X 線パルスは観測されていません。しかし、それでは磁場にしろ、自転周期にしろ似たような天体しかないため、個性によるバリエーションを差し引いて共通する性質だけをとりだすのは困難です。磁場、自転周期が極端に違うミリ秒バルサーから

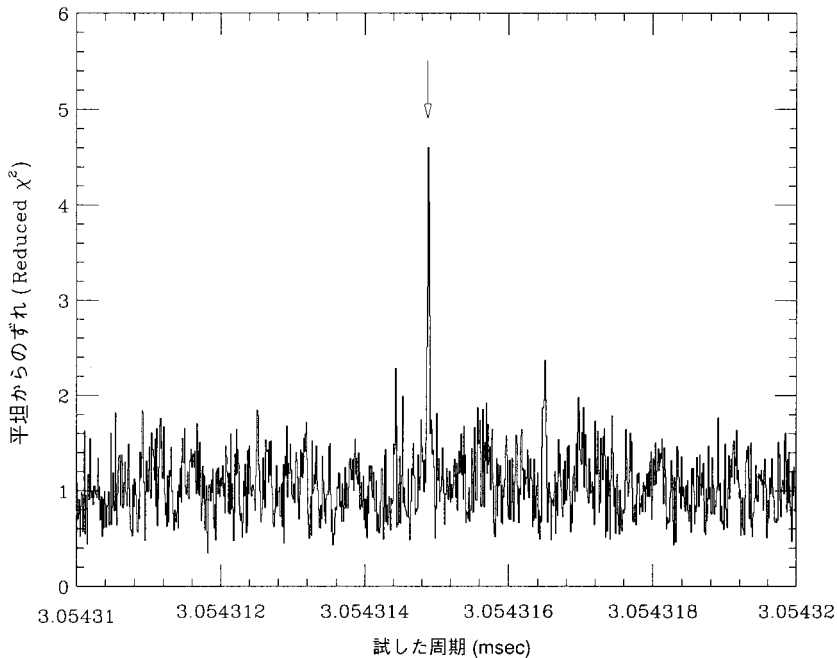


図2 PSR B1821-24 の X 線パルスの証拠を示すグラフで、横軸に試した周期、縦軸にパルス波形の平坦からのずれの大きさが示されています。矢印の、電波領域で観測されていた周期のところで平坦からのずれが大きく、パルスが間違いなく検出されたことを示しています。

の X 線パルスが観測できれば共通する性質だけを  
引き出すことができないでしょうか。

というわけで、私は夜中にミリ秒パルサー PSR  
B1821-24 からの X 線領域でのパルスを「あすか」  
のデータの中に探していたのです。電波領域で  
600 個以上がみつまっているパルサーですが X 線  
領域で非熱的なパルスが観測されていたのはたっ  
たの四天体。私自身も「普通のパルサー」やパル  
サーのいそよところから探しましたが、X 線領  
域でのパルスはなかなか見つかりませんでした。

また今度もだめかもしれないと半分思いつつも  
眠い目をこすりながらパルスを探してみました。  
みつからないにしても、パルス放射量の上限值を  
求めるためにはこの気だるい計算が必要なのです。  
いつものように上限値をつける準備をして、いつ  
ものように計算機の出力結果を待ちました。いつ  
もどおりだったのはここまでで、その出力結果に  
私は驚かされました。それは明らかにパルスをし  
ていることを示していたのです！

図 2 がそのグラフで、横軸に試した周期、縦軸  
にパルス波形の平坦からのずれの大きさを示して  
います。平坦な場合、縦軸の値は 1 くらいになり  
ます。ごらんとおり、電波領域で観測されてた  
3 ミリ秒の周期のところで大きな値をとっていて、  
パルスが間違いなく検出されたことを示していま  
す。真夜中なので周りには誰もいません。ひとま  
ず、関係者に E-mail を打ち、研究室のホワイトボ  
ードにこの図を張りました。もちろん眠気はすっ  
かり醒めました。

パルス波形も調べてみました。図 3 に示したと  
おり鋭い二つ山で、かにパルサーのパルス波形と  
も似ています。鋭い山はたったの 100 マイクロ秒  
の幅しかありません。「あすか」の検出器では 60  
マイクロ秒より短い時間は計れませんからほとん  
ど限界です。エネルギー領域を二つにわけ、パル  
ス波形の比較もしました。パルスは高エネル  
ギー領域で目立っています。

これは、パルスしている成分のエネルギースペク

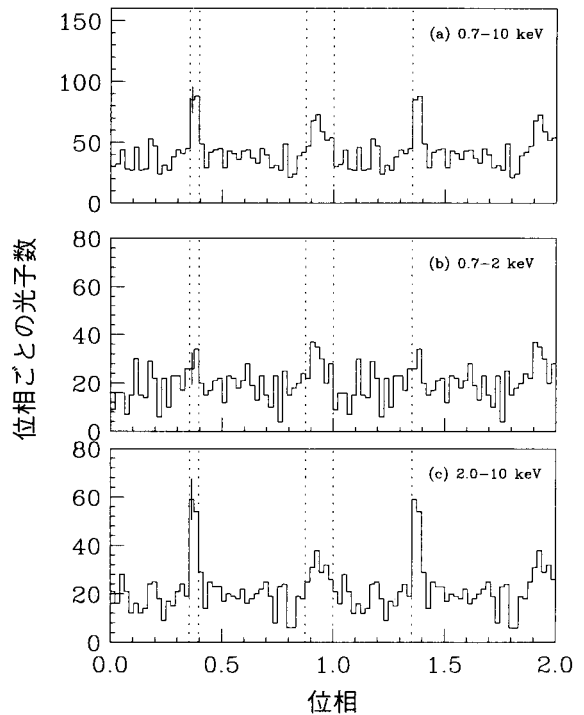


図 3 エネルギー別の PSR B1821-24 の X 線パルス波形。  
鋭い二つ山で、たったの 100 マイクロ秒の幅しかあ  
りません。(a)が全エネルギー領域、(b)が低エネルギ  
ー領域、(c)が高エネルギー領域を示しており、パル  
スは高エネルギー領域で目立っていることがわかり  
ます。天体以外からの X 線は差引済みです。

トルを比較してみるとよくわかります。定常成分  
のスペクトルが巾-1.9 の巾関数で表されるのに対  
してパルスしている成分の巾は-1.2 と高エネルギ  
ーでの放射量が多くなっていたのです。統計は悪  
いながらも、これがミリ秒パルサーからの非熱的な  
パルスの初めての発見でした<sup>6)</sup>。

#### 4. このパルスが意味するもの

それでは、これは何を意味するのでしょうか？ま  
ずわかるのは、「ミリ秒パルサーも非熱的なパルスを  
放出することができる」ことです。電波領域では、  
「普通のパルサー」と「ミリ秒パルサー」との差が  
ないようです。X 線ではどうでしょうか？

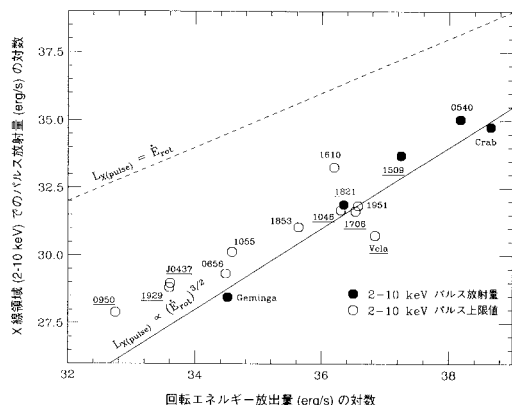


図4 X線でのパルス成分の明るさ ( $L_X(\text{Pulse})$ ) は回転エネルギーの放出量 ( $\dot{E}_{\text{rot}}$ ) の3/2乗に比例していると考え、「普通のパルサー」と「ミリ秒パルサー」との差がないように見えます。

調べてみてわかったのは、X線でもやはり明るさという点では両者の差はないようだということです。図4に示したようにX線でのパルス成分の明るさは両者とも回転エネルギーの放出量の3/2乗に比例しているようです。違いがみられないということは、両方のパルサーで同じ放射機構が働いていることを示します。先にも書きましたが、パルサーの活動を決定しているものは磁場の強さと自転周期です。これらの組合せで色々な量を推定することができ、加速電圧や回転エネルギーの放出量といった量もこれらに左右されているのです。色々な組合せの中で、どうもX線でのパルス成分の明るさは回転エネルギーの放出量と関連しているようなのです。

この結果から、放射機構に思いをめぐらすことができます。まず、X線パルスの放射量は年齢に依っているのではないことは確かです。これは、ミリ秒パルサーがまざっているおかげで区別できたものです。熱放射の量は中性子星が徐々に冷えてくるため、年齢によって大きく変化します。中性子星表面からの熱放射の量と、非熱的X線パルスの放射量とは無関係なのでしょう。

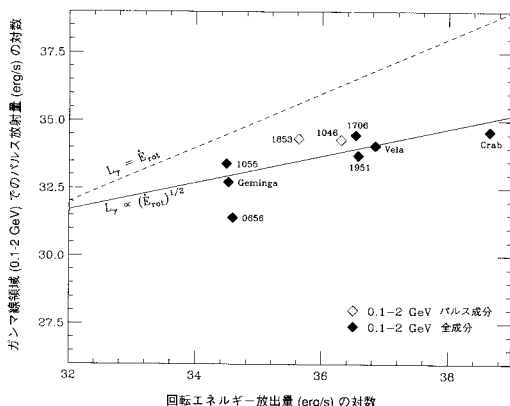


図5 EGRET 検出器のガンマ線領域ではパルス成分の明るさ ( $L_\gamma$ ) が回転エネルギーの放出量 ( $\dot{E}_{\text{rot}}$ ) の1/2乗に比例しているようだとされています。

EGRET 検出器のガンマ線領域ではパルス成分の明るさが回転エネルギーの放出量の1/2乗に比例しているようだとされています(図5)<sup>4), 6)</sup>。もっとも、こちらは年齢に反比例するとも言われています。パルスが検出されたのが「普通のパルサー」だけなので区別できないのです。ガンマ線領域とX線領域でのパルス成分の明るさは両方とも回転エネルギーの放出量に依ってスケールするのですが、X線領域での明るさの方が大きく変化するというわけです。

このような現象が起きている原因を、私たちは次のように考えています<sup>7)</sup>。まず、粒子が加速されているのは、ちょっと中性子星から離れたところで、表面からの放射の影響がそれほどないところでしょう。パルサーの磁気圏が互いに相似になっていると考えてみます。むろん、中性子星の部分は違ってしまっていますが、パルスを放射している外の方が同じという意味です。そのとき、磁気圏での磁場の強さは、光円柱半径での磁場によって定まります。細かいことは省きますが、そうすると、パルス放射量が回転エネルギーの放出量でスケールすることを説明できます。そして、そこでは最初に加速され

た粒子がガンマ線パルスを作り、それらから作られた二次的な粒子が X 線パルスを作っているというわけです。もちろん、もっと細かくきちんと考えてみる必要があります。多くの人が興味をもってこの新しい結果を解釈してパルサーで起きている面白い現象の原因を考えて欲しいと思っています。

## 5. それから・・・

この結果を基に私は博士論文を書きました。とはいえこの研究が終わったわけではありません。ミリ秒パルサーから非熱的な X 線パルスが見つかったのは、たったの一例です。これだけが特別ということはないでしょうか？ また、このパルサー PSR B1821-24 は、より高いエネルギー領域でパルス放射をしているのでしょうか？ そのために、「あすか」で他のミリ秒パルサーの観測をしたり、高いエネルギー領域に感度を持つ RXTE 衛星で PSR B1821-24 を観測したりして、より深く調べてゆこうと考えています。

さらに、PSR B1821-24 はもう一つ興味深い結果をもたらしました。先ほど、お話したパルス波形でみえていた定常成分は実は、同じ方向にあった別の天体からの放射でした。これは、カリフォルニア工科大学のダナーさん、クルカルニさんとローサットの HRI という空間分解能のよい検出器の結果と合わせて解析したことでわかったことです<sup>8)</sup>。この放射は面白いことに広がった領域から放射されています。これが、どういう現象によるものかは難しく、一つは、古い種族の天体が集まっている球状星団に最近エネルギーが供給されたばかりのパルサー星雲があると解釈すること。もう一つは、ミリ秒パルサーになる前の連星で隣の星から物が降ってきている状態の天体が集まっていて、普通は X 線で非常に明るいのにはこれらはこれまでにないほど暗いと考えること。いずれにしても奇妙な現象です。

思い返せば、PSR B1821-24 は私にとっての「幸運の星」でした。その星は、博士論文の題材を見つけれず困っていた私にそっと隣りかけました。

その輝きは闇夜を照らしつづけ、ついに山頂の高みへ導き、そして今も、広大な宇宙の神秘の探求へ乗り出さんとする私を後押ししてくれるのです。ずっと大学院での生活にわたって指導してくださった東大理学部釜江先生、この星をアイデアとともに私にもたらしにくださった理化学研究所宇宙放射線研の河合先生、そして、「あすか」を立案、開発、運用してこられた方々に心から感謝させていただきたいと思います。新天地の気球グループでもよい研究が続けられることを願いつつ、筆を置かせていただきます。

## 参考文献

- 1) Lyne, A. G., Graham-Smith, F. 1990, *Pulsar Astronomy*, Cambridge University Press, New York
- 2) Taylor, J. H., Manchester, R. N., Lyne, A. G. 1993, *ApJS* 88, 529
- 3) 柴崎 徳明, 中性子星とパルサー, 培風館
- 4) Thompson, D. J., Harding, A. K., Hermsen, W., Ulmer, M. P. 1997, in *Proc. of the 4th Compton Symp.*, eds. Dermer, C. D., Strickman, M. S., Kurfess, J. D. (AIP, New York) P. 39
- 5) Becker, W., Trümper, J., *A&A* 326, 682
- 6) Saito, Y., Kawai, N., Kamae, T., Shibata, S., Dotani, T., Kulkarni, S. R., 1997, *ApJL* 477, 37
- 7) Saito, Y., 1997, *Doctoral Thesis*, University of Tokyo
- 8) Danner, R., Kulkarni, S. R., Saito, Y., Kawai, N., 1997, *Nature* 388, 751

## Discovery of the Non-thermal X-ray Pulsation from the Millisecond Pulsar PSR B1821-24

Yoshitaka SAITO

ISAS, Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa, 229-8510, Japan

Abstract: We discovered the non-thermal X-ray pulsation from the millisecond pulsar PSR B1821-24. Comparing the luminosity to that of ordinary high-field pulsars, we found the possible relation that X-ray pulsed luminosity is proportional to the  $3/2$  power of rotation energy loss. We consider the relation can be explained by a scaling law working in the spatial structure of pulsars' magnetosphere.