

# 広帯域X線観測を用いたマグネター SGR 1900+14の多重極磁場の探査

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻

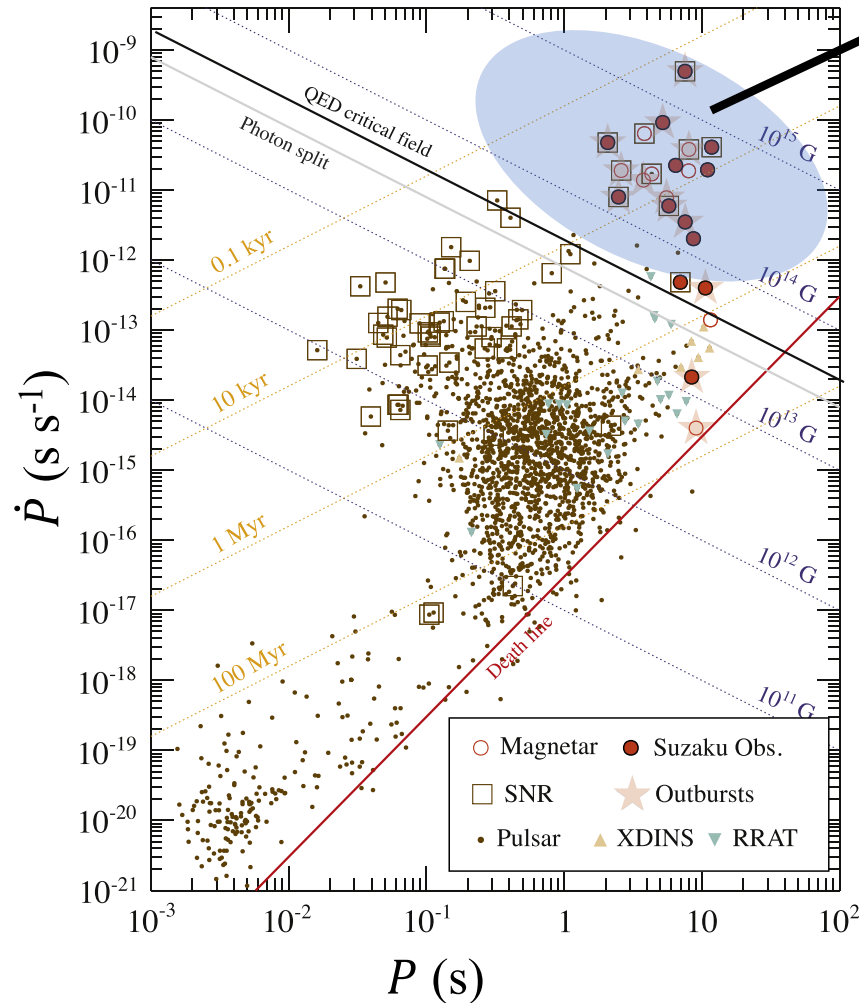
馬場研究室 修士1年

丹波 翼

馬場彩、小高裕和(東大理)、榎戸輝揚(京大理)

# 1. 本研究の対象：マグネター

パルサーの分布



マグネター:

$$P = 2-11 \text{ s}, \dot{P} = 10^{-10} - 10^{-12} \text{ s s}^{-1}$$

→ 強力な双極子磁場  $\sim 10^{14-15} \text{ G}$

## ➤ 主な性質と謎

- 磁気双極子放射による回転駆動では説明できないほど大きなLuminosity  
→ **磁気駆動**で輝く。機構は不明。
- 莫大なエネルギーを解放する**Outburst**  
→ エネルギー源・解放機構は不明。

**多重極磁場**や**トロイダル磁場**の存在の可能性。

ex) **Twisted Magnetosphere Model**

トロイダル磁場

$\propto$  マグネターの放出エネルギー

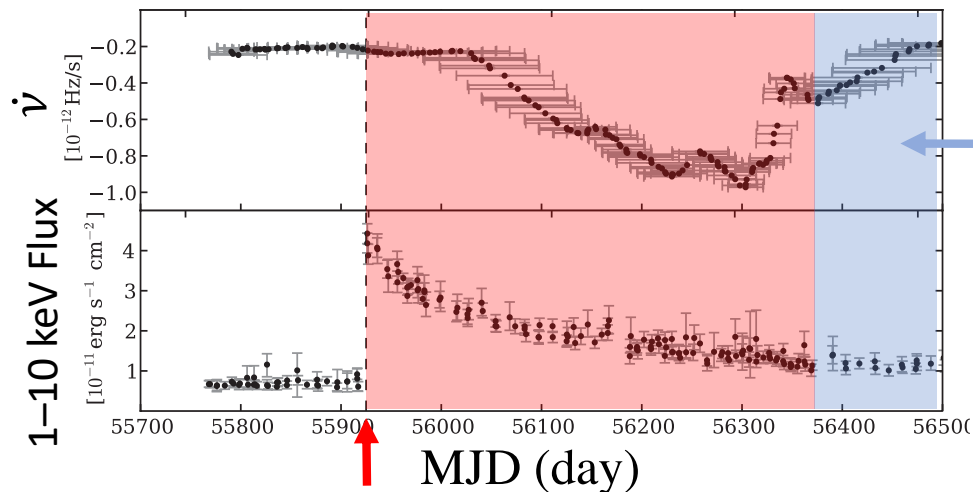
## 2. 本研究の着目点

### ～① マグネターのOutburstと自転周期変動～

電波パルサー ( $\dot{\nu}$ 一定)と異なり、マグネターは $\dot{\nu}$ が時間変動する。

→トロイダル磁場が原因の可能性。

マグネターの $\dot{\nu}(= -\dot{P}/P^2)$ のOutburst後の時間変化の例  
(1E 1048.1-5937, Archibald+ 2015)



**Outburst**

本研究では、 $|\dot{\nu}|$ が単調減少する  
post-outburst期に着目。

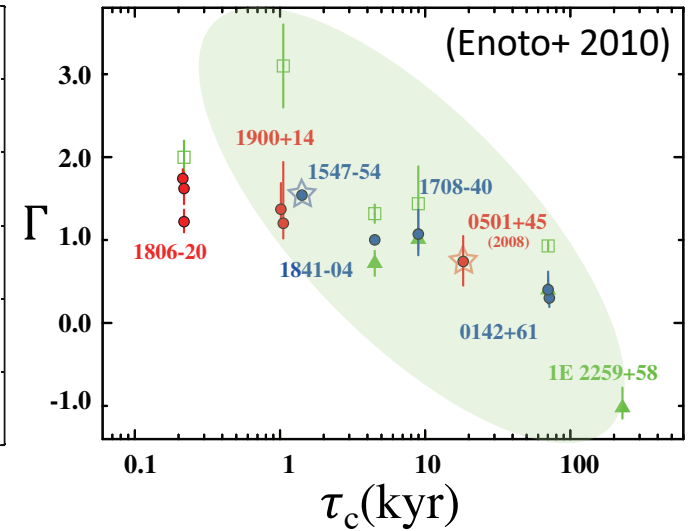
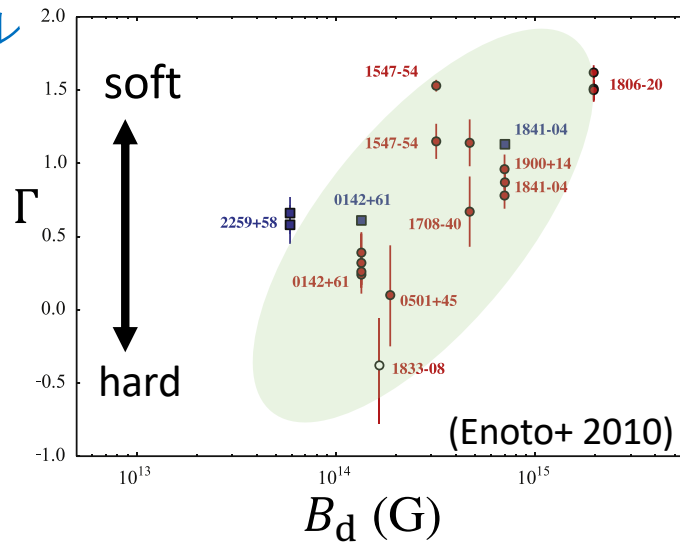
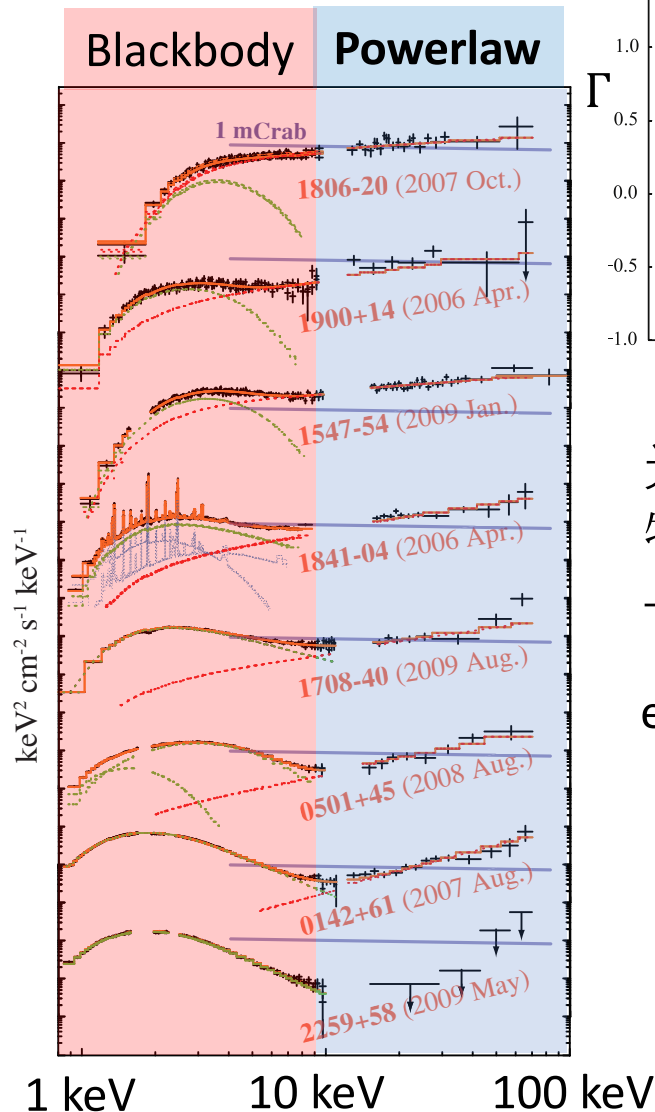
ex) **Twisted Magnetosphere Model** (Thompson+ 2002)  
Post-outburst期では、**トロイダル磁場**が徐々に減少している？

同様の挙動はいくつかの天体で確認。  
(PSR J 1622-4950, XTE J1810-197,  
SGR J1745-2900)  
(Scholz+ 2017, Pintore+ 2016, Zelati+ 2015)

# 2. 本研究の着目点

## ～② マグネターの硬X線非熱的放射～

マグネターのスペクトル  
(Enoto+ 2010)



光子指数 $\Gamma$ は、双極子磁場 $B_d$ と正の相関、特性年齢 $\tau_c$ と負の相関をもつ。

→ 若くて磁場の強いマグネターほどsoftな成分をもつ。

ex) **強磁場中の光子分裂モデル** (Baring & Harding, 2001)

強磁場中で1つの高エネルギー光子が2つの低エネルギー光子に分裂する現象。電子陽電子対消滅によって出る511 keVの光子が分裂を繰り返すことで、Powerlaw型スペクトルを作り出すというモデル。

→ 磁場の強いマグネターほど、分裂の回数が多く、softなスペクトルを作る。

# 3. マグネター—SGR 1900+14のX線観測

本研究の着目点：  
① 様々なマグネターのOutburst後の自転周期の変化からトロイダル磁場の存在可能性を検討。  
② 硬X線のPowerlaw成分を様々なマグネターで調べる。

## ➤ SGR 1900+14

- $P \sim 5 \text{ s}$ 、 $\dot{P} \sim 10^{-10} \text{ s s}^{-1}$  → マグネターでも大きな $B_d \sim 7 \times 10^{14} \text{ G}$  (Olausen & Kaspi 2014)
- 特性年齢 $\tau_c \sim 0.9 \text{ kyr}$  と比較的若い。(Olausen & Kaspi 2014)
- 1998年の**Outburst**以降、継続的に観測されている。
- 暗い天体で、先行研究による観測ではパラメータ決定精度が不十分。

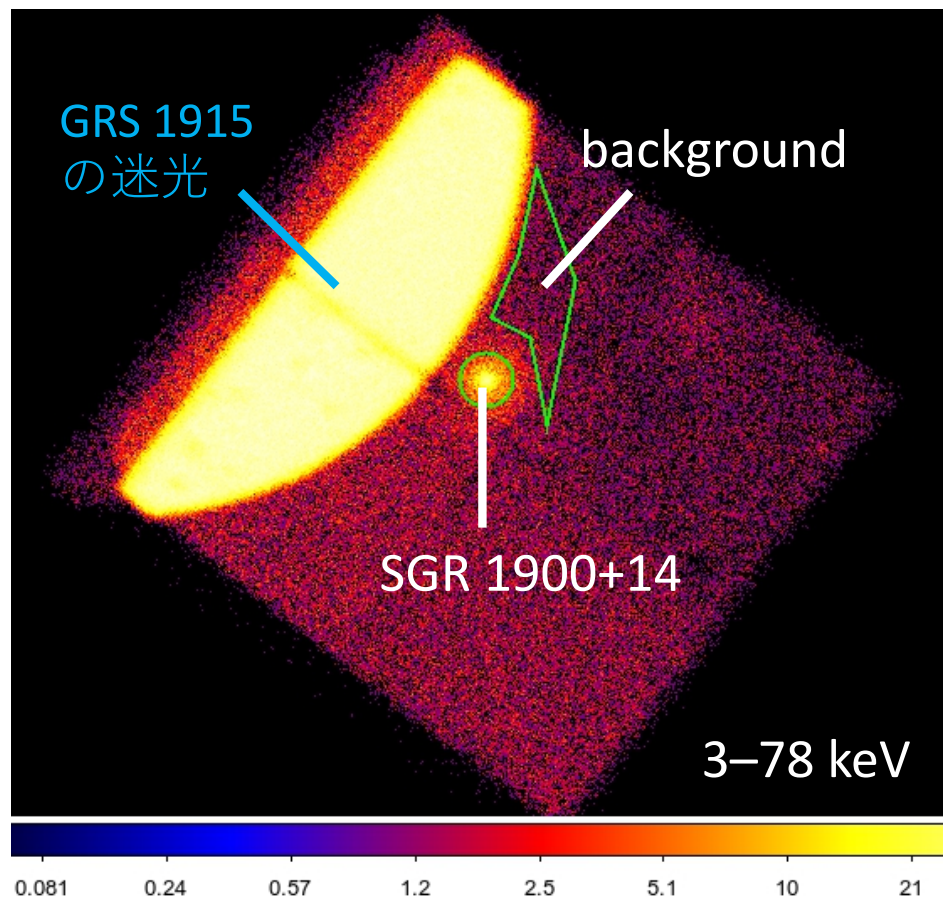
## ➤ 観測データ (PI: Enoto)

- *XMM-Newton*と*NuSTAR*の同時観測データで広帯域観測を初めて達成。  
→ 硬X線に対して高感度

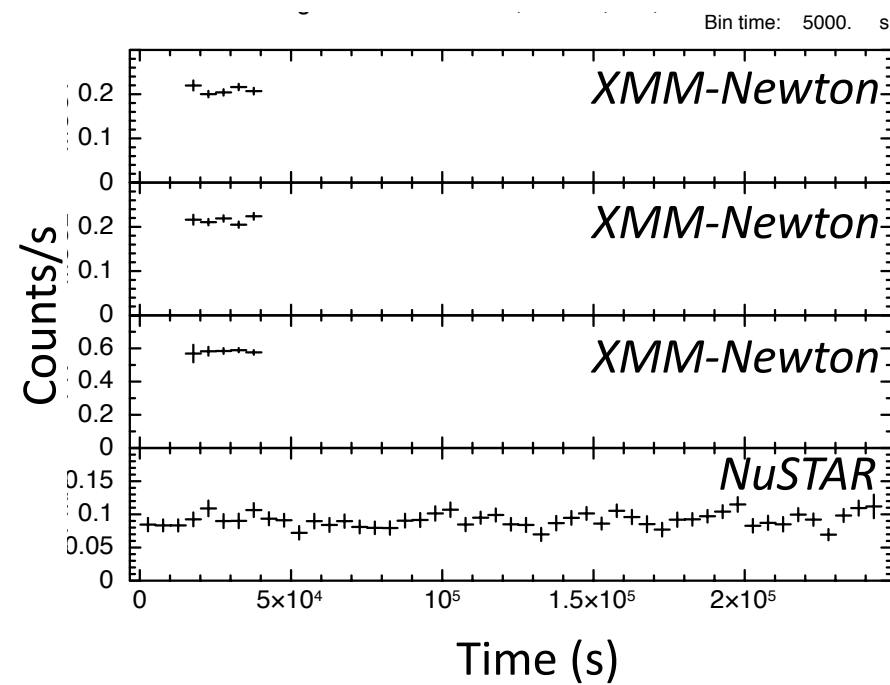
X線衛星 (エネルギー帯域)	検出器	観測日時	Exposure
<i>XMM-Newton</i> (0.1–15 keV)	MOS1, 2, pn	2016-10-20～21	23 ks
<b><i>NuSTAR</i></b> <b>(3–78 keV)</b>	FPMA	2016-10-20～23	123 ks

# 3. マグネター SGR 1900+14 の X線観測

NuSTAR FPMAで観測したイメージ

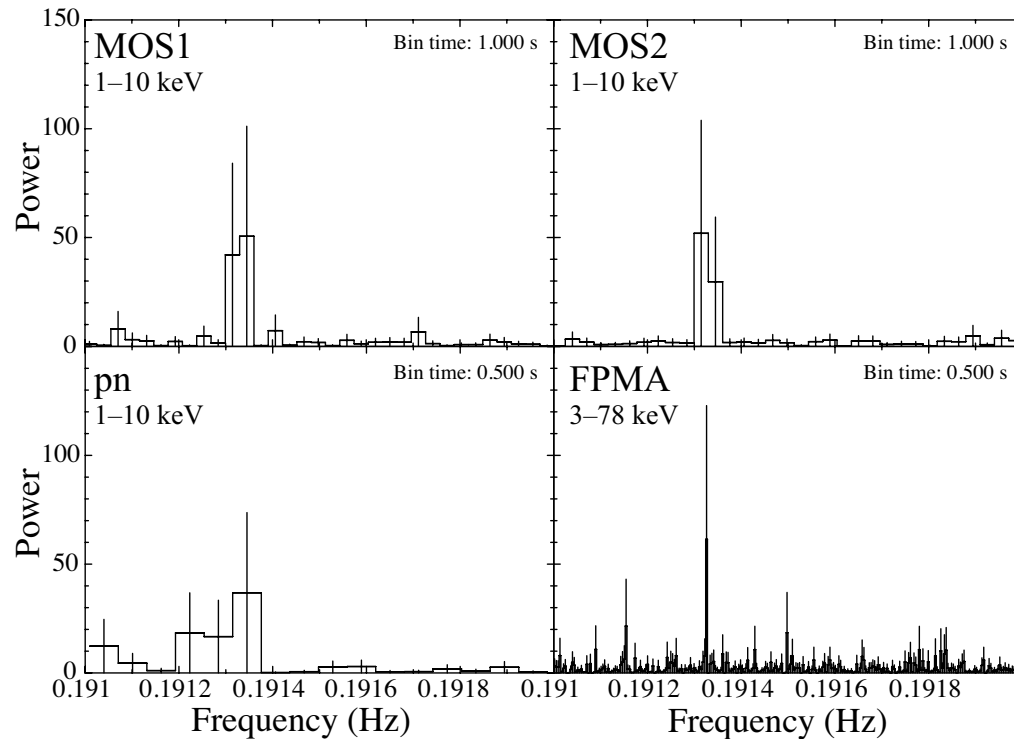


ライトカーブ

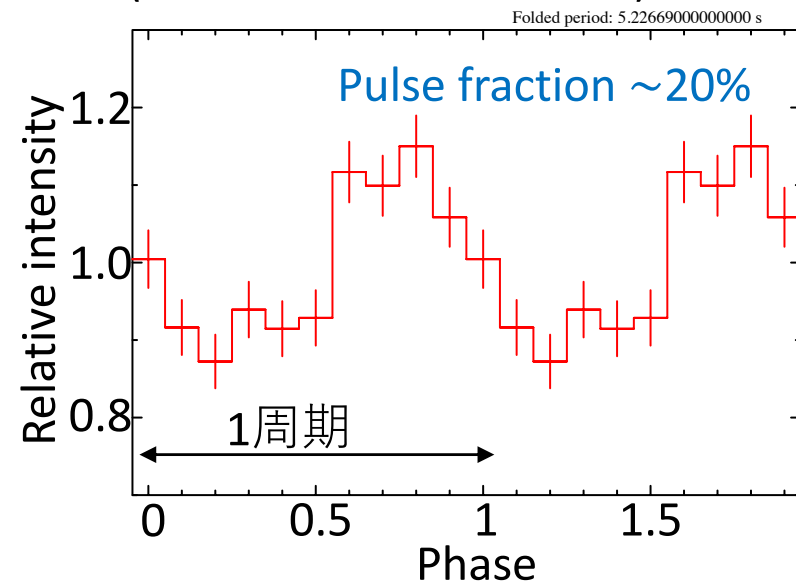


# 4.1. 結果①: SGR 1900+14の自転周期進化 ～自転周期の検出～

ライトカーブをフーリエ変換



周期 5.22669 s でたたみ込んだ  
パルスプロファイル  
(NuSTAR FPMA 3-78 keV)



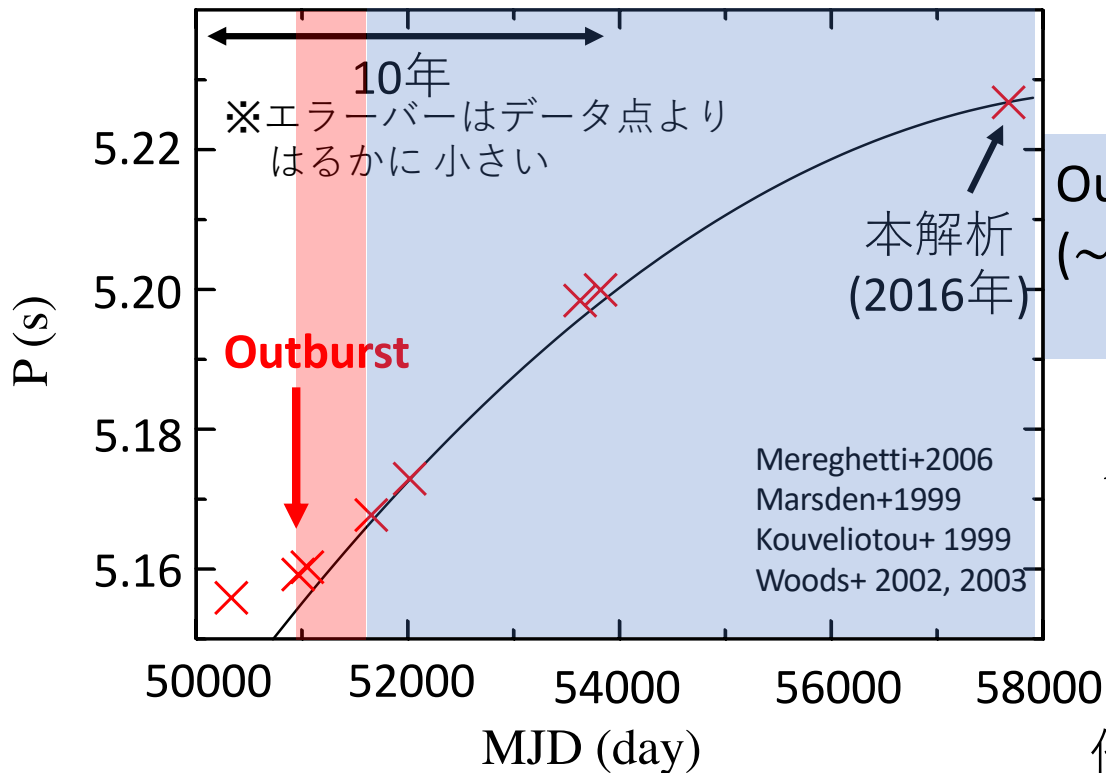
全ての検出器で同様の周期的変動を検出



自転周期を  $P = 5.22669(3) \text{ s}$  と決定。(2016-10-20時点)

# 4.2. 結果①: SGR 1900+14の自転周期進化 ～過去のデータとの比較～

SGR 1900+14の自転周期の進化



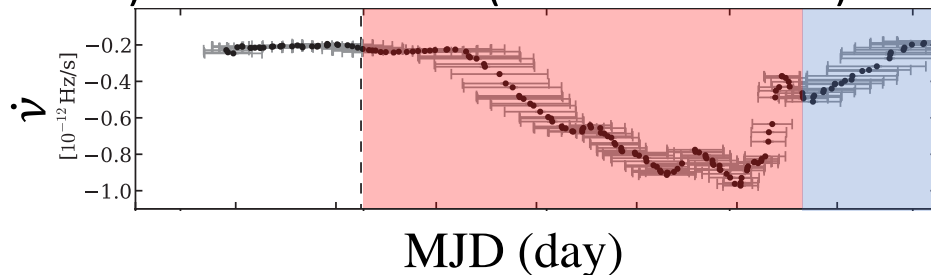
Outburstから一定時間経過後  
(~600 days)のデータを2次曲線で近似

$$\ddot{P} = -3.1 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{P} = 2.0 \times 10^{-10} \text{ s s}^{-1} \text{ (MJD=51660)}$$

$$3.3 \times 10^{-11} \text{ s s}^{-1} \text{ (MJD=57681)}$$

cf) 1E 1048.1-5937 (Archibald+ 2015)



他の天体と同様、post-outburst期で  
 **$\dot{P} (\propto |\dot{\nu}|)$ の単調な減少を確認。**

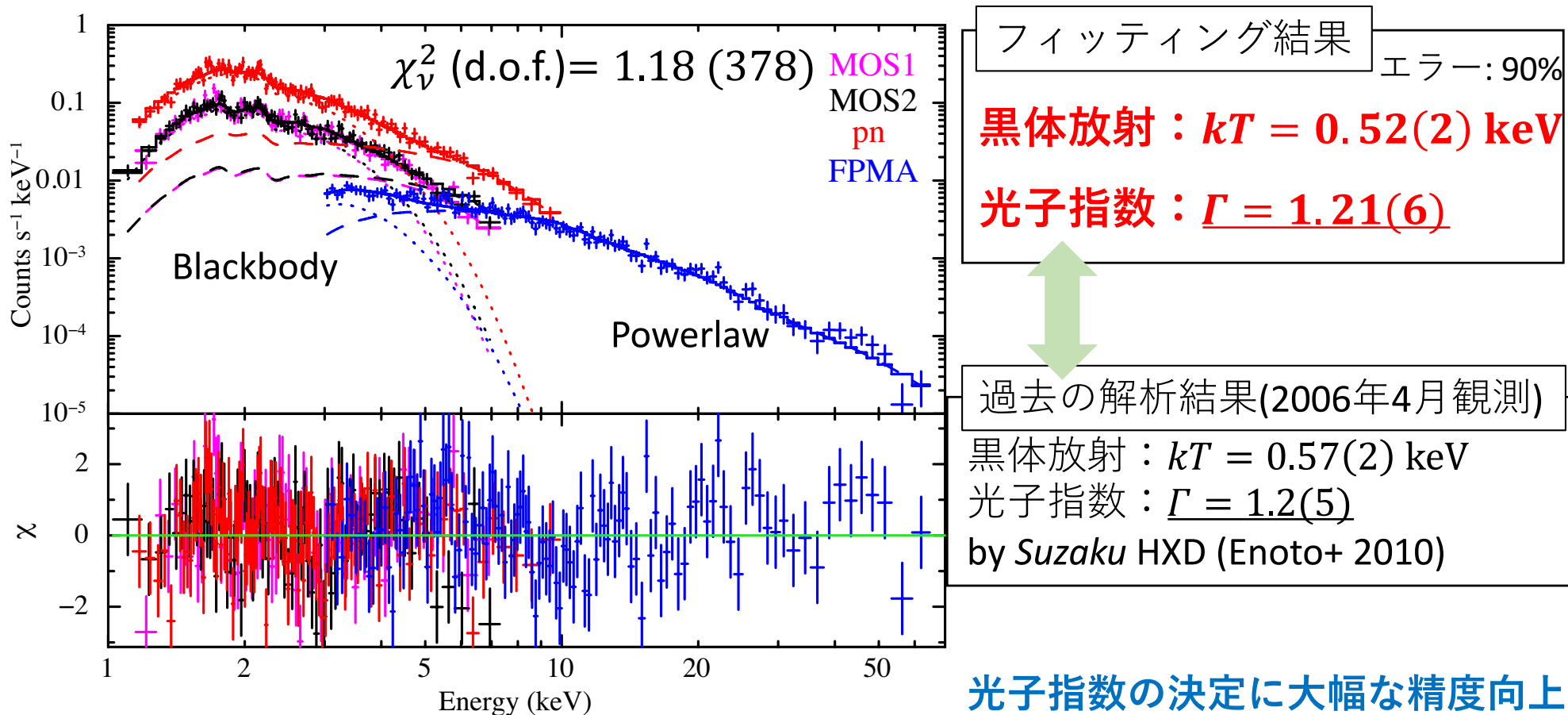
→ ~20年にわたるトロイダル磁場の  
減衰の可能性。

(Twisted Magnetosphere Model)



# 5.1. 結果②: SGR 1900+14のPowerlaw成分 ～広帯域スペクトル～

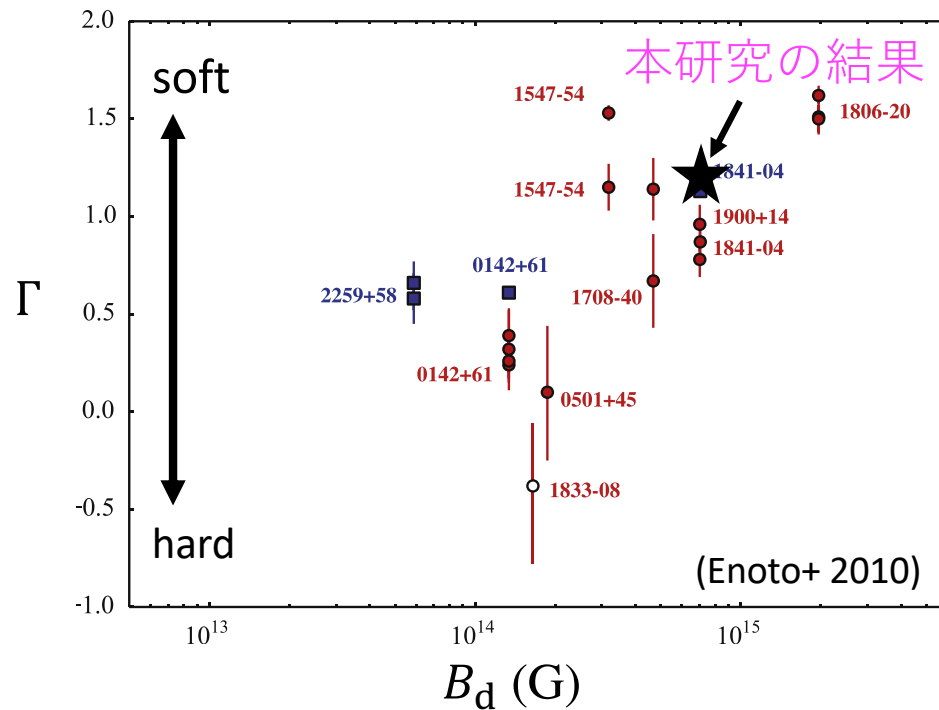
XMM-NewtonとNuSTARの同時観測で70 keVまで有意に信号を検出  
→ Blackbody + Powerlawモデルでフィッティング



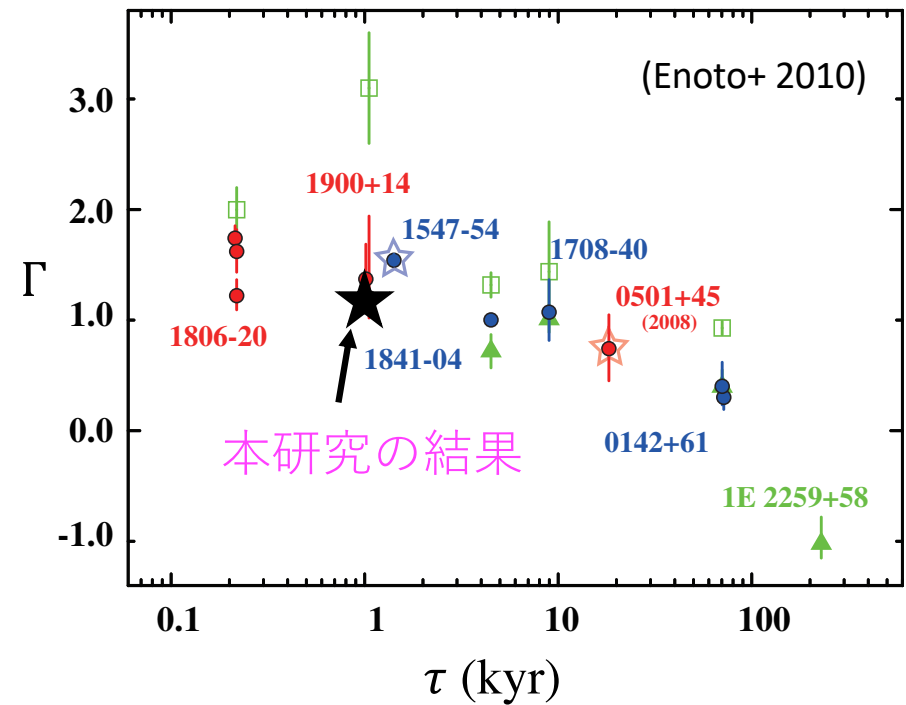
# 5.1. 結果②: SGR 1900+14のPowerlaw成分 ～広帯域スペクトル～

SGR 1900+14の光子指数： $\Gamma = 1.21(6)$

光子指数と双極子磁場の関係



光子指数と特性年齢の関係



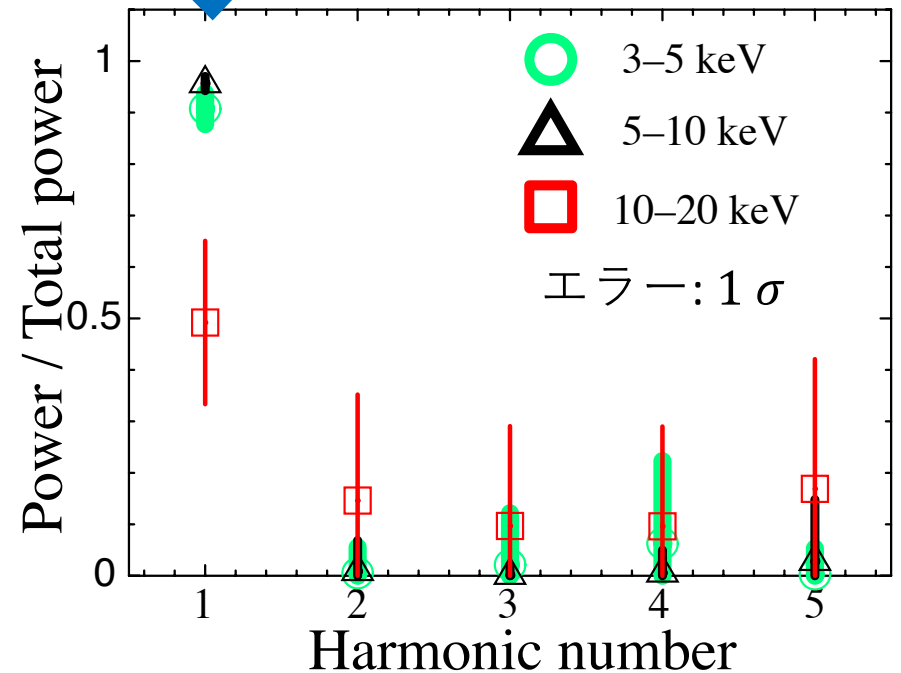
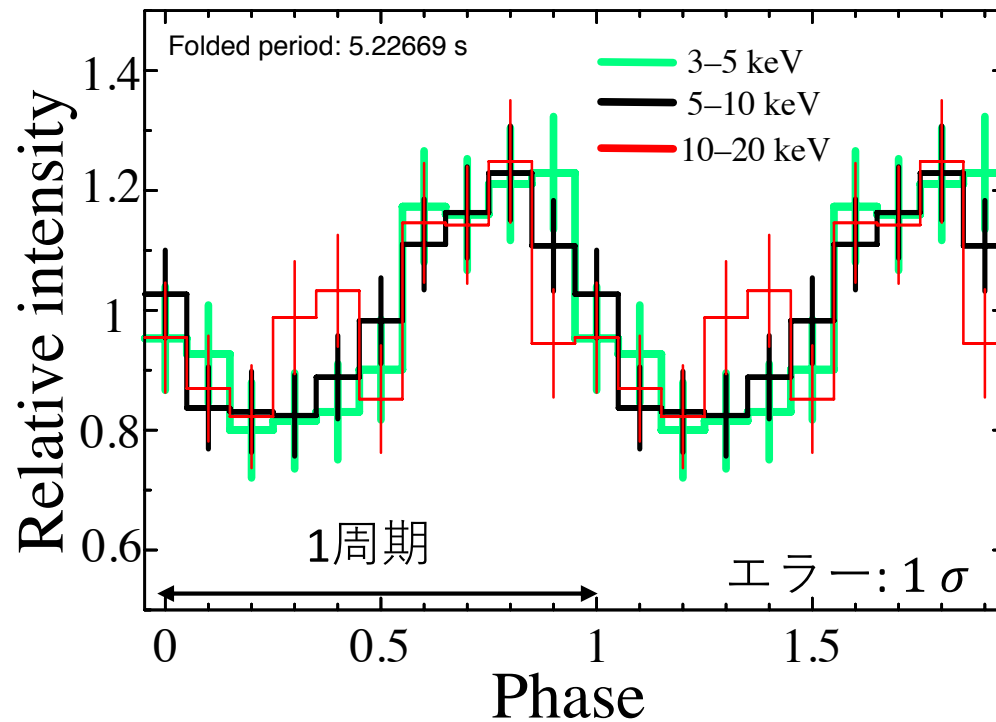
SGR 1900+14はマグネターの中で、若くて双極子磁場が大きい天体であり、  
相対的にsoftなPowerlaw成分をもつ。

# 5.2. 結果②: SGR 1900+14のPowerlaw成分 ～エネルギーごとのパルスプロファイル～

3-20 keVで有意にパルスを検出。

3-5, 5-10, 10-20 keVの  
パルスプロファイル

フーリエ変換

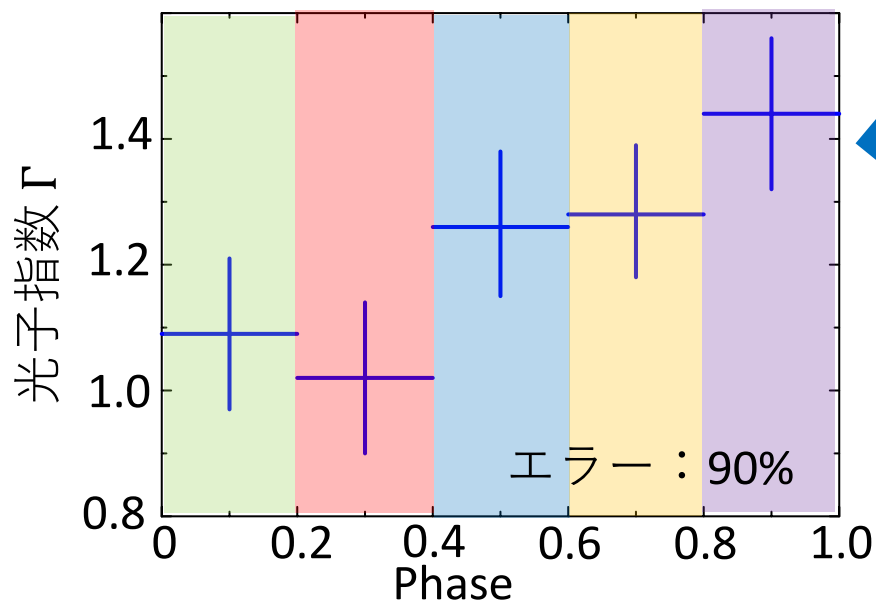
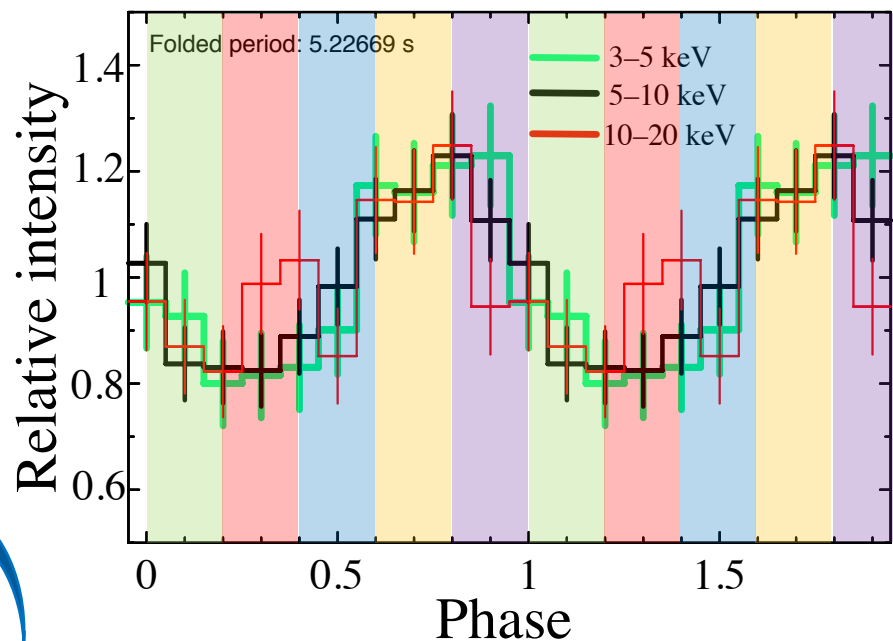
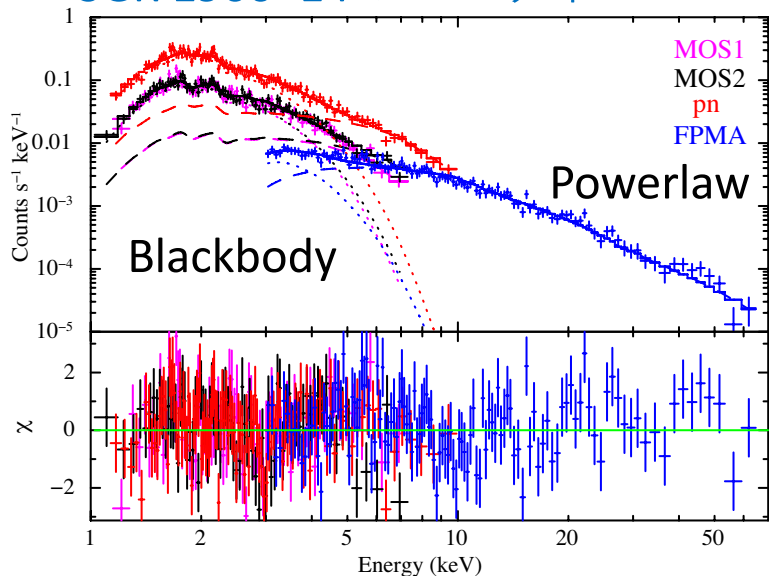


**3-10 keVと10-20 keVでパルスの形が有意に異なる。**

→ Powerlaw成分がBlackbody成分と異なるふるまいをしている可能性。

# 5.3. 結果②: SGR 1900+14のPowerlaw成分 ～Pulse Phaseで分割したスペクトル～

SGR 1900+14のスペクトル

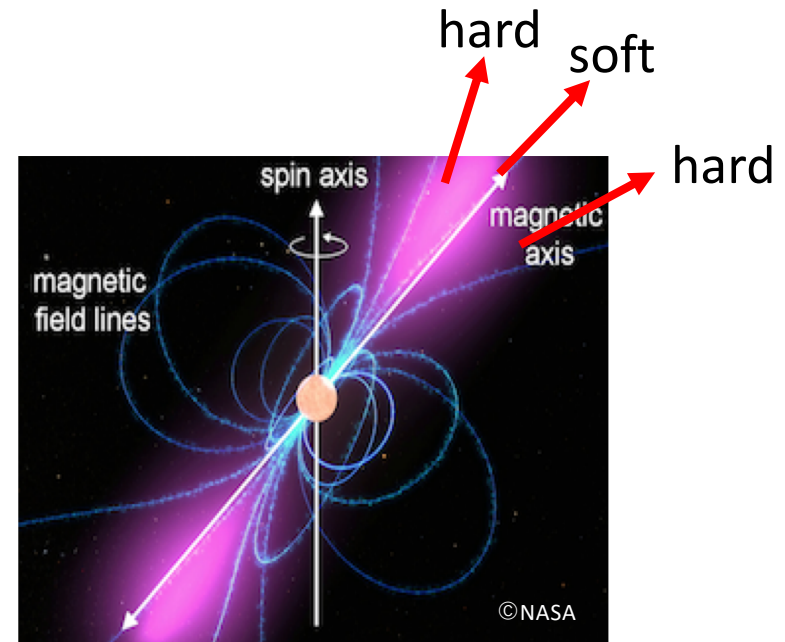
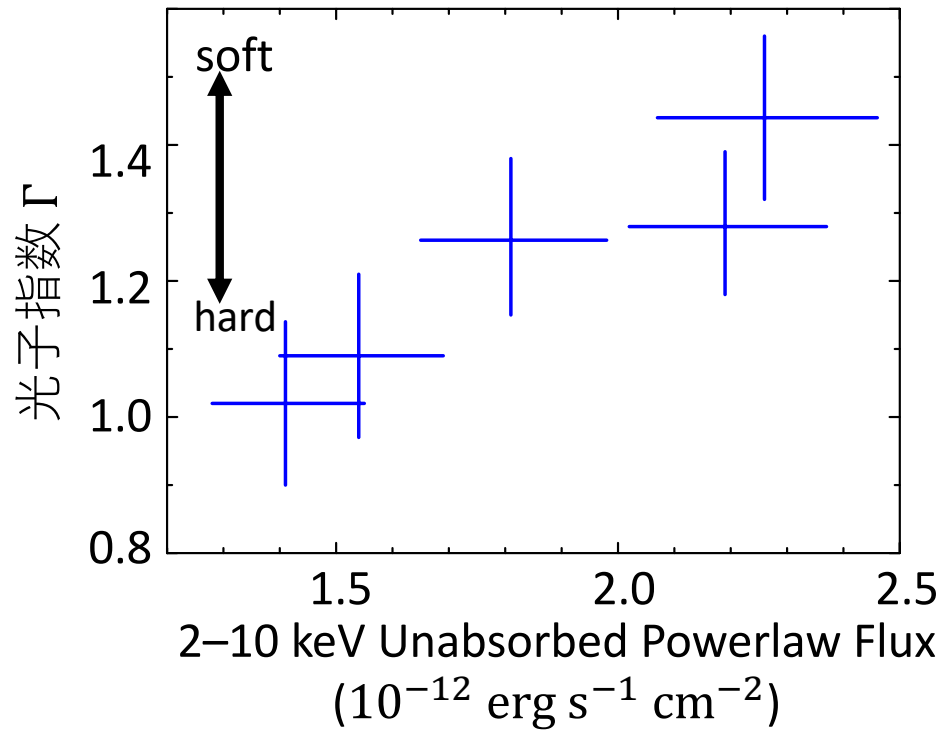


Blackbodyの  $kT = 0.52 keV$  と固定  
5分割

**Powerlaw成分の光子指数がpulse phaseによって異なることを発見。**

# 5.3. 結果②: SGR 1900+14のPowerlaw成分 ～Pulse Phaseで分割したスペクトル～

分割したpulse phaseごとにPowerlaw成分のフラックスを求め、光子指数に対してプロット。



解釈

- 見ている領域の磁場の違い
- 光子分裂の光路長の違い

放射の大きなphaseほどsoftなスペクトル。

など

# 6. まとめ・今後の課題

## ➤ まとめ

- マグネターの磁気駆動の機構やOutburstを説明する手段として、**多重極磁場**や**トロイダル磁場**の存在が示唆。
- 我々はマグネターの興味深い性質として以下の2点に着目。
  - ① **Outburst後の自転周期の進化**
  - ② **硬X線帯域のPowerlaw成分としてあらわれる非熱的放射**
- 以上の2点を詳細に調べるために、我々はOutburstを起こしたマグネターSGR 1900+14をXMM-NewtonとNuSTARを用いて同時広帯域観測をした。
- Outburstから数百日が経過して以降、 **$\dot{P}$ が単調減少していくことを発見**。  
→ トロイダル磁場の存在の可能性
- Powerlaw成分を正確に決め、そのふるまいが**Pulse phaseによって異なり、フラックスのピークでスペクトルがsoftになることを発見した**。

## ➤ 今後の課題

- Outburst後の自転周期の挙動や非熱的放射の細かい変化を調べるために、マグネターの継続的な観測をする。
- 非熱的成分の観測をさらに詳細に行うために、硬X線衛星開発の**FORCE**ミッションに取り組む。