

Ghosh & Lamb降着トルクモデルの X線連星パルサーX Perへの適用

立教大/理研 M1

谷田部 史堯

11/23 中性子星の観測と理論@国立天文台

降着駆動型X線パルサー

恒星と中性子星の連星系。

恒星からのガス降着により、中性子星の自転周期が変化する。

理論モデル(Ghosh & Lamb 1979)

$$\dot{\omega} = \dot{M} v_k R_a I^{-1} \quad L = \frac{GM\dot{M}}{R}$$

$$\dot{\omega} = -\frac{\dot{P}}{P^2} \propto n(\omega_s) \mu^{2/7} I^{-1} L^{6/7}$$

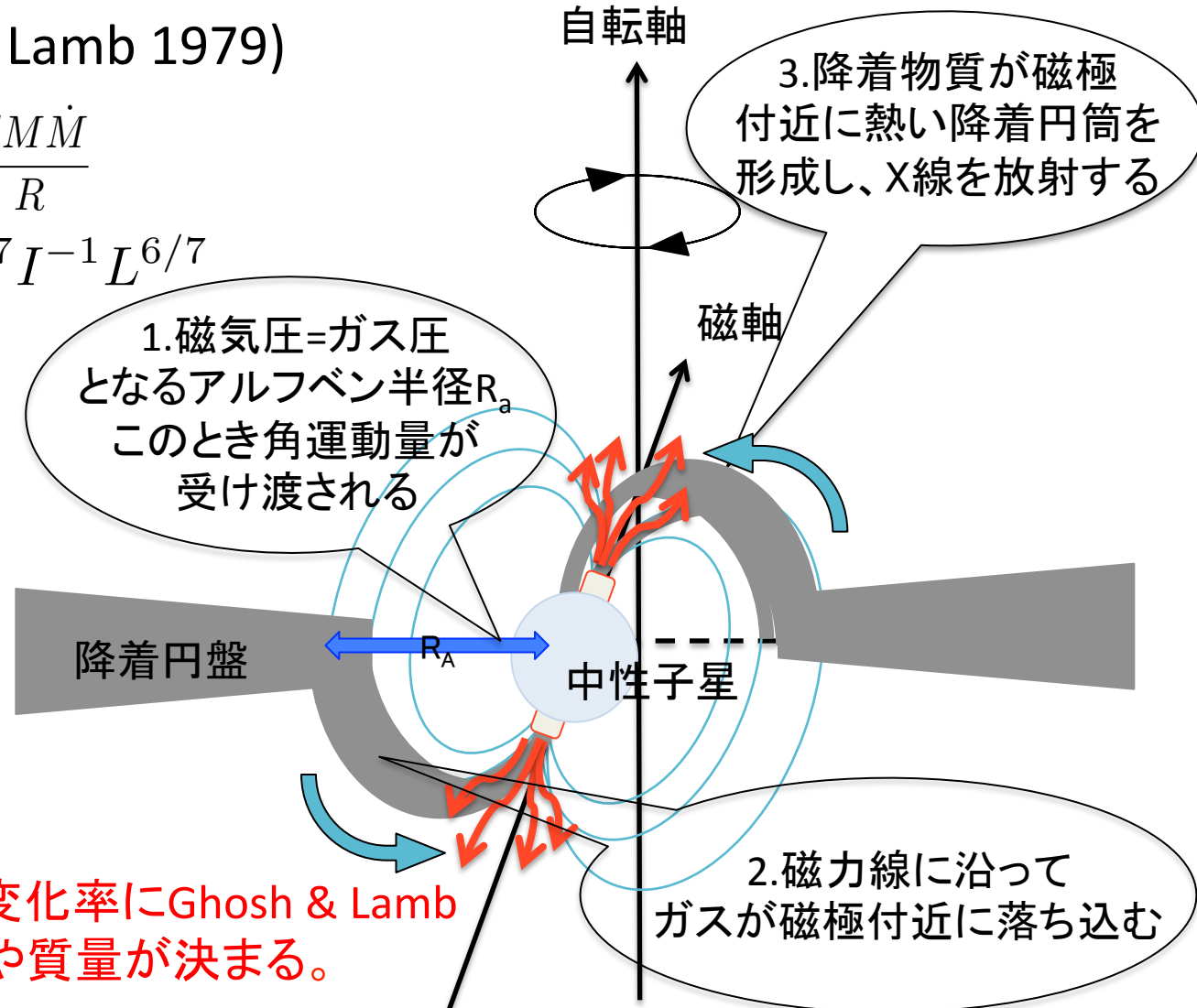
μ : 磁気モーメント
 I : 慣性モーメント
 M : 質量 R : 半径 L : 光度
 P : 自転周期

v_k : ガスのケプラー速度

\dot{M} : ガスの質量降着率

$n(\omega_s)$: spin upとspin down
を決める関数

光度、パルス周期とその変化率にGhosh & Lamb
モデルを適用すると磁場や質量が決まる。



Ghosh & Lamb 1979(GL式)の4U1626-67への適用

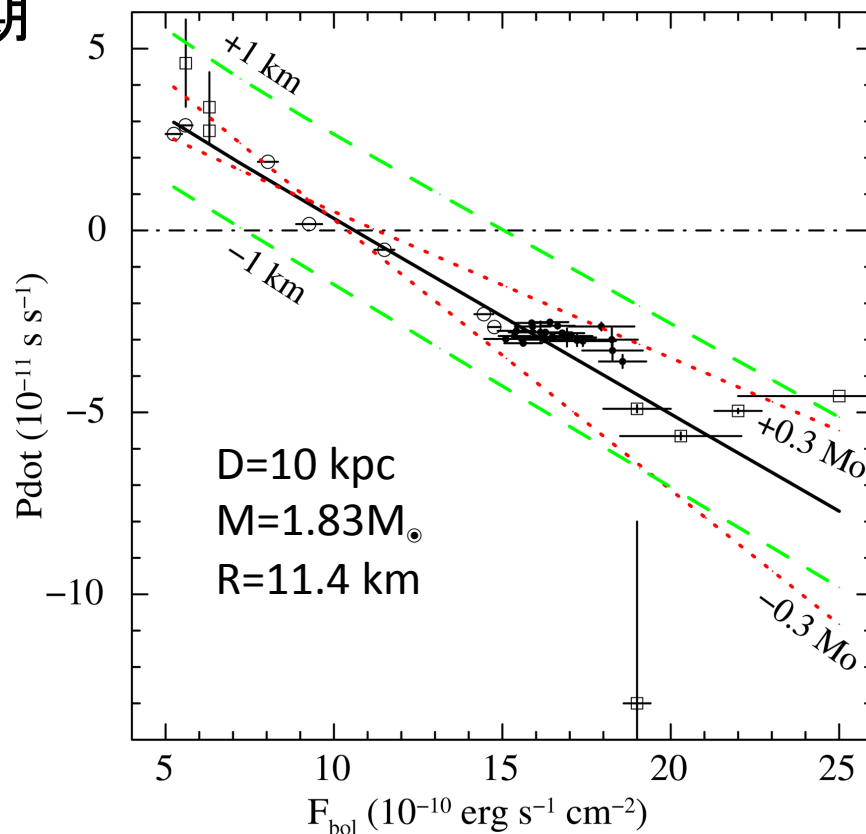
Takagi et al. 2016

モデルの観測的検証は、断片的に行われてきたが、本格的にはMAXI(長期の連続観測)で初めて可能に。

- MAXI/GSCを用いて4U 1626-67の2009-2013の dP/dt とFluxを求め、3つの未知数 M, R, D を推定した。

4U 1626-67

- 低質量X線連星パルサー
- spin up期と spin down期を示し、トルク平衡に近いことが示唆される。
- サイクロトロン共鳴の観測により、磁場 $B=3.2 \times 10^{12}$ G
- 距離 $D=5-13$ kpc (不定性が大きい)

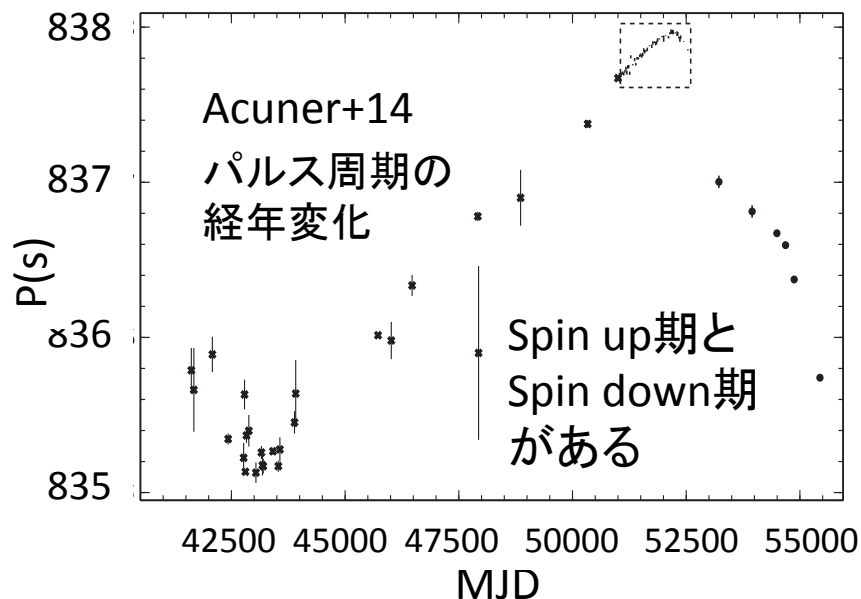


距離が精度よく決まれば中性子星の質量と半径(状態方程式)にも制限をつけられることを示した。

Be/X線連星 X Per (ペルセウス座X星)

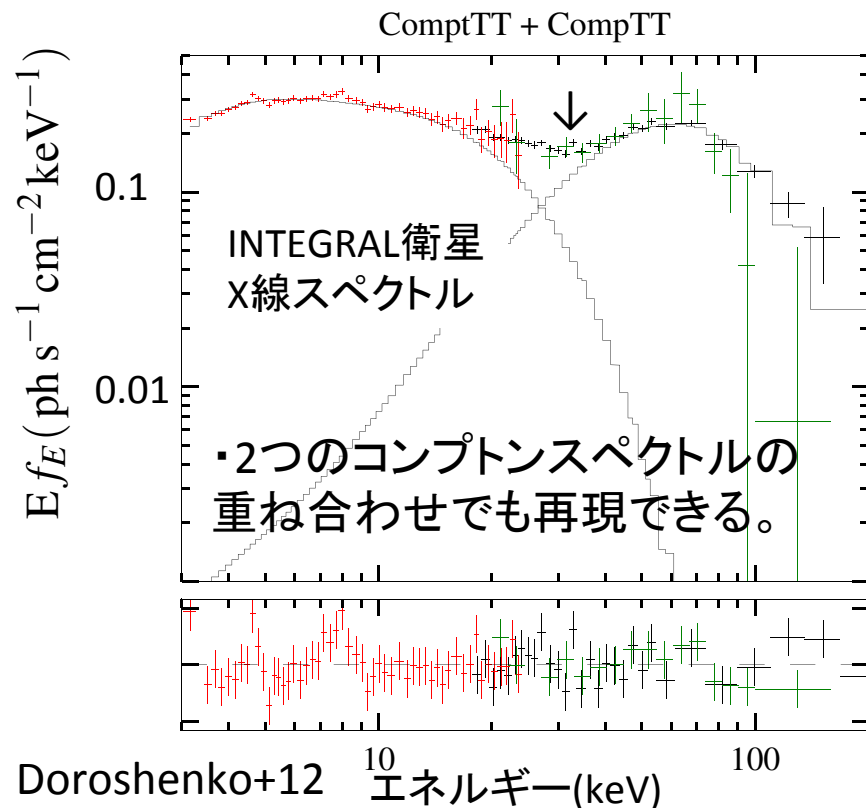
Be型星と中性子星の連星系

- ・自転周期 835(s) → 長周期
- ・公転周期 250 日 Delgado-Martí+01
- ・離心率 0.11
- 通常のBe/X-ray binaryより小さい
- ・距離 0.7~1.3 kpc Lutovinov+12
- ・低光度 $\sim 10^{34}$ erg/s

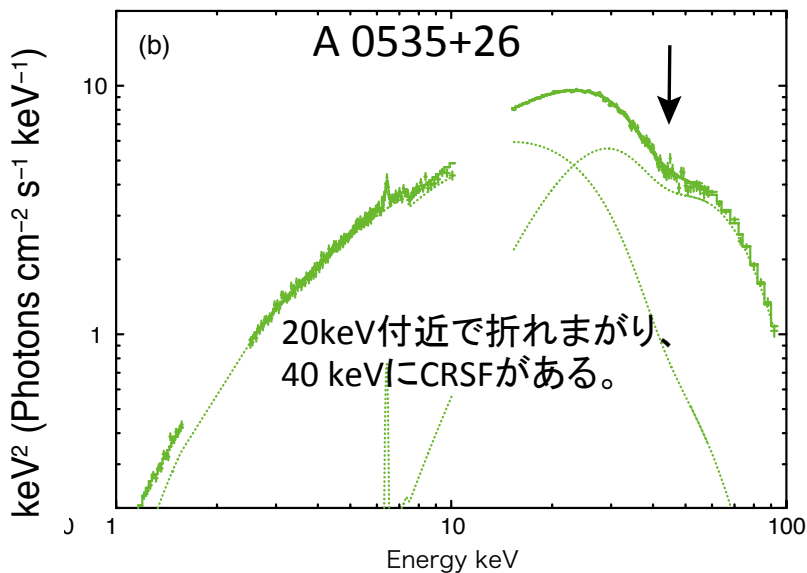


X Perの磁場はよく分かっていない Coburn+02

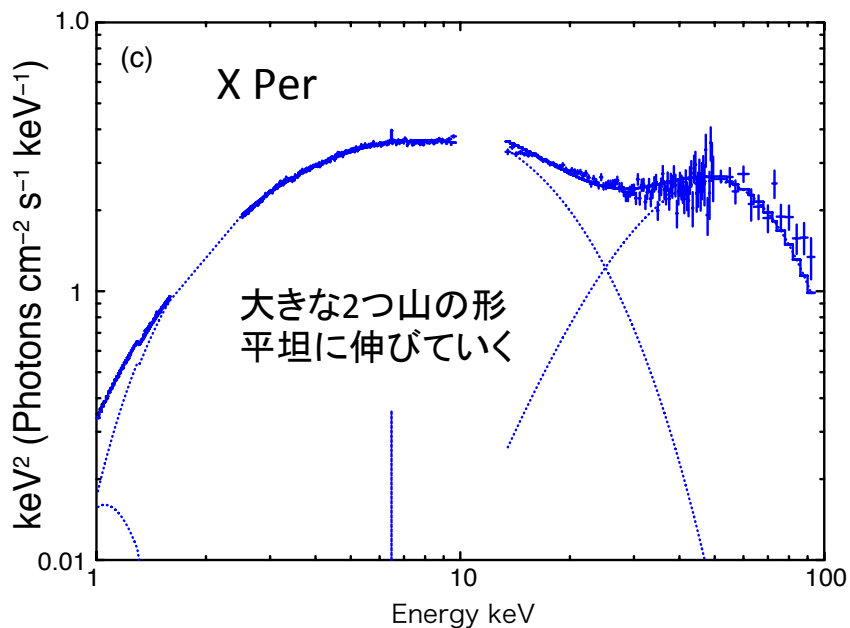
- ・29keVのへこみをサイクロトロン共鳴と解釈すると 2.6×10^{12} G。しかし、構造の幅が広く、共鳴より上のエネルギーでスペクトルが急激に落ちてはいないため、この解釈は正しくないと思われる。→別の方法で磁場推定



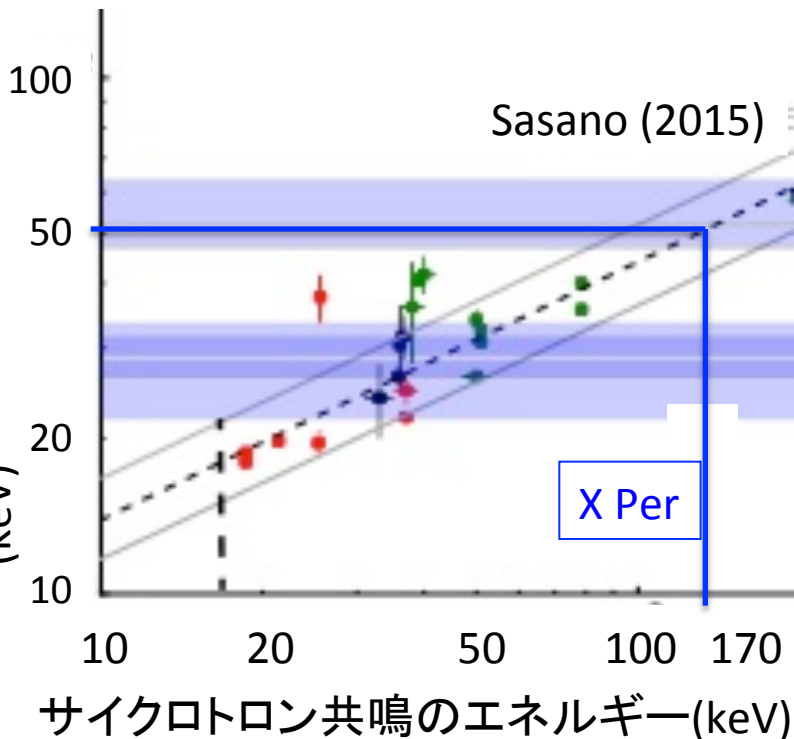
一般的なX線パルサーのスペクトルとX Perseiのスペクトル(Suzaku)



Sasano+15では、NPEX model (Mihara+95) でfitしたときのPositive側のcutoffエネルギーがサイクロトン共鳴エネルギーと正相関する経験則(Makishima+99)を用いて、X Perseiの磁場強度を $B \sim 10^{13}$ Gと推定した。



Positive powerlaw
のピークエネルギー
(cutoff kTに比例)
(keV)



Data reduction & 長期ライトカーブ

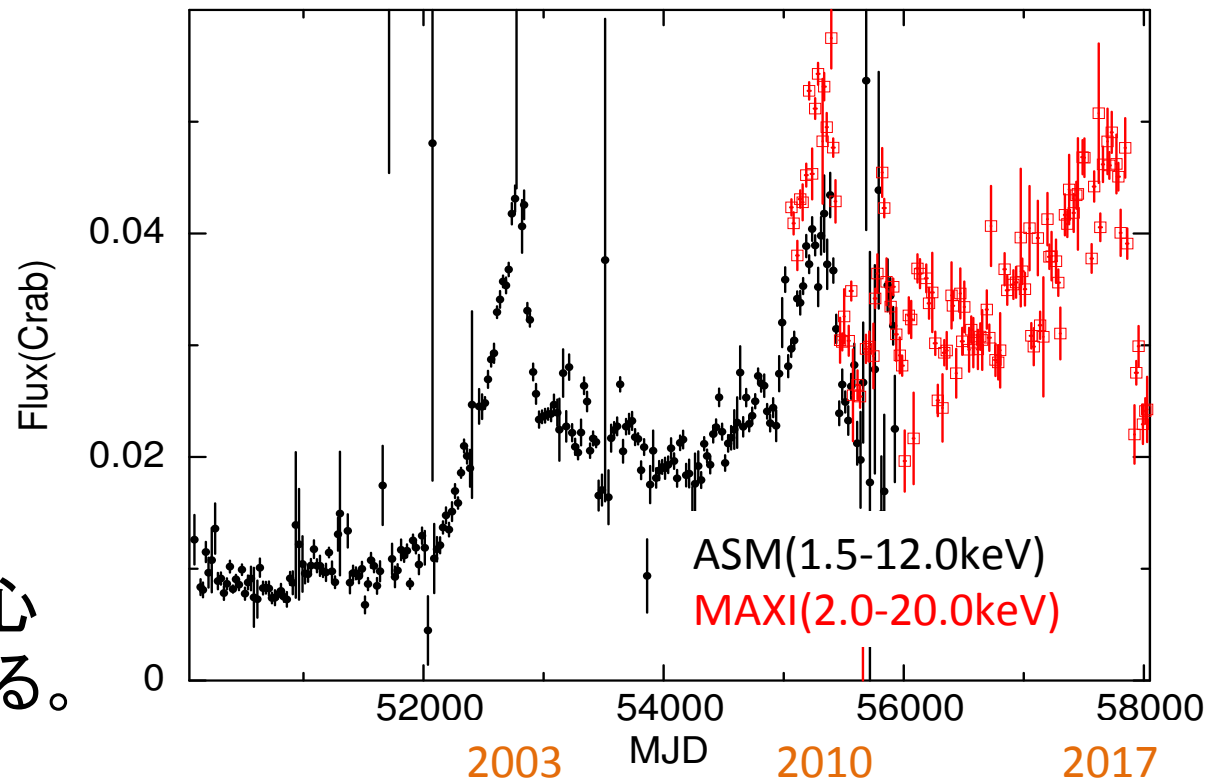
- RXTE/ASM: 1.5-12.0keVの光度曲線を取得。
- **MAXI**: 2-20keVの光度曲線とエネルギースペクトルを取得。

▪ MAXIとASMの光度は
ほぼ一致。

▪ 5-6倍の光度変動
→GL式が適用しやすい

▪ 軌道周期(250日)に起因
した光度変化はない。離心
率が小さいためと思われる。

▪ 約7年の周期が示唆され
るが、原因は不明



かに星雲のFluxで規格化したX Perの
光度曲線

解析の流れ

・250日(1軌道周期)ごとにFluxと自転周期を決定する。

1.ASMの光度曲線とMAXIのスペクトルを用いてFlux(3-12keV)を計算。→bolometric Fluxに変換

2.Epoch Folding法を使って、ASMとMAXIの光度曲線からパルス周期Pとその変化率を求めた。

3.Fluxと dP/dt の関係をGhosh & Lamb曲線でフィット。

250日ごとのFlux(ASM,MAXI共通の3-12keV)

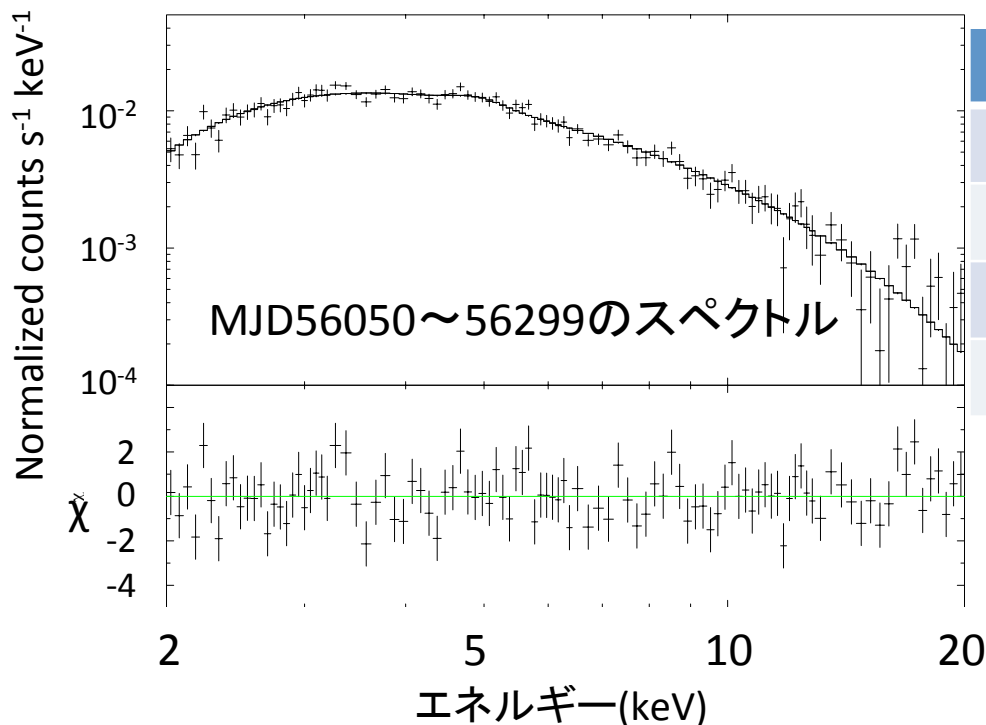
1. MAXI(3-12keV)

- ・スペクトル(2-20keV)をCutoff-powerlawでfittingした。
→ベストフィットモデルから、Flux(3-12keV)を計算した。

2. ASM(3-12keV)

- ・ベキの値1.7を用いて、PIMSSシステムでCountからFluxに直した。

(MAXIの3-12keVのスペクトルをpowerlawでfitすると、ベキは ~ 1.7 になる)



model	Cutoff-powerlaw
Phoindex α	0.43 ± 0.11
HighEcut(keV)	4.54 ± 0.43
Normalization	$(0.077 \pm 0.005) \times 10^{-2}$
Chi-squared	112 (d.o.f = 105)

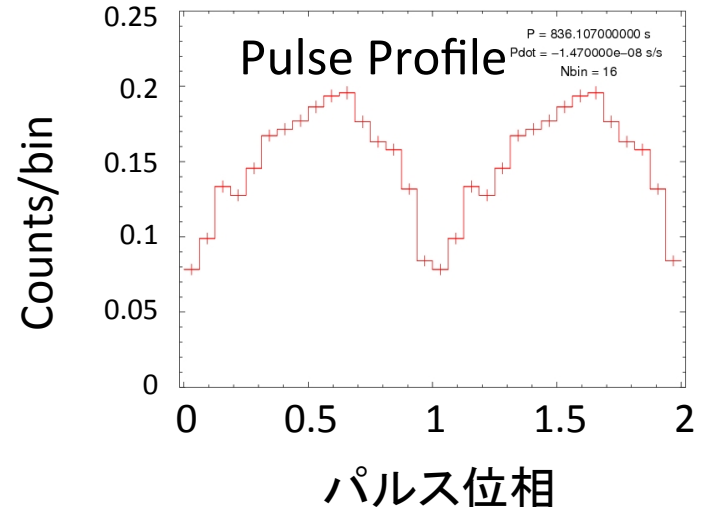
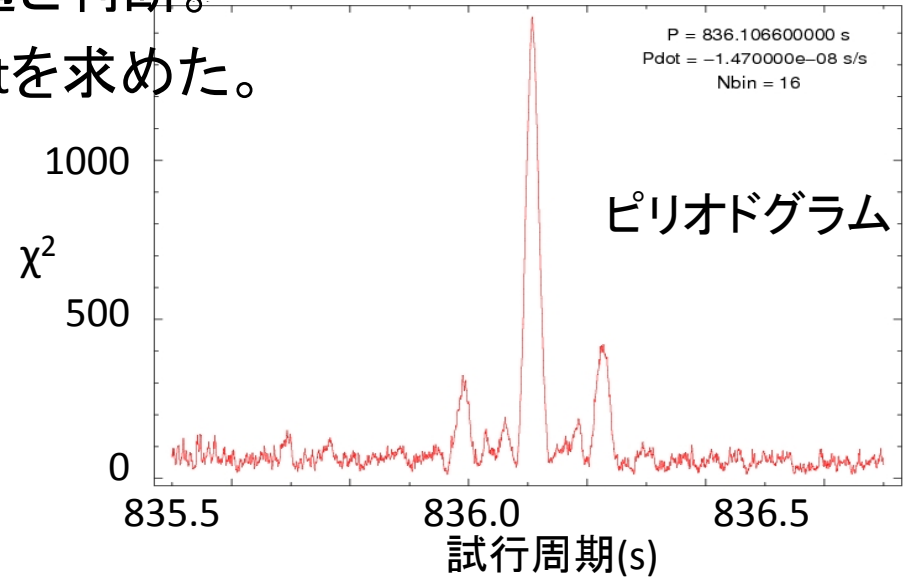
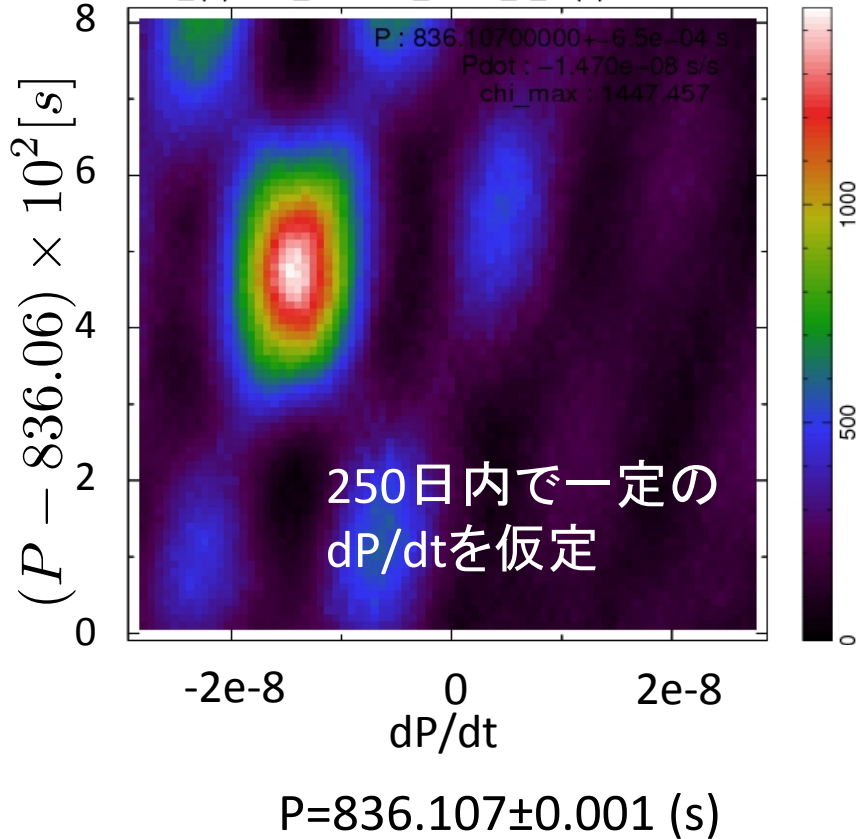
$$\text{Flux}(3-12\text{keV}) = 6.89 \times 10^{-10} \text{ ergs/cm}^2/\text{s}$$

→BeppoSaxのスペクトル(Di Salvo+98)を
仮定しbolometric Flux(0.1-200keV)に変換
Factor = 0.1-200keV/3-12keV = 2.605

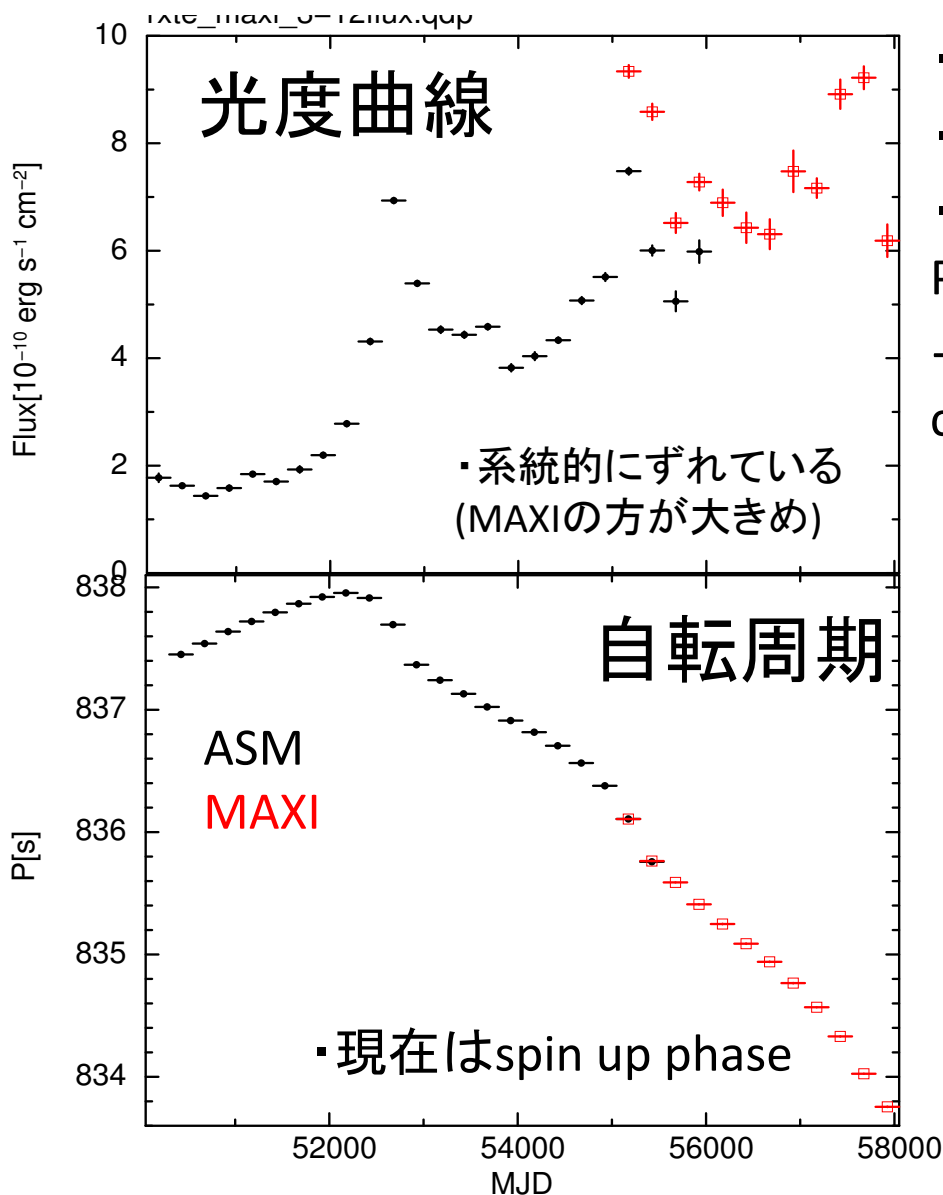
Foldingで自転周期を求める(250日ごと)

- ASMとMAXIの光度曲線にHeliocentric補正と連星軌道運動補正を施した。
- 軌道周期を微調し、 $P=251.1$ 日を最適と判断。
- 250日ごとに分け、自転周期 P と dP/dt を求めた。

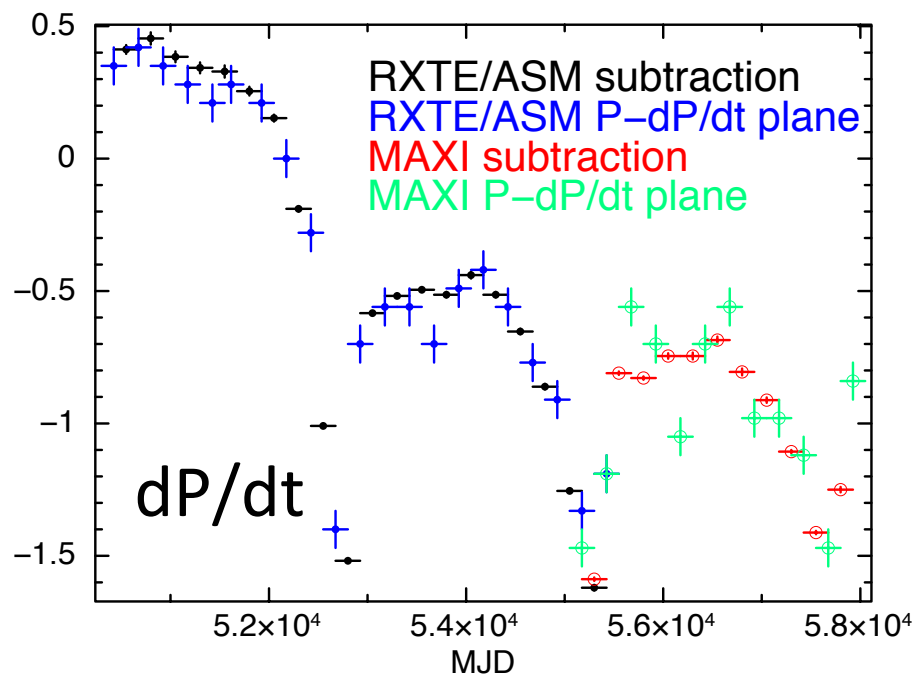
例:MJD55050~55299の結果



Flux(3-12keV)と自転周期 1996-2017



- MJD53000付近でspin downからspin upに。
 - Fluxのピーク付近でPが大きく変化。
 - dP/dt は、より精度を上げるため、2点間のPの差から求め直した。
- P- dP/dt 平面から得られた dP/dt とconsistentになっている(下図)。

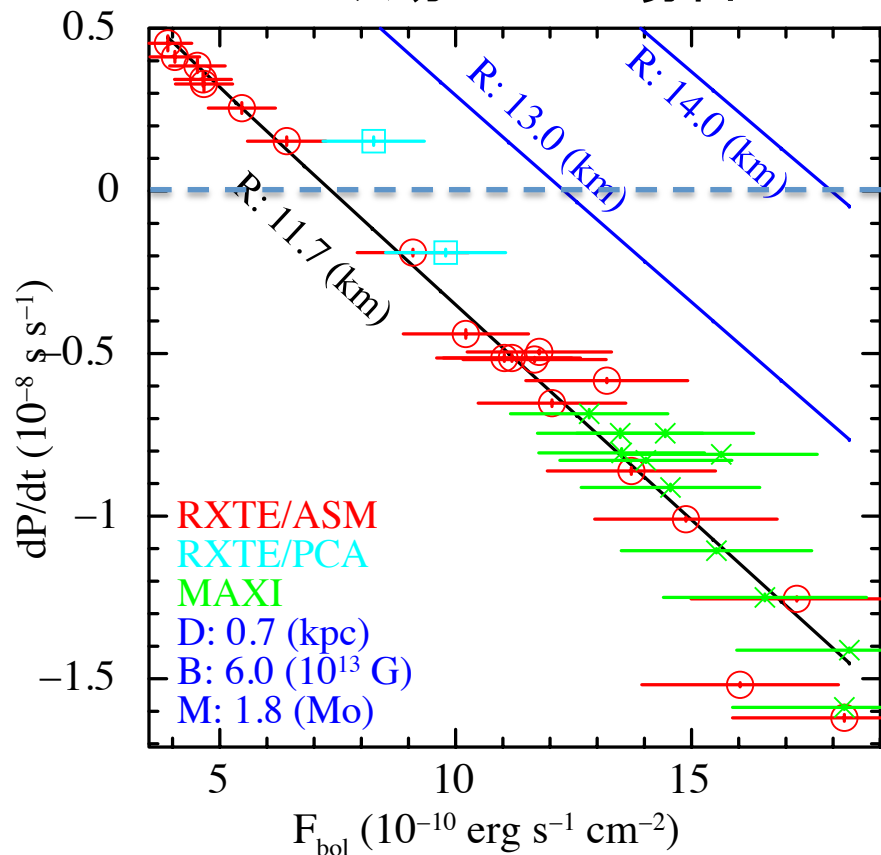


観測から得たdP/dt-Flux関係とGL式

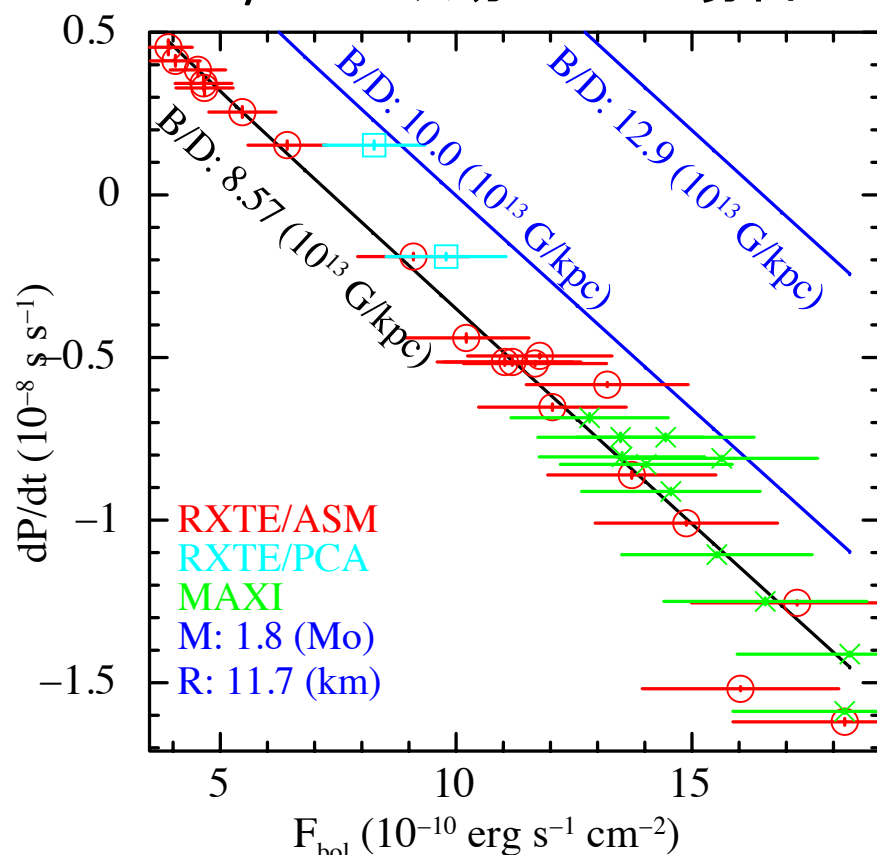
磁場を様々な値に固定し、質量 $M(1.0\sim 2.4M_{\odot})$ 、半径 $R(8.5\sim 15.5\text{km})$ 距離 $D(0.7\sim 1.3\text{kpc})$ の範囲で最小の χ^2 を与える磁場をサーチ。

トルク平衡のFlux $F_{\text{bol}} \propto \left(\frac{B}{D}\right)^2 R^5 M^{-2/3} P_{\text{eq}}^{-7/3}$

Rだけ動かした場合



B/D だけ動かした場合

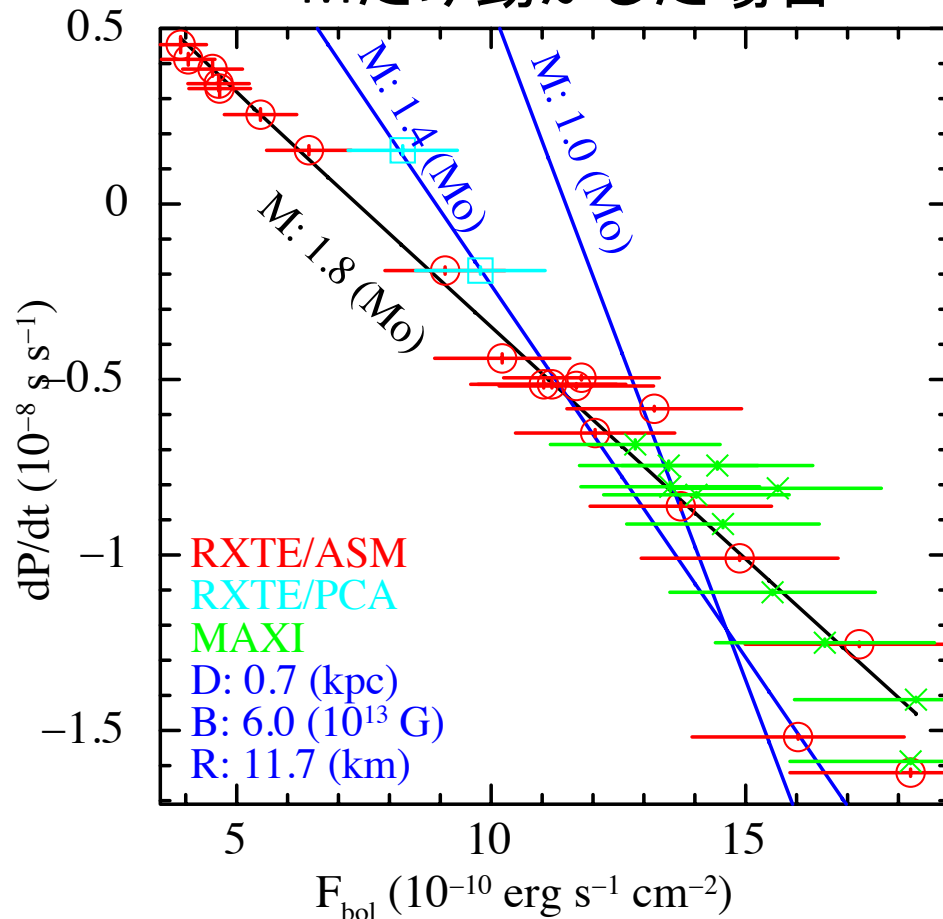


観測から得たdP/dt-Flux関係とGL式

GL式によると、
$$-\frac{d\dot{P}}{dF_{\text{bol}}} \propto M^{-10/7} R^{-2/7} D^{12/7} F_{\text{bol}}^{-1/7}$$

となり、傾きは質量と距離に大きく依存する。

Mだけ動かした場合



・ベストフィットを与えるM,R,D,Bは複数存在する。

・ $B = (4-15) \times 10^{13}$ Gで

$\chi^2 = 37$ (d.o.f = 33)

となり、観測されたdP/dt-Flux関係が良く再現された。

・質量の下限値は1.8 M_{\odot} 。

まとめ

- ・MAXI、RXTE/ASMで得られた20年分のデータを用いて、フラックス F_x 、自転周期 P を250日ごとに求めた。 F_x - dP/dt 関係は明らかな逆相関を示した。
- ・観測から得られた F_x - dP/dt 関係を、Ghosh & Lamb(1979)の理論曲線でfitしたところ、最適な磁場強度は $(4 \sim 15) \times 10^{13} \text{G}$ となった。これは通常のX線パルサーよりも1~2桁強い磁場である。X Perseiは連星系マグネターの候補となる。
- ・距離0.7-1.3kpcを仮定すると、質量の下限値は $1.8 M_{\odot}$ となった。GAIA衛星などでX Perまでの距離が精度よく決まれば質量に制限をつけられるかもしれない。

