

マグネターの自由歳差運動の観測的研究

牧島 一夫

〈東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構（連携研究員）〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

〈東京大学理学系研究科物理学専攻（名誉教授）〒113-1133 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室（客員）〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: maxima@phys.s.u-tokyo.ac.jp



「すざく」やNuSTAR衛星を用いた硬X線観測により、2例のマグネター（超強磁場をもつ中性子星）で、硬X線パルスの位相が、パルス周期の 10^4 倍程度の長周期で進み遅れる変調現象が検出された。この変調の振幅はパルス1サイクルの10%程度であった。マグネター内部に 10^{16} Gに達する強いトロイダル磁場が潜み、その磁気圧で中性子星がわずかに縦長に変形する結果、自由歳差運動が起き、その周期と自転周期のビートにより、パルスの位相が変調されたと解釈できる。こうした例数が増えると、外から見えないトロイダル磁場の情報が蓄積できると期待される。

1. はじめに

基礎的な物理学の美しい発現を、宇宙の中に見出すことは、天文学の喜びの一つであろう。その立場から今回はマグネター、すなわち 10^{14-15} Gの強い双極子磁場をもつ中性子星（NS）で、自由歳差運動が起きている可能性を報告したい。すでに投稿論文や¹⁻⁴⁾日本天文学会の年会で報告し^{5,6)}、天文月報の拙著⁷⁾でも簡単に触れたように、2例のマグネターからこの現象の徴候が得られている。自由歳差運動は、軸対称（非球対称）な剛体の特徴だから、これらのNSはわずかに縦長に変形しており、それは内部に潜む $\sim 10^{16}$ Gという強いトロイダル磁場の磁気応力のためだ、という筋書きが浮上つつある。まだ検証すべき宿題は多いが、今後この解釈を詰めることで、外から直接には見えないトロイダル磁場の探査が可能となり、新しいNSの診断方法が手に入ると期待される。

2. ラグビーボールの運動

理系人の大多数は古典力学の一環として剛体の

運動を学び、その基本である「軸対称な剛体の自由歳差運動」を学習しているはずである。ところが近くの若手にこの概念を尋ねてみると、ほとんどが「ああコマの首振りですね」と答えてくれる。いや違う違う、それは外力が引き起こす強制歳差運動だと言っても、キョトンとされることが多い。そこでまず、自由歳差運動を復習してみよう。

軸対称かつ非球対称な剛体の身近な例として、図1のように、卵形のラグビーボールを考えよう。その重心とともに運動する系から見ると、重力や空気抵抗は近似的に無視できるので、ほぼ自由な（外力が働かない）剛体と見なせる。そのロングパスの動画を見ると、ボールは長軸（対称軸）回りに一定の周期 P_T で自転しつつ、ボールの長軸先端は慣性空間に対し、別の周期 P_{fp} と一定の首振り角 α で首振り運動を行っている。この首振りが「自由歳差運動」であり、投げ方によって、ボールの角運動量 \vec{L} とは独立に α が制御できるようだ。さらに $|\vec{L}|$ の大小にかかわらず、また α が小さい範囲ではその値によらず、 $P_T : P_{\text{fp}} \approx 3 : 5$ が成り立つようで、5回の自転の間に3回の首振

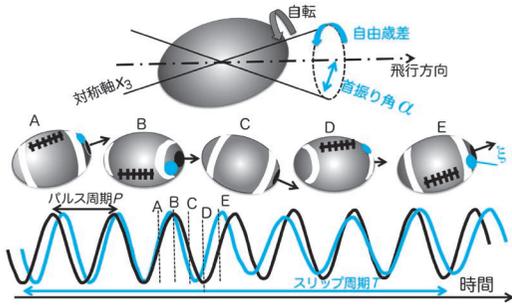


図1 ラグビーボールの首振りを見る，自由歳差運動．黒い曲線は，ボール先端にある光源を観測者が見る強度，青い曲線はそこから有限の角度だけ離れた位置にある光源（ボール先端の横にある青丸）の強度を示す．前著⁷⁾の図4を再掲．

りを行うわけである．この比はボールの形状，すなわち慣性モーメントテンソル I で決まっている．

図1でボールに固定した座標系 (x_1, x_2, x_3) をとり，その原点は剛体の重心に， x_3 は長軸（対称軸）に一致させると，慣性モーメントは $I = (I_1, I_2, I_3)$ と対角化される． $I_1 = I_2 \neq I_3$ であり，

$$\varepsilon \equiv (I_1 - I_3) / I_3; I_1 = (1 + \varepsilon) I_3 \quad (1)$$

が剛体の非球対称度を表す．縦長のレモン型なら $\varepsilon > 0$ ，扁平なミカン型なら $\varepsilon < 0$ である．

詳細は力学の教科書を見てもらうとして，ラグビーボールの3:5の一般化として，

$$P_r = 2\pi I_3 / L, P_{fp} = 2\pi I_1 / L = (1 + \varepsilon) P_r \quad (2)$$

が成り立つ．よって $|\varepsilon| \ll 1$ ならば P_{fp} は P_r に極めて近く，とくに球対称ならば両者は縮退する．コマの首振りや地軸の26,000年周期の歳差運動において，その周期が P_r よりもずっと長いのは，それらが外力による強制歳差運動だからである．

3. 自由歳差運動とその見え方

ラグビーボールに模様も「縫い目」も無ければ，自転は検知できず，自由歳差運動のみが観測されるだろう．ボールが遠方であり，首振りが解像できなくても，ボールの先端に光源を置けば，図1

の黒い正弦曲線のように，それは自由歳差周期 P_{fp} で明滅する．これはパルサーに対応し，双極子磁軸が対称軸と一致する限り，我々がパルサーから受ける信号の周期は， P_r ではなく P_{fp} である．

次にラグビーボールの先端から角度 ξ だけ離れた位置に青い光源を付け，その明滅を観測しよう．青光源が長軸回りに回転する周期は P_r で，それは式(2)により P_{fp} とわずかに異なる．そのため， \vec{L} (=飛行方向) と長軸を含む平面に乗り，慣性空間に対して周期 P_{fp} で回転する観測者から見ると，青点は x_3 の周囲をゆっくり回る．その周期 T は P_r と P_{fp} の「うなり」に相当し，

$$T = \left[(P_r^{-1} - P_{fp}^{-1}) \cos \alpha \right]^{-1} = \frac{P_{fp}}{\varepsilon \cos \alpha} \quad (3)$$

で与えられ，スリップ周期と呼ばれる．

この系を遠方から見ると図1の青曲線のように，青光源は，ある時は x_3 軸より少し早く，また $T/2$ ほどたつと x_3 軸より少し遅くこちらを向く．よって正確な周期で明滅するボール先端の光源に対し，青の明滅の位相は，周期 $T \cos \alpha$ でゆっくり進み遅れる⁸⁾．信号を微分して考えると，パルス周期の変化とみなすこともできるが，ここではパルス周期が一定で，その位相が周期的に変調されると見る立場をとる．この位相変調の振幅 A は， α や ξ で決まり， $\xi = 0$ (x_3 軸上の光源) や $\alpha = 0$ (首振りなし) なら $A = 0$ である．

軸対称な剛体からパルスの位相変調が検出できれば， P_{fp} と T の測定値から，式(3)を用い $\varepsilon \cos \alpha$ がわかる．ただしこの現象が生じるには，

- ・天体が軸対称かつ非球対象なこと ($\varepsilon \neq 0$)．
- ・首振り角が0ではないこと ($\alpha \neq 0$)．
- ・放射パターンが x_3 軸回りの対称性を破ること (たとえば $\xi \neq 0$)．

という三重の対称性の破れが必要である．そのため過去に，電波パルサー⁹⁾ やX線パルサー¹⁰⁾ で自由歳差運動を検出したとする報告はあったが，説得力は必ずしも十分ではなく，とくに後者は降

着系であるため、強制歳差運動の可能性が排除できなかった。

4. マグネター 4U 0142+61

記事^{7,11)}にあるように、マグネターとは、孤立したNSのうち、ほぼX線のみで検出され、パルス周期 P とその変化率 \dot{P} から推定した双極子磁場が $B_d = 10^{14-15}$ Gと、臨界磁場 $B_c = 4.4 \times 10^{13}$ Gより強い(ランダウ準位の間隔 $>$ 電子の静止質量エネルギー)ものを指す。約30個が銀河系およびマゼラン雲に知られ、うち数例は超新星残骸に付随する。パルス周期が $P = 2-11$ secと遅いことから回転駆動NSではなく、降着駆動NSでもない。したがってマグネターは、その強大な磁場をエネルギー源としてX線を放射する、磁気駆動NSと考えられている。1990年代の半ば、この卓抜なアイデアを最初に提唱したのは、トンプソン(C. Thompson)とダンカン(R. Duncan)¹²⁾であり、それ以前も以後も含めて、40年近い年月かけて、マグネターの共通認識が出来上がったわけだが、その詳細は別記事¹¹⁾に譲る。

X線衛星「すざく」によるマグネター観測に最初に挑戦したのは、当時大学院生だった榎戸輝揚氏で、私も共同提案者となり、X線で定常的に明るい4U 0142+62を選んで提案したところ採択され、2007年夏に観測が行われた。観測の主眼は、その数年前にガンマ線衛星INTEGRALにより複数のマグネターから検出された¹³⁾、極めて硬い「ハード成分」の確認であった。データを手にすると、驚いたことに、4U 0142+61のX線ソフト成分とハード成分が10 keVを境に画然と分かれ、それぞれCCDカメラ(XIS; <10 keVを担当)と、我々の苦心の作である硬X線検出器(HXD; >10 keV)のエネルギー範囲にみごとに収まっていた。さらにハード成分の極めて硬いスペクトルは、HXDのバックグラウンドのスペクトルと酷似していた^{11, 14, 15)}。まるでこの天体は「すざく」のハードウェアを知り抜いているようで、タ

ダ者ではないと感じたのである。お蔭で私はそれまで関心の薄かったマグネターに興味を持ち、その研究にのめり込むことになった^{4,7)}。

2009年、私は榎戸氏、中川友進氏など二十数名と協力し、「すざく」を用いた大型観測「マグネター大研究」を実行する機会を得た。その一環として2009年夏、再び4U 0142+61を観測したところ、得られたソフト・ハード両成分の強度やスペクトル形は、前回のもので20%以内で一致した。「前回と同じだった」では論文が書けないと悩んでいると、一つ違いに気づいた。それは硬X線パルスの有意度である。

一般にX線強度の時系列データに潜む周期性を探するには、ある周期を仮定してデータを折り畳み、波形 $\{x_j; j=1, 2, \dots, K\}$ を求め、その平均値 \bar{x} からのずれを検定する。 x_j は第 j ビンのカウントレートである。その周期をもつ内在変動があると、折り畳む際に同相で足し合わされるが、同期しない変動は打ち消し合うことを利用している。検定には、各ビンの誤差 δ_j を用いて $\chi^2 = \sum_{j=1}^K (x_j - \bar{x})^2 / \delta_j^2$ を計算する χ^2 統計が良く使われ、この値が大きければ、その周期がデータに内在すると判断される。ただし折り畳むビン数 K の選び方に恣意性が残り、折り畳み波形の細かい構造(おもに雑音起源)にも影響される。これらの欠陥を補うには、 $\{x_j\}$ をフーリエ変換し、指定した第 N ($1 \leq N \leq K$)高調波までのパワーを加算した上で、結果を光子数で規格化すればよい。これが Z_N^2 と呼ばれる統計量¹⁶⁾、

- Z_N^2 は N には依存するが、 $N \ll K$ である限り、全ビン数 K によらない。
- N が小さい値(たとえば $N < 5$)ならば、折り畳み波形の高調波雑音に影響されにくい。
- パーセバルの等式により、 $Z_{K/2}^2$ は χ^2 と等価。
- 信号が白色雑音であれば、 Z_N^2 は自由度 $2N$ のカイ二乗分布に従う。

などの性質をもつ。今回はこの手法を用いた。

2007年と2009年に取得されたHXDデータの

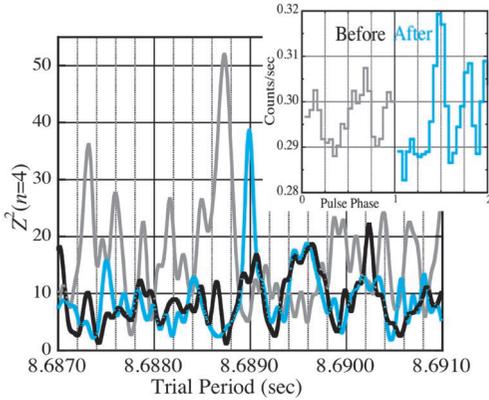


図2 HXDの15-40 keVデータを用いた、4U 0142+61のパルス探索のピリオドグラム。横軸は仮定したパルス周期、縦軸は Z_4^2 の値。灰色は2007年のデータ、黒は2009年のデータ、青は2009年のデータに復調操作を施したものの。2年間でスピンドアウンしている。右上の挿入図は、2009年の復調前（灰色）と復調後（青）のパルスプロファイル、ともに1サイクルで、各ビンの統計誤差はおおよそ0.02 c/s。

15-40 keVを用い、ハーモニック数 $N=4$ を選んでパルスを探索した結果が、図2のピリオドグラムである。2007年のもの（灰色）には、周期 $P=8.68871$ secに $Z_4^2=52$ に達する顕著なピークが見え、これは白色雑音で予想される $\langle Z_4^2 \rangle = 8.0$ を大きく越え、しかもこの周期はXISで検出したソフト成分の周期と一致する。一方2009年のデータだと、XISで見たソフト成分は、

$$P=8.68891 \text{ sec} \quad (4)$$

で明瞭にパルスしており、2年間に少しスピンドアウンしたことを除けば2007年と同じ状況だが、HXDでは図2の黒カーブのように、この周期では $Z_4^2 \sim 16$ で、しかもその値は一等賞とはほど遠いものだった。白色雑音の場合、自由度8 ($N=4$)のカイ二乗分布で $Z_4^2 \sim 16$ を得る偶然確率は4%ある。観測の全長は186 ksecなので、図2の横軸はフーリエ波数 ($186 \times 10^3 / P$) の21411-21401に相当し、独立な波数が12個ほど含まれるから、どこかの周期で有意度が偶然 ≥ 16 になる確率は

48%に達する。このように2009年のHXDデータでは、なぜかパルスが有意に受からなかった。

5. 硬X線パルス位相の周期的変調

2回の観測で、露光時間や天体強度に大差はなかった。そこで「予想通りにならない場合は必ず原因がある」という信念にもとづき、2009年に硬X線パルスが受からなかったことには、何か別に理由があると考えた。東大と理研という2つの職場を慌だしく行き来する中で、時おり思い出したような試行錯誤を2年間ほど続けると、HXDデータの短い区間を使った時にパルスの片鱗が現われ、しかもその位相が、ふらつく徴候が見えてきた。そこでまったくの現象論として、「何らかの理由で硬X線パルスの位相が周期的に変調され、そのためデータを折り畳んでもパルスがなまって検出できない」という仮説を考えついた。

この仮説を検証するには、個々の光子の到着時刻 t から、パルス位相の揺らぎによる時刻ずれ

$$\Delta t = A \sin(2\pi t/T - \phi) \quad (5)$$

を差し引いた上で改めてデータを折り畳み、変調周期 T 、振幅 A 、および初期位相 ϕ を振って、 Z_N^2 が最大になる条件を探せばよい。周期的な位相揺動が内在すれば、それを適切な T, A, ϕ で打ち消すことで、パルスの有意度が回復できるはずである。変調されたものを元に戻すという意味で、以下これを復調 (demodulation) 操作と呼ぶことにする。逆にパルスの位相が完全に一定ならば、式(5)を施すと位相が狂うから、どの T でも Z_N^2 は増加せず、 $A \sim 0$ が最適値となろう。この方法は1980年代に数個のパルサーで、軌道ドップラー効果の探索に用いられた手法¹⁷⁾と似る。

さっそく2009年のHXDデータに式(5)による復調操作を施し、結果を Z_4^2 で評価したところ、図3(a)に示すように、

$$T=55 \text{ ksec}, A=0.7 \text{ sec}, \phi=75^\circ \quad (6)$$

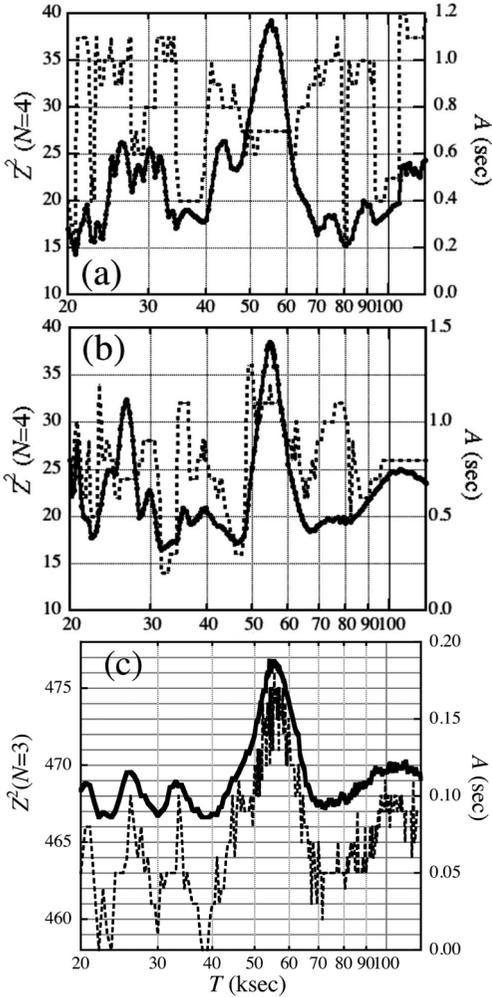


図3 4U 0142+61の復調ダイアグラム。横軸は仮定した変調周期，太い実線（縦軸は左）はその周期で光子の到着時刻を復調して得られるパルスの Z_N^2 の最大値。破線は，その最大値を与える変調振幅Aの値（縦軸は右）。(a) 2009年の「すぐく」HXDの15-40 keVデータ。N=4を使用¹⁾。(b) 2013年のHXDの同様なデータ³⁾。(c) NuSTARの10-70 keVデータ，N=3使用³⁾。

を仮定したとき，式(4)の周期におけるパルスの有意度が，大きく上昇することがわかった。「やったあ！」と感じる瞬間だった。このようにTに対してパルスの Z_n^2 を示したグラフを今後，「復調ダイアグラム」と呼ぶことにする。この $T=55$ ksecピークの高さ $Z_4^2 \sim 39.5$ は，偶然確率

4×10^{-6} に相当する。周期Pの探索ステップ数だけでなく， T, A, φ の独立探索ステップを考慮しても，この操作全体を通じてこのピークが偶然に生起する確率は $< 6 \times 10^{-3}$ となった¹⁾。つまり復調操作を施すことにより初めて，パルスが高い有意度で検出できたのである。

この復調操作の劇的な効果は，図2のピリオドグラムに曲線で示されている。式(5)と式(6)に従い，各X線光子の到着時刻を補正してから折り畳むと，正解である式(4)の周期に，高い単一のピークが立ったのである。このピークの値は，図3(a)の復調ダイアグラムにおける， $T=55$ ksecピークの値と等値である。また図2の右上挿入図でわかるように，復調により硬X線パルス波形の振幅は明らかに増大し，しかも細かい構造まで現れた。復調操作を施さず単純に硬X線データを折り畳むと，パルス位相の周期的な揺れのため微細構造がなまされ，パルスの有意度が低くなっていたといえる。

これらの結果は，ソフトウェアがさして得意でない私が，FORTRANのシッポをひきずったC言語で書いた手作りプログラムで得たものだから，信頼性は決して高くはなからう。そう考えて榎戸氏に検証をお願いしたところ，独立なソフトウェアを用い，幸い同じ結果を導いてくれて，ほっと胸を撫で下ろすことができた。いわばこれが第一の検証である。第二の検証として，バックグラウンドデータや，「かに星雲」のデータを同様に解析し，復調操作が偽物の周期性を生み出すことが無いことも，確かめられた¹⁾。

6. 位相変調の解釈と第三の検証

パルス位相の周期的な変調と聞けば，真っ先に思い浮かぶのが，連星軌道運動によるドップラー効果だろう。実際，後に論文¹⁾が世に出た時，それを斜めに読んだ米国の天文学者から「めでたい，君はついにマグネターが連星だという証拠を見つけたな」という大誤解メールが来たほどだか

ら。確かに、NSの質量を $1.4 M_{\odot}$ (M_{\odot} は太陽質量)、相手の質量を $0.12 M_{\odot}/\sin i$ (i は軌道傾斜角)とすれば、式(6)の T を連星軌道周期、 A をNSの射影軌道長半径と解釈できる。しかしこの解釈は2つの理由で、直ちに棄却された。まずXISによる軟X線パルスには、2007年も2009年も、 $T=55$ ksecでの位相変調が見られなかった。さらに2007年のHXDデータでは硬X線パルスが、単純解析ですでに図2(灰色)のように高い有意度で見えており、復調解析を施しても有意度はほとんど向上しなかった。もし連星の効果であれば、どちらも起き得ないことである。

今回の観測スパン186 ksecは、55 ksecの3.4サイクル分に過ぎないので、果たしてこれが本当に周期性と言えるかどうかは難しいところだが、安定した周期性があるとするれば、やはり力学的な起源を考えるべきだろう。とすれば剛体の運動として基本的な、歳差運動が思い当たる。こうして、当初はまったく念頭になかった自由歳差運動という考えが頭に浮かんだ。そこで式(3)を使うと、

$$\varepsilon \sim 1.6 \times 10^{-4} / \cos \alpha \tag{7}$$

となる。マグネターの内部には、双極子磁場を超える強いトロイダル磁場 B_t が潜んでいるという予想は、いろいろな観点からなされているので、これは磁気応力による変形かもしれない。トロイダル磁場なら内部に閉じ込められ、外に顔を出さないから、観測された双極子磁場(4U 0142+61の場合は 1.3×10^{14} G)より強くても問題ない。

そこで直観的に ε がNSの磁気エネルギーと自己重力エネルギーの比の程度と考えると、 $B_t \sim 10^{16}$ Gが必要となるとわかる。より詳しい計算結果でもこのオーダーは変わらない¹⁸⁾。いくら何でも強すぎるのではと悩みつづ、そのころ私が兼務していた東大ビッグバンセンターの定例ミーティングで、この話をしたところ、重力波の専門家である伊藤洋介氏から、NSから重力波の放射を検討するさい $B_t \sim 10^{16}$ Gを仮定した例もあるという、

勇気の出るコメントをもらった。これで、自由歳差運動の可能性を追求する腹が決まったのである。誠にありがたかった。

そこで自由歳差運動の立場に立つと、以下のような解釈ができる。

- 4U 0142+61は内部に $B_t \sim 10^{16}$ Gを擁し、その磁気応力により式(7)だけ縦長($\varepsilon > 0$)に変形している。この変形の符合については藤澤幸太郎氏のご教示に負うところが大きい。
- $\varepsilon > 0$ なので、 L が一定ならば、 $\alpha = \pi/2$ (いわゆるフラットスピン状態)がエネルギー最小となる。よって自発的に自由歳差運動の首振りが発生し α が増大する。
- ハード成分の放射域や放射パターンは、星のもつ磁極周りの軸対称性を破る($\xi \neq 0$)ため、硬X線パルスは周期 T で位相変調される。その振幅 A は ε, α, ξ に依存して決まる。
- ξ は表面の磁場構造の変動などにより、年のスケールで変化する。2007年には $\xi \sim 0$ だったものが、2009年には $\xi \neq 0$ となった。
- ソフト成分の放射域は磁極周りに対称なため、軟X線パルスには位相変調が見られない。

こうして我々は2014年、成果をPhysical Review Letter (PRL)に公表することができ¹⁾、この論文は同年4月30日には、アメリカ物理学会が最新の注目すべき成果を紹介する“Spotlighting Exceptional Research”にも取り上げられた。

このPRL論文はゴールではなく、新たな研究の出発点となった。実際、2007年には見えなかった現象が2009年に現れた、ということ自体が怪しむべき部分を残していたからである。またPRL論文のレフェリーからも、「2007年と2009年の違いを説明するため、著者らが硬X線放射領域の変動を仮定するなら、そのためパルス位相に不規則な揺らぎが生じるはずだ。この位相雑音が偶然55 ksecに集中した結果を見たのではないのか?」という鋭いツッコミを受けていた。よって同じ天体でこの周期性を再確認するという、「第三の検証」が

必須だった。この観測提案も受理され、2013年夏、「すぎく」により三たび4U 0142+61が観測された。すると図3(b)に示すように、復調ダイアグラムの55 ksecに再びピークが現われ、さらに振幅が $A \sim 1.2$ secと増大していた。このとき我々はPRL論文でレフェリー対応中だったが、この結果にいかにも勇気づけられたか、お察しただけよう。この2013年の結果は、後に述べるNuSTARの結果 (§8) と抱き合わせて別論文になった³⁾。

7. 第四の検証：二例目 1E 1547-5408

4U 0142+61の結果は固まってきたが、一天体だけでは、「そいつだけ特殊なのでは」という疑念が払拭できないので、別天体からも同様な効果が検出されて初めて物理学となる。これが第四の検証といえよう。そこで榎戸氏と相談し次に選んだのが、 $P=2.07$ secという最速の自転周期をもつマグネター、1E 1547-5408であった。ほぼ一定のX線光度で光る4U 0142+61と対照的に、この天体はX線で大きく変動し、2009年の冬に突如3桁もX線で増光してバーストを激しく連射し¹⁹⁾、「すぎく」で丸一日の緊急観測が行われた。このときHXDで観測されたハード成分は、約5ミリクラブの強度をもち²⁰⁾、「すぎく」が観測したマグネターのハード成分の中で最強であった。

一度すでに通った道なので、今回の解析はスムーズに進み、図4(a)の復調ダイアグラムに示す通り、変調周期 $T=36$ ksecに顕著なピークが現れた。すなわち適切な A および φ を仮定して $T=36$ ksecで復調すると、周期 2.07214 secの硬X線パルスの有意度が、それまで $Z_2^2=22.1$ (偶然生起の確率 1.9×10^{-4}) だった状態から、 $Z_2^2 \sim 46$ (同 2.5×10^{-9}) にまで大幅に増大したのである。すべての探査ステップ数を考慮しても、この有意度の向上が偶然である確率は、0.4%を超えないことも確認された²⁾。共著者に独立なソフトウェアで解析を行ってもらい、結果の一致を確認したことは、第一の検討の場合と同様である。

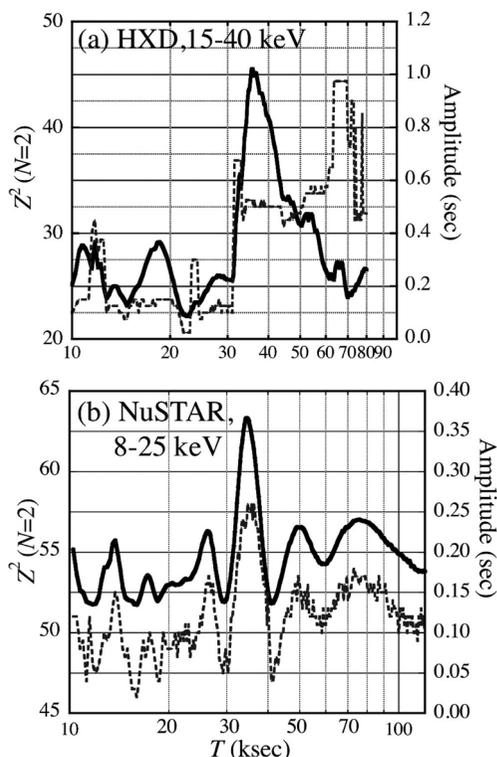


図4 1E 1547-5408の $N=2$ の変調ダイアグラム。実線と破線の意味は図3と同じ。(a) アウトバースト時の「すぎく」HXDデータ (15-40 keV) を用いた結果²⁾。計算が $T < 80$ ksecに限られているのは、観測スパンが86 ksecしかないため。(b) 静穏に戻った後の8-25 keV NuSTARデータを用いて計算した結果。

再び、この位相変調が自由歳差運動に起因するとの仮定に立って式(3)に照らすと、1E 1547-5408では $\varepsilon \cos \alpha = 0.6 \times 10^{-4}$ と、4U 0142+61の場合の式(7)と、同程度となった (α の値は観測から容易には決まらない)。これにより4U 0142+61で導かれた、磁力変形とそれに伴う自由歳差運動という解釈がより確実性を増したと言える。他方で4U 0142+61の場合はパルス1周期に対する変調振幅の相対値が、 $A/P < 0.1$ (2007), 0.08 (2009), および0.14 (2013) だったのに対して、この天体では $A/P=0.25$ となり、ほぼ1/4パルス分も進み遅れしていたが、これは1E1547

—5408が二山をもつファンビーム型パルス波形を示し、自由歳差運動によって2つのピークの相対強度が周期 T で入れ替わるとして説明できた²⁾。

4U 0142+61の観測では、XISの時間分解能が2.0 secと不十分だったが、今回の観測ではXISのCCDカメラのうち1台を、速い時間分解能のモードで運用したため、XISデータを用いた解析も実行できた。その結果、通常は用いられないXISの10–12 keVバンドを用いることで、HXDの結果を追認することができ、低エネルギーに向けて A が下がることも確認できた。これにより両天体に共通な特徴として、ハード成分のパルスは位相変調を受けるが、ソフト成分ではその効果が見られず、よって二成分の放射領域ないし放射パターン(指向性)が異なることも確実にになった。XISを使うことで、位相変調がHXDに特有な何らかのバグ(とするとHXD開発に関わった身として恥だが)起因では無いと検証できたことも、私にとっては大きな進展であった。

8. 第五の検証: NuSTAR衛星データ

2例目の天体の発見で、第四の検証はできたが、まだ、この現象は「すぎく」に固有な疑似効果ではないか、という疑念が残る。そこで第五の検証として、米国のNuSTAR衛星で観測された4U 0142+61のデータが公開されるのを待ちかねて、2014年の秋頃から榎戸氏を先頭に、その解析に着手した。NuSTARは硬X線の反射集光鏡を搭載しているので、日本の誇る「すぎく」HXDをさらに凌ぐS/N比が期待される。ところが彼から送られてくる報告は、「どうも見えませぬえ...」。折しも、日本のX線天文学に偉大な足跡を遺された田中靖郎先生(惜しくも2018年1月にご逝去²¹⁾)から、「NuSTARのデータを用いると、君が見つけたはずの位相変調が見えなかった、という論文が出ているが、大丈夫かね」とのご下問まで届いた。確かにTendulkar et al. (2015)²²⁾を読むと、「すぎく」の主張する55 ksecの位相変調

は見られない、と報告されている。一瞬、青くなっただが、ここで挫けては元も子もない。

そこでNuSTARのカウント時系列データを榎戸氏からもらい、再びデータとの格闘が始まった。大学の定年退職などのドタバタを挟み、時間はかかったが、ようやく結論にたどりついた。すなわち図2(c)に示すように、 $T=55$ ksecで光子の到着時間に復調をかけると、確かにパルスの有意度が向上する。ただし最適な振幅は「すぎく」で得たものよりずっと小さく $A/P\sim 0.02$ だった。したがって、画像の切り出しやエネルギー帯の選別を最適化しないと、すぐ雑音に埋もれてしまう。またNuSTARデータの統計が良くパルスの有意度が高いため、復調前にすでに Z_4^2 が400を超す巨大な値をもち、そこからピークでの増分が小さいので、NuSTARデータだけから55 ksecの変調周期の存在を主張することはできず、あくまで探索範囲を「すぎく」の発見した変調周期に限れば、NuSTARでも統計的に有意な変調が掛かっている、という落とし所となり、結果をPASJに出版できた³⁾。図2に示した3つの復調ダイアグラムは、まるで三つ子のようだ。加えて、 <10 keVでは変調効果が消えることも再確認できた。

こうして A が変化することが確実となった。2007年の「すぎく」の観測では、NuSTARの時と同様、 A が極めて小さかったため、復調なしにパルスが検出できたと考えられる。それにしても、もし仮に2009年にも A が小さく、簡単に硬X線パルスが検出できていたなら、今回の研究は生まれなかつたらう。誠に幸運であった。

「すぎく」では難しかったが、NuSTARの優れたS/N比を活かすと、パルスの位相変調を目で見ることが可能となった。図5(a)はNuSTARの10–70 keVの個々の光子について、その到着時刻をパルス周期 P で割った剰余を横軸、変調周期 T で割った剰余を縦軸として集積した、「二重フォールディング」の結果で、2山パルスのうち、強い第1ピークが白い縦縞、弱い第2ピークが灰

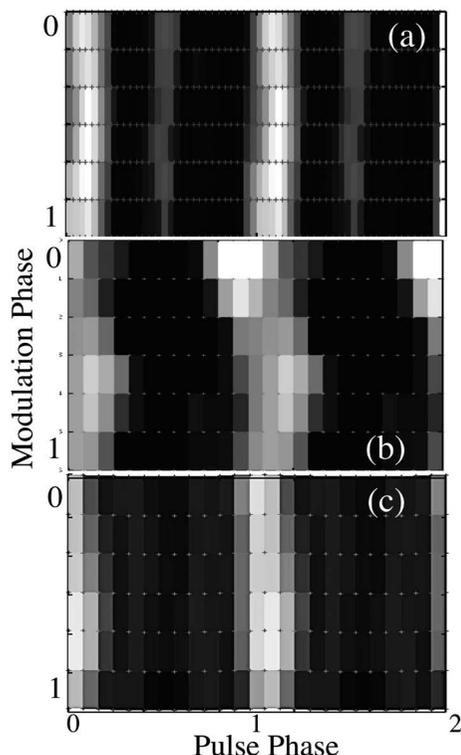


図5 NuSTARのX線カウント時系列を、横軸はパルス周期 (2サイクル)、縦軸は変調周期 (1サイクル) で折り畳んだ二重フォールディングの結果を、グレイスケール表示したもの. (a) 4U 0142+61 の10-70 keV データ³⁾. (b) 1E 1547-5408 の8-25 keV データ. (c) パネル (b) と同じだが、4-8 keV データを使用.

色の縦縞を作る. よく見ると白い縦縞が、完全にまっすぐ上下に走るのではなく、わずかに左右にうねることがわかる. これが位相変調である.

返す刀で、榎戸氏がNuSTARに観測提案して獲得した、1E 1547-5408 のデータ解析に着手している. この天体は2009年のアウトバーストの直後、10日ほどで急速に2桁も減衰し、その後は数年のオーダーで徐々に暗くなった^{11, 23)}. NuSTARの観測が行われた2016年4月には、「すぎく」の観測時点より、1桁ほど暗くなっていた. 変調効果の探査は順調に進み、「すぎく」の発見した $T=36$ ksec でパルス位相が明確に変調を受けており、それを復調することでパルスの有意度が上がるこ

とが確認された (論文は執筆中). この結果を示した復調ピリオドグラムが図4(b) で、「すぎく」の時に比べ、変調振幅がほぼ半分になっている.

この位相変調を直観できる結果が図5(b)(c) で、ハード成分が卓越する8-25 keVを二重フォールディングしたパネル (b) では、パルスの山 (この場合は一山) が、36 ksec周期の位相に依存して顕著にうねるのに対し、ソフト成分の強い4-8 keV (パネルc) ではパルスの山がまっすぐ走ることがわかる. 最後の登場となったが、これが位相変調現象の、最もわかりやすい表示方法であろう. 4U 0142+61の結果も (a) に載せた.

NuSTARのデータを用いることで、位相変調が「すぎく」に特有な何らかの疑似効果かという疑念も払拭できた. また一步、前進したと言える.

9. 第六の検証: 比較対照天体

こう述べてくると、「もしやどんなパルサーからも、パルスの位相変調が受かってしまうのでは?」という、さらなる疑念が沸くだろう. そこで第六の検証として、マグネターに近いパルス周期をもつ7.7 secの連星X線パルサー4U 1626-67を選び、「すぎく」で観測されたそのデータに、同様な復調解析を施してみた. この天体は連星系だが、相手の星が極端に低質量 ($<0.04 M_{\odot}$) いため、X線に軌道ドップラー変調が現れず、軌道周期 $10 \text{ min} < T < 10 \text{ hr}$ の範囲で、 $A < 0.0013 \text{ sec}$ であることが知られており²⁴⁾、好都合である.

紙面の都合で図は省略するが、この解析の結果、 $10 \text{ ksec} < T < 100 \text{ ksec}$ の範囲で、変調ダイアグラムに顕著なピークは現れず、いずれの変調周期でも $A < 0.06 \text{ sec}$ ($A/P < 0.8\%$) が確認でき、先行研究²⁴⁾ と無矛盾となった. また一つ、結果の信頼度を上げることができたと思う.

10. 今後の展望

この新しい研究テーマは、以上6段階の検証を通じて進展して来たが、まだ以下の膨大な作業が

待っている。やることが多いのは良いことだ。

- NS表面の放射領域や放射パターンを数値モデル化し、観測されるパルス波形（位相を含む）がTの1周期でどう変化するか予測し、それをデータと照合することで、 α や、 ξ など放射領域の形状を推定すること。
- 「すざく」やNuSTARの豊富なアーカイブデータを用い、自由歳差運動の例数を増やすこと。現状では、SGR 1900+14, RXJS J170849-40091などが有力視される。
- 超新星残骸の中央に見られる Central Compact Objects (CCO) と呼ばれる一群のNSに対し、自由歳差運動を探索すること。
- 例数が増えた段階で、特性年齢、双極子磁場の強度、 ε から推定した B_l の値などの間に相関を探索し、そこからマグネターの形成シナリオや、その超強磁場の起源を探ること。
- A（あるいは ξ ）がなぜ変動するか、その物理的描像を追求し、そこからマグネターの硬X線放射の機構に切り込むこと。

すでに私は大学院生を指導する立場にはないし、自分一人ですることは限られている。よってこの魅力的なテーマに興味のある方は、ぜひ研究に参加いただければ幸いである。

謝 辞

榎戸輝揚氏を筆頭として、村上浩章、鈴木寛大、丹波翼、會澤優輝の諸氏には、データ解析で助けていただいた。観測結果の解釈では、井岡邦彦、伊藤洋介、藤澤幸太郎の諸氏からは有益な助言を頂いた。この研究は科研費・新学術領域「中性子星核物質」（領域代表者：田村裕和氏）の公募研究、同・基盤研究（B）（2015-2017年度）、および基盤研究（C）（2018-2022年度）のサポートを受けた。

参考文献

- 1) Makishima, K., et al., 2014, Phys. Rev. Lett., 112, 171102
- 2) Makishima, K., et al., 2016, PASJ, 68, S12
- 3) Makishima, K., et al., 2019, PASJ, 71, 15
- 4) Makishima, K., 2016, Proc. Jp. Acad. B, 92, 135
- 5) 牧島一夫ほか, 2013, 日本天文学会春季年会, J72a
- 6) 牧島一夫ほか, 2015, 日本天文学会春季年会, J125a
- 7) 牧島一夫, 2015, 天文月報, 108, 721
- 8) <http://butikov.faculty.ifmo.ru/Applets/Precession.html> (2019.05.29) に優れた教育的な動画がある。
- 9) たとえばHaberl, F., et al., 2006, A&A, 451, L17
- 10) たとえばStaubert, R., et al., 2009, A&A, 494, 1025
- 11) 榎戸輝揚, 2012, 天文月報, 105, 431
- 12) Thompson, C., & Duncan, R., 1995, MNRAS, 275, 255
- 13) Kuiper, L., et al., 2006, ApJ, 645, 556
- 14) Enoto, T. et al., 2011, PASJ, 63, 387
- 15) Enoto, T. et al., 2010, ApJ, 722, L162
- 16) Brazier, K. T., 1994, MNRAS, 268, 709
- 17) たとえばKoyama, K., et al., 1989, PASJ, 41, 461
- 18) Ioka, K., 2001, MNRAS, 327, 639
- 19) Yasuda, T. et al., 2015, PASJ, 67, 41
- 20) Enoto, T., et al., 2017, ApJ, 231, S8
- 21) 柴田一成ほか, 2018, 天文月報, 111, 390
- 22) Tendulkar, S., et al., 2015, ApJ, 808, 32
- 23) Iwahashi, T., et al., 2013, PASJ, 65, 52
- 24) Levine, A., et al., 1988, ApJ, 327, 732

Observational studies of free precession of magnetars

KAZUO MAKISHIMA

¹Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, The University of Tokyo

²Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo

³High-Energy Astrophysics Laboratory, RIKEN

Abstract: X-ray observations of two magnetars, using the Suzaku and NuSTAR satellites, revealed that their hard X-ray pulses are subject to slow phase modulation, at a period some 10^4 times longer than their pulse periods. The modulation amplitude reaches typically 10% of the pulse period. The most likely interpretation of this effect is that these objects harbor ultra-strong toroidal magnetic fields reaching 10^{16} G, and the associated magnetic stress deforms them into slightly prolate shapes. As a result, the objects undergo free precession, and the beat between their precession and rotation periods produces the slow pulse-phase modulation. This phenomenon will provide valuable information on the toroidal fields of magnetars, which are otherwise difficult to observe directly.