

## 連星系中性子星の自転周期の測定とその変化の解釈

## Measurement and interpretation of change of rotation period of neutron star in a binary system

○山本 堂之<sup>1</sup>, 三原 建弘<sup>2</sup>, 中島 基樹<sup>3</sup>, 藤井紫麻見<sup>4</sup>

## 1 連星系中性子星とその自転周期変化

## 1.1 中性子星

中性子星とは、太陽質量の 8 倍より質量の大きい恒星がその一生を終える際に起こす超新星爆発で作られる、中性子の縮退圧で支えられた高密度の天体である。多くの中性子星は数ミリ秒～数百秒で自転しており、磁軸と回転軸の不一致により磁極が見え隠れすることで、「中性子星パルサー」として観測される。

## 1.2 中性子星磁場

中性子星は非常に強い磁場を持っており、その強磁場起源の解明は、核物理学における磁性や強磁場下での電磁気現象など、多くの基礎物理学に重要性を持つ。

連星系をなす中性子星の表面磁場強度  $B$  は観測される X 線のエネルギースペクトルの構造から直接的に測定することができる。中性子星表面では強磁場のために電子のサイクロトロン運動の半径が小さくなり、エネルギー準位が量子化される。そのため、連続したスペクトルの X 線が入射すると、量子化されたエネルギー準位と共鳴して X 線スペクトルに吸収構造があらわれる。これをサイクロトロン共鳴散乱と呼び、そのサイクロトロン共鳴エネルギー  $E_a$  と中性子星表面磁場  $B$  の関係は以下の式 (1) で表される。

$$E_a = 11.6 \left( \frac{B}{10^{12} \text{G}} \right) [\text{keV}] \quad (1)$$

## 1.3 自転周期の変化と X 線光度の相関

X 線を出す中性子星パルサーのうち、可視光のスペクトルから水素等の輝線が観測される Be 型星と連星系をなす中性子星パルサーを Be 型 X 線連星パルサーと呼ぶ。Be 型星はその赤道周りに星周円盤と呼ばれるガス円盤を形成していると考えられており、中性子星がその円盤を横切るとアウトバーストと呼ばれる大增光を起こす。

中性子星の重力圏に引き寄せられた物質は角運動量を持つため直接的に落下せず、降着円盤を形成する。降着物質が中性子星に近づくと磁場の圧力のためにせき止められ、それ以降は磁力線に沿った移動しかできなくなる。その時の半径をアルフベン半径  $r_A$  と呼び、以下の関係から得られる。

$$\frac{B(r_A)^2}{8\pi} = \rho(r_A)v(r_A)^2 \quad (2)$$

$B$  は中性子星の磁場強度、 $\rho$  は降着物質の密度、 $v$  は自由落下速度である。降着が球対称であるという近似を使うと  $r_A$  は以下の式で表される。

$$r_A = 3.2 \times 10^8 \mu_{30}^{4/7} \dot{M}_{17}^{-2/7} (M/M_\odot)^{-1/7} [\text{cm}] \quad (3)$$

$\mu_{30}$  は磁気双極子モーメントの大きさ (単位:  $10^{30} \text{ G cm}^3$ )、 $\dot{M}_{17}$  は質量降着率 (単位:  $10^{17} \text{ g s}^{-1}$ )、である。さらに、中性子星の自転する角速度  $\Omega_s$  と降着物質がケプラー運動する角速度  $\Omega_K$  が等しくなる半径  $r_c$  は

$$r_c = (GM/\Omega_s^2)^{1/3} \quad (4)$$

である。もし  $r_A > r_c$  ならば、降着物質はアルフベン半径まで近づいた後、磁力線に捉えられ中性子星の自転と同じ角速度で運動するが、降着物質が磁場に振り回される角速度はケプラー運動の角速度よりも速くなるので、降着物質は遠心力で吹き飛ばされてしまう。これをプロペラ効果と呼び、この過程で中性子星は角運動量を失い、また、質量降着が起こらないため X 線も放射しない。

$r_c > r_A$  ならば、降着物質はアルフベン半径まで近づいた後、磁力線に沿って中性子星の磁極付近へと降着し、X 線を放射する。降着する物質のケプラー運動は高速であり、中性子星は降着物質から角運動量を獲得し、自転は加速される。加速の割合は質量降着率  $\dot{M}$  に依存し、質量降着率  $\dot{M}$  は X 線光度  $L_x$  に依存する事から、自転の変化率  $\dot{P}$  と X 線光度  $L_x$  には相関があることがわかる。これは以下の式によって表される。

$$-\dot{P} = 5.0 \times 10^{-5} n(\omega_s) \mu_{30}^{2/7} R_6^{6/7} (M/M_\odot)^{-3/7} I_{45}^{-1} (PL_{37}^{3/7})^2 [\text{s/yr}] \quad (5)$$

本講演では測定された自転周期  $P$  の変化を X 線光度  $L_x$  で説明出来るかを確かめ、また、中性子星連星系の軌道運動についての議論をおこなう。

## 2 測定

## 2.1 宇宙 X 線測定装置

本研究では 2 つの X 線測定装置を用いた。精度の良い連続的な X 線光度の変化を得るために、国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」船外実験プラットフォーム搭載の全天 X 線監視装置 MAXI を用いた。また、アウトバーストの全期間に渡って精度の良い中性子星のからの X 線パルスを得るために、アメリカの RXTE 衛星を用いた。

## 2.2 測定天体：Be 型 X 線連星パルサー GX 304-1

GX 304-1 はその名前 (Galactic X-Ray source) が示すように、X 線天文学の初期から知られている Be 型 X 線中性子星パルサー天体である。パルス周期 (= 自転周期) はおよそ 275 秒、連星周期 (中性子星と恒星が互いの周りを回る周期) は 132.5 日である。

GX 304-1 が 2010 年 8 月に起こしたアウトバーストは、MAXI GSC 装置 (2-20 keV) にて、最大強度が 0.6 Crab (Crab: かに星雲の X 線強度を 1 とした規格化単位) にもなる観測史上最大のアウトバーストであった。我々は GX 304-1 の増光を MAXI でいち早く検出し、日本の X 線天文衛星「すざく」とアメリカの X 線天文衛星 RXTE に緊急観測提案をおこなった。その結果、X 線スペクトルの ~ 54 keV にサイクロトロン共鳴吸収構造を発見し、式 (1) から中性子星表面磁場強度  $B$  を  $4.7 \times 10^{12}$  G と求めた。

また、RXTE 衛星は 2010 年 8 月、12 月、2011 年 5 月の 3 回のアウトバーストにおいて、合計 70 観測、200 キロ秒の観測をおこない、それぞれの観測で精度の良い自転周期を得た。

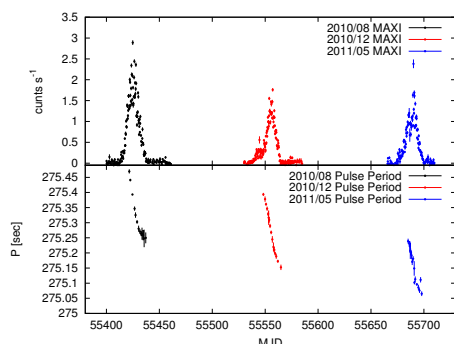


図 1: 上: MAXI で得た GX 304-1 からの X 線光度変化、下: RXTE で得た GX 304-1 のパルス周期  $P$  の変化

## 3 解析・結果

まず、中性子星の自転周期の変化が X 線光度で説明出来るかの検証をおこなった。図 2 上は MAXI が得た GX 304-1 の X 線光度曲線、下は RXTE 衛星が得た中性子星自転周期  $P$  の変化である。MAXI が得た光度曲線を見ると、アウトバーストはほぼガウス分布型をしている事がわかる。また、各アウトバーストの期間で自転周期が速くなっている (spin-up) している事が見てとれる。自転周期の変化  $\dot{P}$  と X 線光度  $L_x$  が比例しているならば、 $L_x$  を時間積分した関数  $\int L_x dt$  により自転周期の変化が再現できるはずである。

図 3 がその結果である。図の上パネルが MAXI の光度曲線をガウス関数で fitting したもの (つまり  $L_x$ )、中パネルが自転周期  $P$  の変化に  $\int L_x dt$  で fitting したもの、下パネルがその残差である。自転周期の変化は  $\int L_x dt$  で非常に良く再現することがわかる。

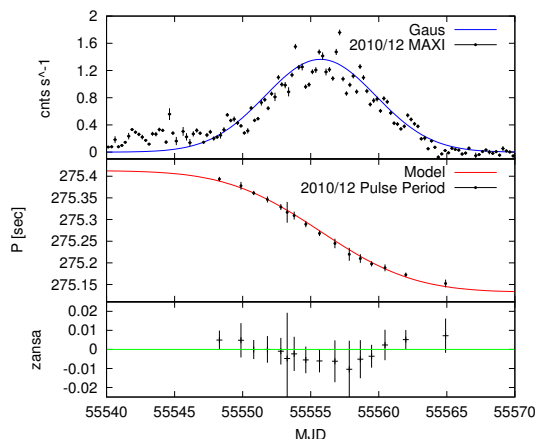


図 2: 上: MAXI で得た光度曲線とその fitting 線、中: 式 (5) の関数で fitting をおこなったパルス周期の変化、下: 中の残差

しかし、ここで図 2 に戻り下のパネルを見てほしい。自転周期の変化は各アウトバーストの間に自転周期が遅くなっている (spin-down) している事が見てとれ、測定された自転周期  $P$  の変化は単純に  $\int L_x dt$  にのみ依存しているのでは無い事がわかる。この変化がプロペラ効果による角運動量の持ち出しによって起こるのか、連星の軌道運動によるものなのかを切り分けなくては行けない。

なので次に、プロペラ効果による spin-down がどのくらい影響を及ぼすかを見積もった。式 (5) より計算されるアウトバーストピーク ( $L_x=0.3$  Crab) での最大変化率は  $2 \times 10^{-2}$  秒/日 程度である。それ以外の期間は MAXI の検出限界以下である事から  $3 \times 10^{-3}$  Crab 以下であり、変化率は  $2 \times 10^{-4}$  秒/日 であると考えられる。しかし図 2 から見積もられるアウトバースト以外の期間の変化率はおよそ 100 日で 0.15 秒なので  $1.5 \times 10^{-3}$  秒/日 である。式 (5) から見積もられる変化率と、測定データから見積もられる変化率には一桁の差があり、プロペラ効果では spin-down を説明出来ない。よってこの spin-down は連星の軌道運動によるものだと考えられる。

## 参考文献

- [1] 大槻義彦 編 「現代物理最前線 4」 共立出版株式会社 (2001)
- [2] 柴崎徳明 著 「中性子星とパルサー」 培風館 (1993)
- [3] Ghosh & Lamb, 1979b, ApJ, 234, 296-316
- [4] McClintock, J. E. et al. 1971, ApJL, 166, L73
- [5] Mihara et al. 1995, Ph. D. thesis, Univ. Tokyo
- [6] Friedhorsky and Terrell 1983, ApJ, 273, 709
- [7] Yamamoto et al. 2011, PASJ, すざく-MAXI 特集号