

MAXIとFermi/GBMによる7年間の連続監視データを用いた X線連星パルサーの降着スピナップ機構の系統的検証

杉崎 睦、三原 建弘、牧島 一夫(理研)、中島基樹(日大)
(Sugizaki et al. 2017, PASJ, Vol.69, 100)



X線連星パルサーは強磁場の中性子星と降着物質を供給する伴星からなる連星系である。降着物質は中性子星磁気圏に入ると磁力線に沿って移動し、中性子星表面に達するとそのエネルギーを解放してX線放射する。X線光度は中性子星への物質降着率に比例し、また降着物質は中性子星に角運動量を持ち込むことから、光度とスピニング変化率には正の相関があることが予想される。中性子星の質量、半径、磁場が分かれば、降着機構のモデルに応じて光度と周期変化率の関係を理論的に見積もることができ、逆に観測されている中性子星パラメータの検証に使える可能性がある。そこで、国際宇宙ステーション全天X線監視装置MAXIとFermi衛星ガンマ線バーストモニターGBMで、2009年から7年に渡って連続的に得られているBe星X線連星パルサーの光度とパルス周期のデータを用いて、降着トルクモデルの妥当性と精度を系統的に検証した。その結果、X線光度が 10^{37} erg s $^{-1}$ を超える増光が観測されたBe星連星パルサー全12天体に関して、増光中の光度とパルス周期変化率にほぼ比例の正の相関があることがわかった。観測された相関の比例係数は、12天体の平均ではGhosh & Lamb 1979の円盤降着モデルとよく合うが、個々の天体間では約3倍のばらつきがあることがわかった。このばらつきは、パルスX線放射が時間平均では等方的であるとした仮定と距離に含まれる誤差を考えると妥当である。今後、観測精度の向上と解析ターゲットを増やすことで、さらなる検証の発展を考えている。

1. 解析対象とするBe星連星パルサーの選別

Be星連星パルサーは、中性子星がBe星の星周円盤を通過した時に質量降着が起こり、大きなX線増光を示す。光度とパルス周期変化率の相関を調べる観測対象として、格好である。これまでに、我々の銀河系には約30個のBe星連星パルサーがX線と可視光観測で同定されているが、本研究の解析では光度とパルス周期に大きな変化があるデータが重要になる。そこで、2009年からの7年間にMAXI/GSCとFermi/GBMで10日間以上続いた増光が観測された12天体を解析ターゲットに選別した。右の表に12天体のパルス周期(P_{spin})、連星軌道周期(P_{orb})、軌道離心率(e)、可視光対応天体のスペクトル型(ST)、可視光観測から見積もられた推定距離(D)、X線のサイクロtron共鳴構造から見積もられた表面磁場(B)を示した。

Source name	P_{spin} (s)	P_{orb} (d)	e	ST	D (kpc)	B (10^{12} G)
4U 0115+63	3.6	24.3	0.34	B0.2 Ve	7 ± 0.3	1.0
V 0332+53	4.3	34.7	0.37	O8.5 Ve	6 ± 1.5	2.7
RX J0520.5-6932	8.0	23.9	0.03	O8 Ve	50 ± 2	2.8
H 1553-542	9.2	30.6	0.04	B1-2 V	20 ± 4	3
GS 0834-430	12.3	105.8	0.12	B0-2 III-Ve	5 ± 2	---
XTE J1946+274	15.8	169.	0.33	B01 IVVe	8.7 ± 1.2	3.1
2S 1417-624	17.5	42.1	0.45	B1 Ve	11 ± 5	---
KS 1947+300	18.7	40.4	0.02	B0 Ve	10.4 ± 0.9	1.1
EXO 2030+375	41.3	46.0	0.41	B0 Ve	6.5 ± 2.5	---
GRO J1008-57	93.5	249.5	0.68	B0e	5.8 ± 0.5	6.6
A 0535+262	103.	111.1	0.47	O9.7 IIIe	2.1 ± 0.5	4.3
GX 304-1	275.	132.2	0.52	B0.7 Ve	2.4 ± 0.5	4.7

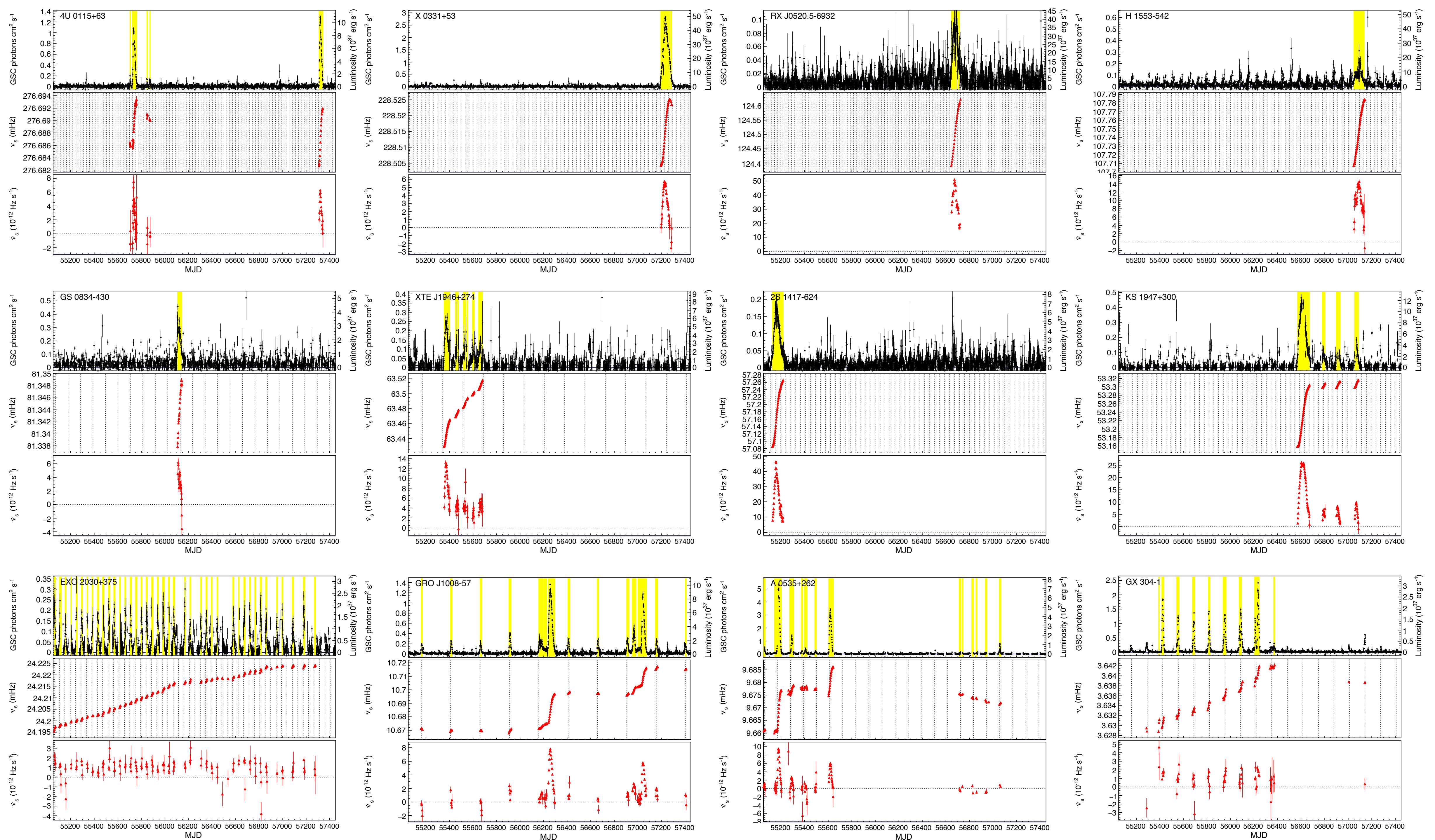
2. MAXI/GSC と Fermi/GBMで得られた7年間のX線光度とスピニング周波数、スピニング周波数変化率の時間変化

解析ターゲットに選んだ12天体の2009年8月から2016年3月までのX線光度、パルス周波数、パルス周波数変化率のデータ。各々の天体に対して、

1. MAXI/GSCで得られた1日平均のX線強度(上)
2. Fermi/GBMで得られた増光期のスピニング周波数 ν (中)
3. スピニング周波数データを線形fitして得られた周波数変化率 $\dot{\nu}$ (下)

をプロットした。X線強度のグラフには、右側の縦軸にX線のエネルギースペクトルと可視光対応天体の推定距離から見積もられた全放射光度を示した。

全ての天体で、X線アウトバースト期間中にスピニングアップしており、光度とスピニング周波数変化率が同様に変化していることがわかる。

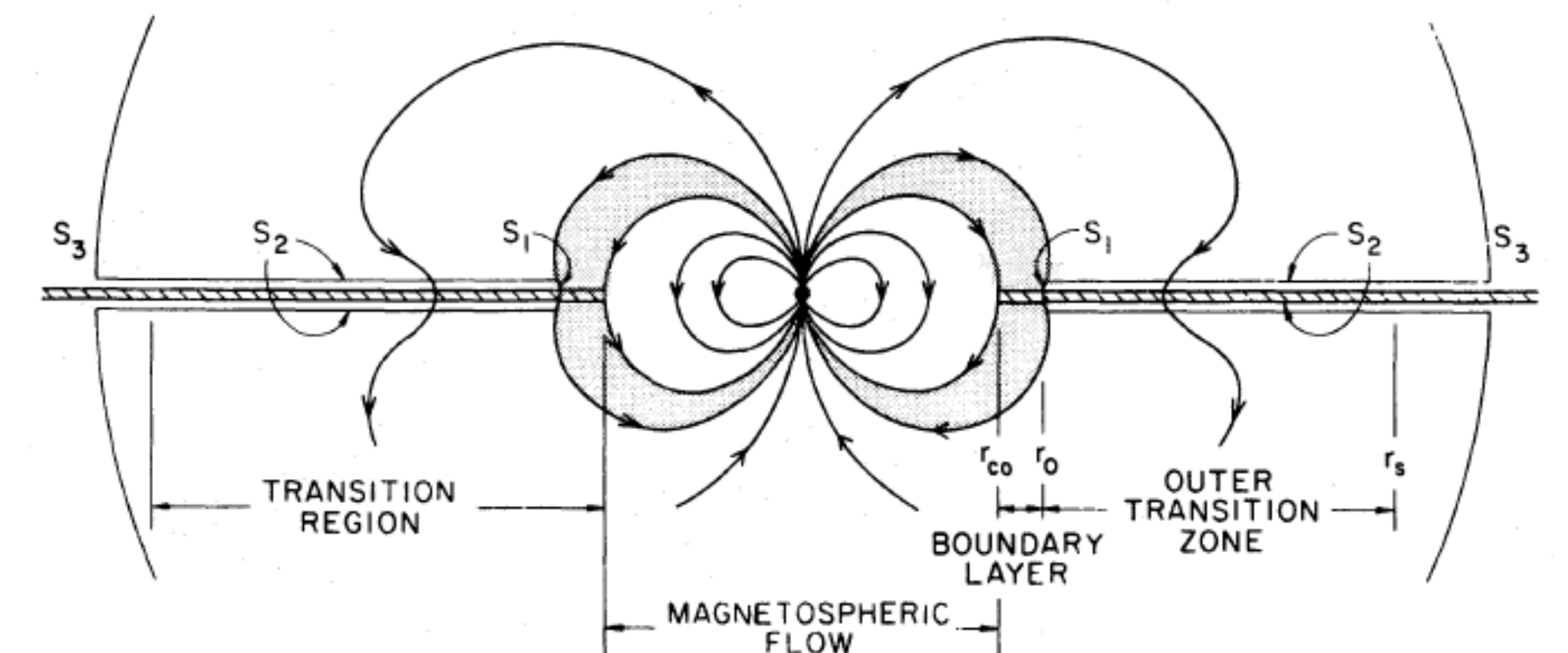
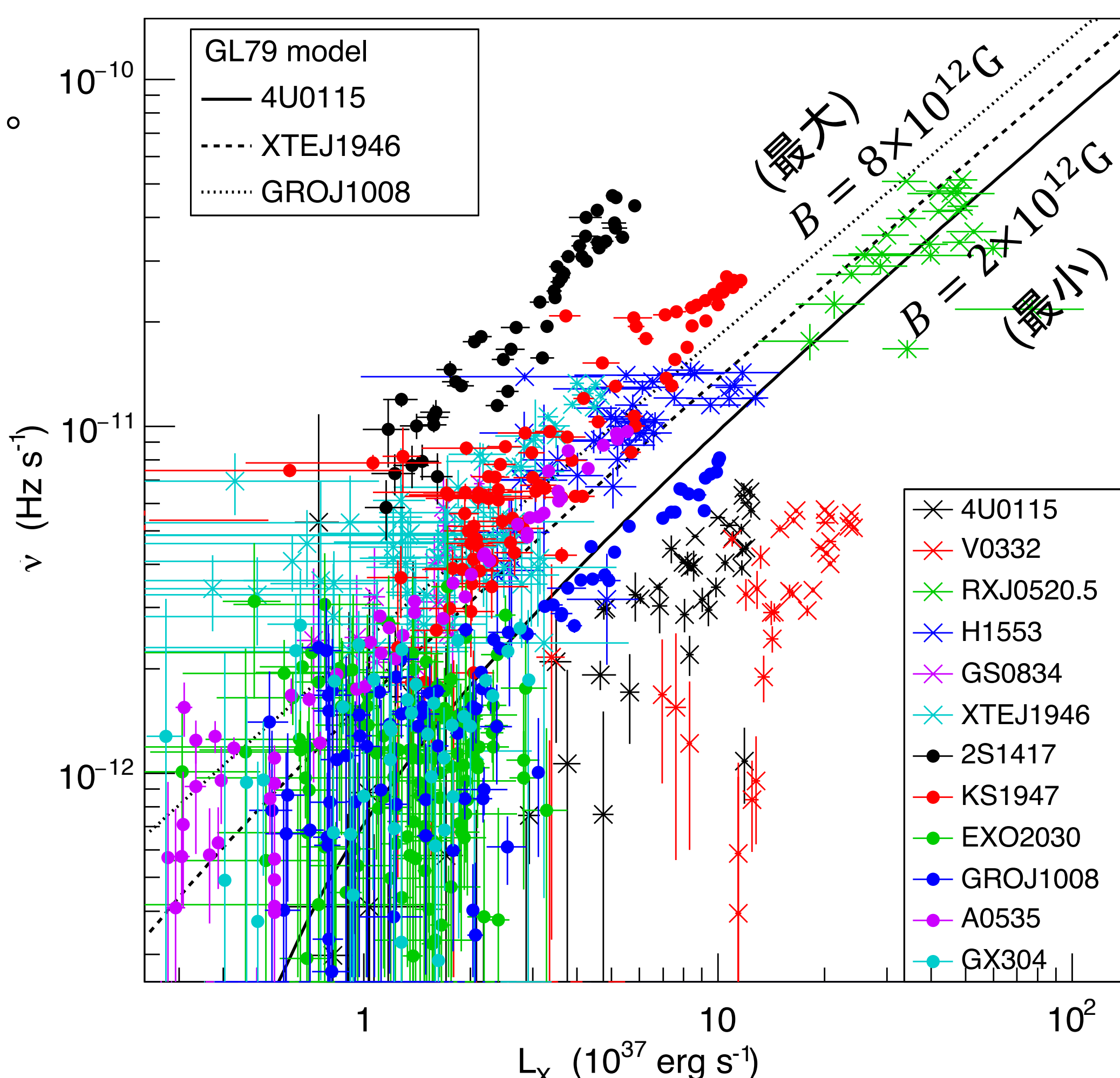


3. 光度とスピニング周波数変化率の相関 観測データと理論モデル

2.の解析で得られた12天体の光度 L とスピニング周波数変化率 $\dot{\nu}$ のデータの相関をプロットした。全ての天体で、比例関係($\dot{\nu} \propto L$)に近い正の相関があることを確認した。

典型的な中性子星の質量半径($M=1.4M_{sun}$, $R=10$ km)を仮定し、12天体の中でサイクロtron共鳴構造から見積もられた表面磁場 B が最大と最小のものに対してGhosh & Lamb 1979の円盤降着トルクモデルで予想される相関を破線と実線でプロットした。

個々の天体の $\dot{\nu} - L$ の比例係数はモデルから3倍程度のばらつきがある。磁場強度の不定性で説明できない。平均値は良く合う。観測値に含まれる誤差を見積もると、距離の誤差とパルス放射の異方性の誤差が大きく、3倍の開きは説明できる。



Ghosh & Lamb 1979 モデルにおける降着円盤と中性子星磁場との相互作用の概念図

光度 $L = \frac{GM\dot{M}}{R} \propto \dot{M}$

磁気圏半径 $r_A = \left(\frac{\mu^4}{2GM\dot{M}^2} \right)^{1/7}$

スピニングアップ率

$I\dot{\omega} \cong \sqrt{GMr_0\dot{M}} \propto \dot{M}^{6/7}$

円盤最内縁半径

$r_0 \approx 0.5 r_A$