

# 論文の内容の要旨

論文題目：X-ray Studies of Highly Magnetized Neutron Stars in Binary Systems with *Suzaku*

(連星をなす強磁場中性子星の「すざく」衛星による X 線観測)

氏名 笹野 理

## 1 研究の背景

超高密度な状況が実現される中性子星は宇宙物理および原子核物理の両面から研究されており、とくにそれらの質量と半径は核力を理解するための状態方程式と強く関わるため、重要なパラメータである。加えて、中性子星はひじょうに強力な磁場 ( $B \sim 10^{12}$  G) を持ち、その磁場の起源を知ること、中性子星内部の理解につながる。

これまでの電波および X 線による観測から、中性子星の磁場強度は図 1 のように、 $10^8$  から  $10^{15}$  G までの広い分布を示し、 $10^8$ 、 $10^{12}$  と  $10^{15}$  G に山を持つことがわかってきた。電波での観測では  $10^{14}$  G まで見つかったものの、X 線では  $10^{12}$  と  $10^{14}$  との間に大きなギャップがあり、X 線連星パルサー (BXP) での電子サイクロトロン共鳴吸収構造 (CRSF) を使った観測では  $\sim 10^{12}$  G のみで、BXP で  $10^{13}$  G のものは見つからない。このギャップの問題は未解決であるが、観測の選択効果の可能性も高い。

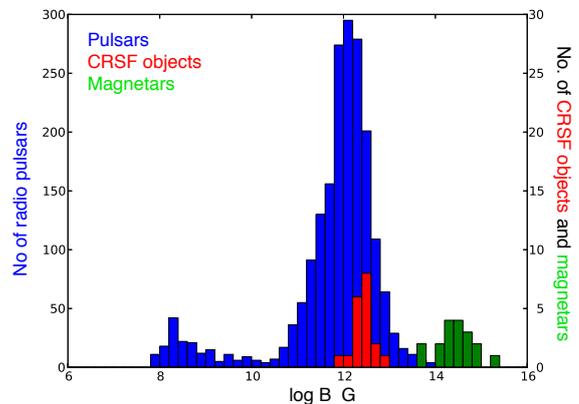


図 1 中性子星の磁場強度分布。

本論文では BXP を系統的に研究し、 $B=10^{13-14}$  G をもつ天体が存在するかどうか調べ、磁場分布上の  $10^{12}$  と  $10^{15}$  G の隙間が本物かどうかを観測的に検証する。これは中性子星の磁場の起源やその進化を知る上で、不可欠なステップと考えられる。

## 2 研究方法

本論文では広いエネルギー帯域での感度と軟 X 線での良いエネルギー分解能を持つ、日本の X 線衛星「すざく」を用い、これまでに観測された 25 個の BXP のアーカイブデータを系統的に解析した。このうち 13 個では CRSF が検出され  $B$  が精度よく知られているので、それらを較正天体に用い、スペクトルやパルスの性質のうち  $B$  と相関を持つ量を探し、その相関を用いて他の BXP の磁場を推定し、その中に  $B=10^{13-14}$  G の天体があるかどうか調べることにした。とくに図 2(a) で左上に分布している、X 線光度  $L$  が低くパルス周期  $P_s$  がひじょうに長い 5 個の「長周期パルサー」(LPP) を、 $10^{13}$  G 以上の磁場を持つ中性子星連星の候補として着目した。

## 3 解析結果

### 3.1 X 線パルス

BXP の X 線パルス形状はひじょうに個性的で、天体ごとに大きく異なる。本解析ではパルスの定量的評価として、パルスの振幅(パルス率)とそのエネルギー依存性に注目した。すると図 2(b) に示すように、多くの BXP (赤) ではパルス率が強いエネルギー依存性を示すのに対して、LPP (青) ではパルス率がエネルギーによらず大きな値をとることが判明した。このように LPP は典型的な BXP とは異なるパルス波形の特徴をもつ。

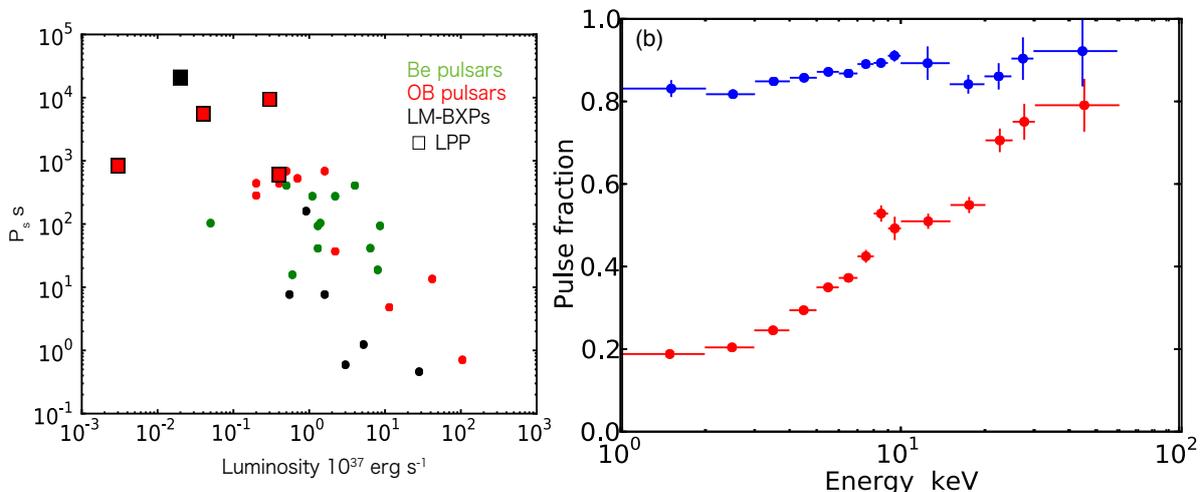


図 2 (a)  $L$  と  $P_s$  の散布図。黒は低質量パルサー、赤は OB パルサー、緑は Be パルサー。四角印は LPP 天体。(b) OB パルサー (4U 1907+09, 赤) と LPP (4U 0114+65, 青) のパルス率スペクトル。

### 3.2 スペクトルの連続成分

「すざく」搭載 XIS と HXD-PIN 装置により、すべての天体で 1~60 keV のスペクトルを取得し、うち 13 天体では HXD-GSO でも ~100 keV まで検出された。スペクトル形状の粗い評価として、まず 15-60 keV と 60-100 keV との強度比を調べた結果、周期の長い BXP ほど硬いスペクトルをもち、とくに 2 個の LPP はその相関の一方の端にくることがわかった。さらに図 3(a) と (b) のように、多くの BXP のスペクトルは、低エネルギーでは急峻な傾きで上昇し、~20 keV で折れ曲がるのに対し、LPP のスペクトルは明確な折れ曲がりなしに >20 keV までほぼ平坦に延

び、しかも5個のうちHXD-GSOまで検出できた2例では、 $\nu F_\nu$  スペクトル上で20 keVと80 keVに二つの幅広いピークが見られた(図3c)。これらの傾向を現象論的なモデルNPEXを改良したもので今回の対象天体のスペクトルをすべて再現し、パラメータ間の相関を調べ、LPPとほぼ同じX線光度を持つBXPと比較した結果、5つLPPのスペクトルがそれらのBXPと異なることが検証できた。

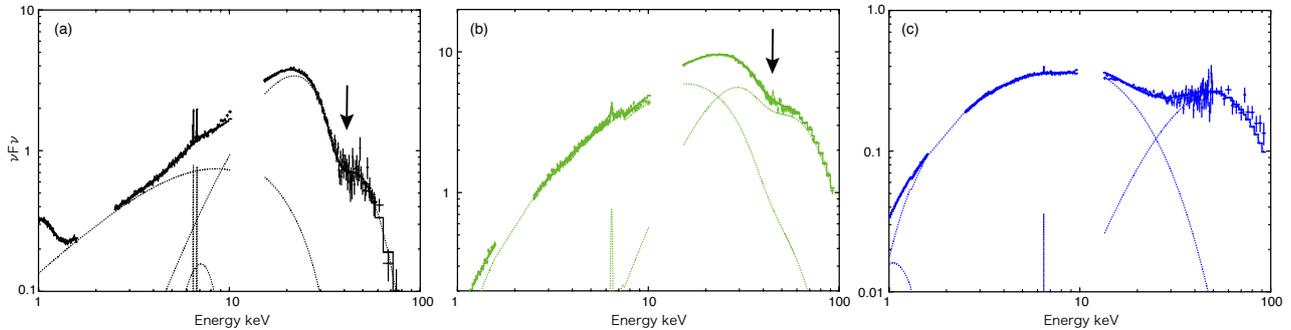


図3 3つのBXPの $\nu F_\nu$ スペクトル。(a)低質量星パルサー Her X-1。~35 keVにCRSFがある。(b) Beパルサー A 0535+26。CRSFは~40 keV。(c) LPPの代表例、4U 0352+30。CRSFは未検出。

### 3.3 鉄輝線

解析をしたほとんど全てのBXPから、エネルギー6.4 keVの中性鉄輝線が検出された。連続成分に対する鉄輝線の相対強度を評価するために等価幅(EW)を用い、視線上に存在する吸収物質の水素柱密度 $N_H$ (スペクトルの低エネルギー側での吸収から推定)。すると多くのBXPで、 $N_H$ が大きい時にはEWは $N_H$ に比例し、小さい時にはほぼ一定であった。このことから、周辺物質が濃い時にはそれらが一様分布し、薄い時には分布が非一様になることが推察される。ところが5つのLPPは $N_H$ が小さい場合でも $EW \propto N_H$ が成り立ち、他のBXPと違うことが示唆された。これはLPPの周辺物質が他のBXPでのものに比べて、より等方的に分布することを意味する。

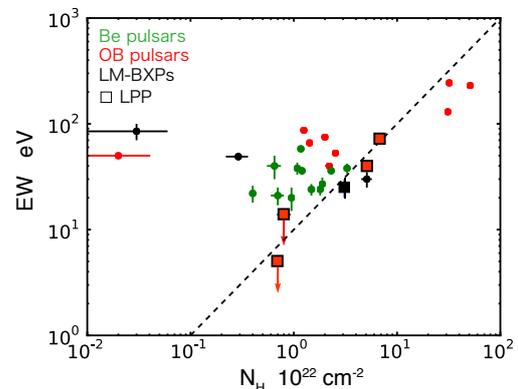


図4 鉄輝線のEWを、水素柱密度 $N_H$ に対してプロットしたもの。破線は、ガスが球対称かつ一様密度で分布するときの予想。色は図2と同様。

## 4 議論と考察

以上のようにX線パルス波形、スペクトルの連続成分、および鉄輝線という三つの観点から、LPPが少なくとも現象論的に他のBXPと異なることが示された。そこで次にこれらの違いが何に起因するかを調べるため、まずLPPの硬く平らなスペクトルに着目した。一般的なBXPは図3(a)(b)のように低い折れ曲がりエネルギー $E_p$ をもち、この $E_p$ は $B$ と正の相関を持つ。今回のサンプルの中でCRSFが検出された天体を使って得た $E_p$ と $B$ との相関を外挿し、高い $E_p$ をも

つ LPP に適用すると、LPP の内とくに高いエネルギーまで検出できている 4U 0114+65 と 4U 0352+30 が  $\sim 10^{13}$  G の強磁場をもつという結果が定量的に得られた。

LPP を含め、今回の BXP の多くは、星風捕獲型と考えられる。そこで磁気圧とガス圧の釣り合い点である Alfvén 半径  $r_A$  を、パルス周期で決まる共回転半径  $r_{co}$  と比べた結果、 $B$  のわかった OB パルサーでは  $r_A/r_{co} \sim 0.2$  となり、 $r_A \sim r_{co}$  でトルク平衡が成り立つとする従来の考えに修正が必要と判明した。修正した Alfvén 半径  $r'_A = 5.0r_A$  を導入してトルク平衡の関係を LPP に適用すると、それらの磁場強度は  $\sim 10^{13-14}$  G となり、スペクトルの折れ曲がりから推定した結果と一致した。このとき、LPP の  $r'_A$  は降着物質を捕獲する範囲を表す Bondi 半径  $r_B$  とほぼ同等となり、 $r'_A \sim r_B \sim r_{co}$  が実現されるという、新しい考えに到達した。

以上を受け、 $B = 10^{13-14}$  G をもつ星風捕獲パルサーが、どのような性質をもつべきか、トップダウン的に考察した。まず星風は  $r'_A \leq r \leq r_B$  の範囲でのみ捕獲できるので、 $B$  が強く  $r'_A \rightarrow r_B$  になると、捕獲率が下がり、必然的に低光度になるだろう。また中性子星からより離れたところで角運動量輸送が起こるので、パルス周期がひじょうに長くなる。CRSF エネルギーが  $\geq 100$  keV になるためその検出は難しく、しかもそれ以下の低いエネルギーではサイクロトロン共鳴による冷却が弱いので、高いエネルギーまで延びる硬い X 線スペクトルが期待される。通常の BXP では物質が  $r'_A$  のすぐ外側に非対称にたまと考えられるが、LPP では  $r_A \sim r_B$  となる結果この集積が乏しく、よって周辺物質が一様分布するので、 $N_H$  と EW は比例関係となる。このように、LPP の観測的な特徴はすべて、それらが強磁場 ( $10^{13-14}$  G) を持つという、ただ 1 つの仮定から出発して説明できる。これは、LPP が強磁場天体であるという本論文の主張を強めるとともに、LPP が磁場分布で隙間となっている  $10^{13-14}$  G に位置する天体の可能性を強く示唆する。

最後に LPP の形成を  $10^{15}$  G をもつ中性子星 (マグネター) の観測と照らし合わせて考察した。マグネターの観測から年齢につれて磁場強度が減衰することがわかっており、巨星の寿命である 1 Myr の間には磁場強度が  $10^{12-13}$  G となると予測される。そこで、もしマグネターが連星系に生まれたら、図 5 のように初期は  $r'_A \gg r_B$  なので降着が起こらず、降着型の X 線パルサーとしては観測されない。時間とともに  $r'_A \sim r_B$  となって降着が始まり、LPP として初めて観測される。このシナリオが正しければ、LPP は連星系で生まれたマグネターの成れの果てだと言える。

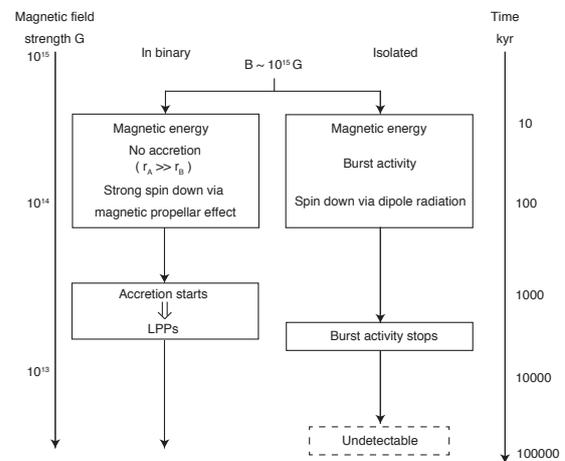


図 5  $B \sim 10^{15}$  G で生まれた中性子星の進化のダイアグラム。

## 5 結論

- 5 つの LPP のうち高いエネルギーまでスペクトルが得られた 2 天体で  $B \sim 10^{13}$  G という値が二つの方法で定量的に得られた。それらの特徴は、 $r'_A \sim r_B \sim r_{co}$  であるという条件から演繹的に説明でき、X 線観測でギャップになっていた  $10^{13}$  G を埋める天体である。
- それらの存在と、その検出の難しさ (低光度) を考えると、中性子星は  $10^{12} \sim 10^{15}$  G の広い範囲の磁場をもって生まれると推察される。
- $B \sim 10^{15}$  G で生まれた中性子星のうち、単独の物はマグネターとして観測され、連星中のものは、ある時間を経たのち、LPP として出現すると考えられる。