

ULXパルサーの自転位相分解スペクトル 解析による超臨界降着流の構造の解明

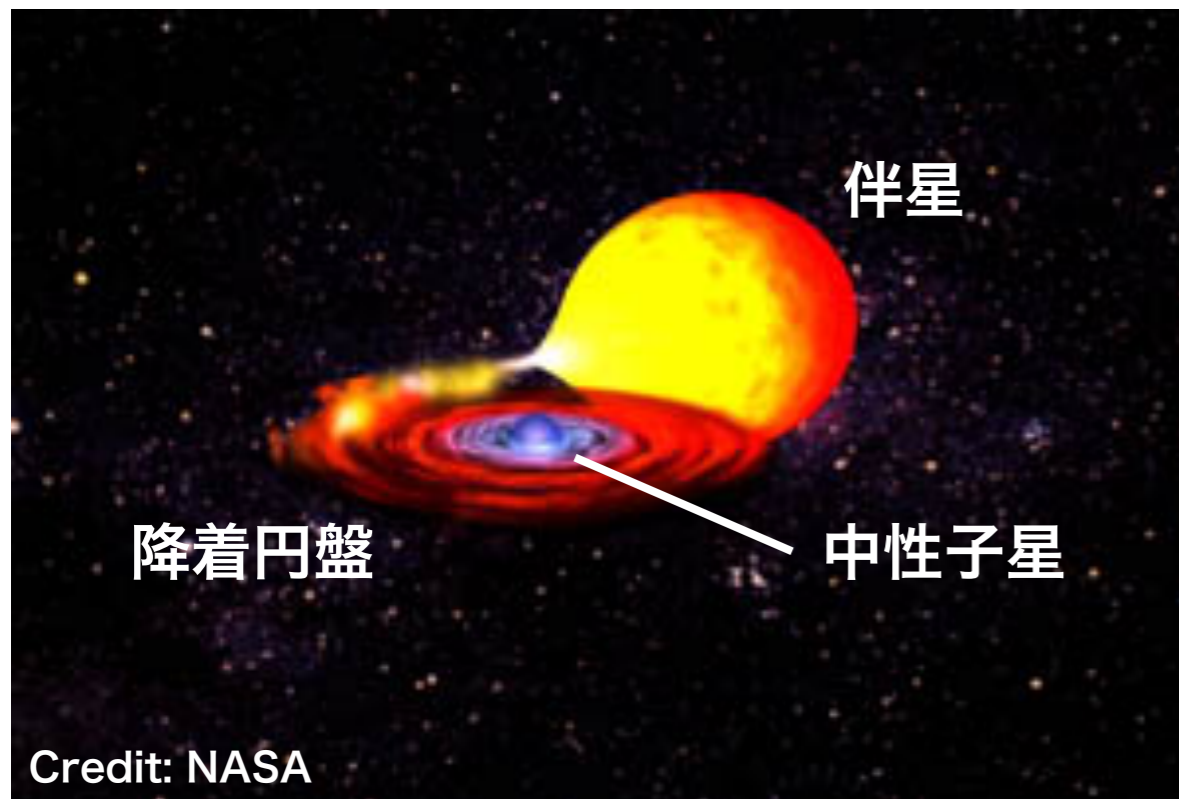
～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ2023 @京都大学

東京大学 / ISAS M1 三浦大貴

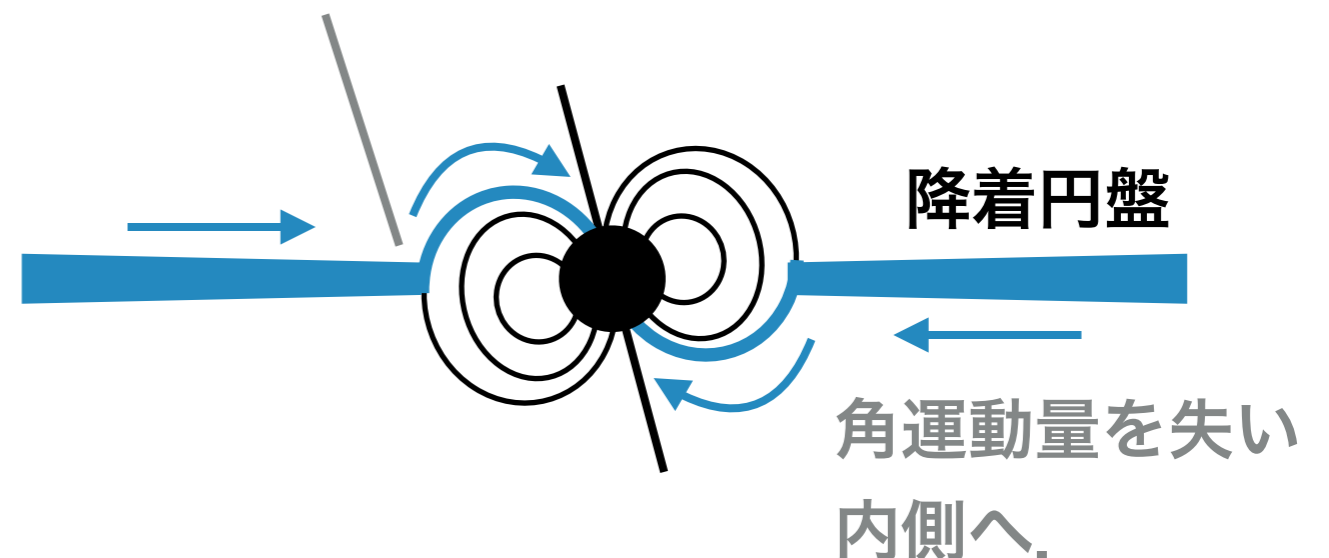
共同研究者：小林翔悟（東京理科大），山口弘悦（ISAS）

超大光度X線源 (ULX)

- ▶ $M \sim 10 M_{\odot}$ のエディントン光度 $L_{\text{Edd}} \sim 1.4 \times 10^{39}$ erg/s を超えるX線光度で輝くコンパクト天体.
- ▶ 8天体ほどは、パルスを出す**降着駆動型中性子星**であることが分かっている (ULXパルサー) .



物質の動圧と磁気圧が釣り合う。
この内側では磁力線に沿って磁極付近に降着.



ULXパルサー

中性子星の質量は $< 3 M_{\odot}$.

→ $M \sim 10 M_{\odot}$ のエディントン光度を超える光度で輝くためには
(エディントン降着率を超える) **超臨界降着**が必要.

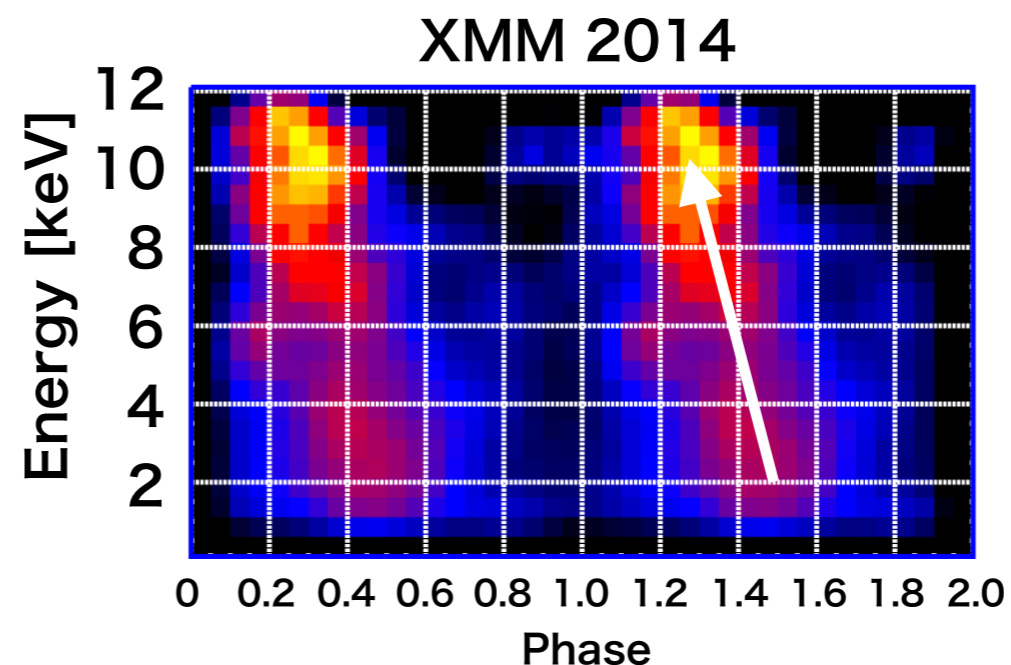
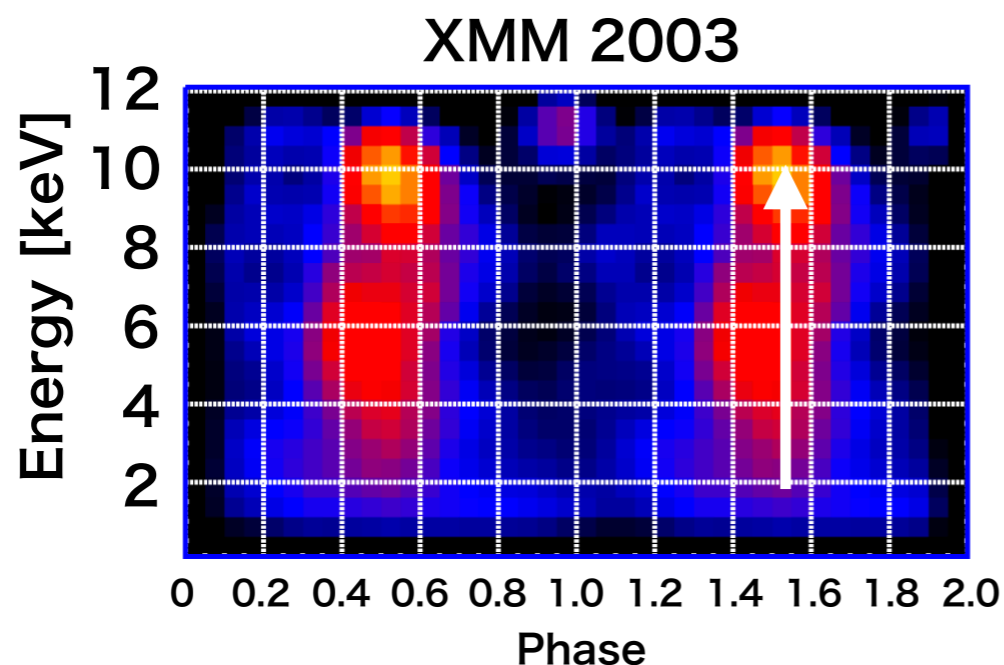
→あまり理解されていない超臨界降着流の性質を解明するために理想的な系！

NGC 5907 ULX1

(Israel et al. 2017)

- ▶ $L_{X, \text{peak}} \sim 10^{41}$ erg/s. $P \sim 1$ s, $\dot{P} \sim 10^{-9}$ s/s. $P_{\text{orb}} \sim 5$ d ?
- ▶ パルスプロファイルのエネルギー依存性（ピークシフト）が報告されている。

降着流の構造を反映して
スペクトルが変化している？



Counts ratio

Israel et al. 2017

本研究の目的・手法

自転位相分解したスペクトルの形状の変化を調べることで
超臨界降着流の構造を明らかにする。

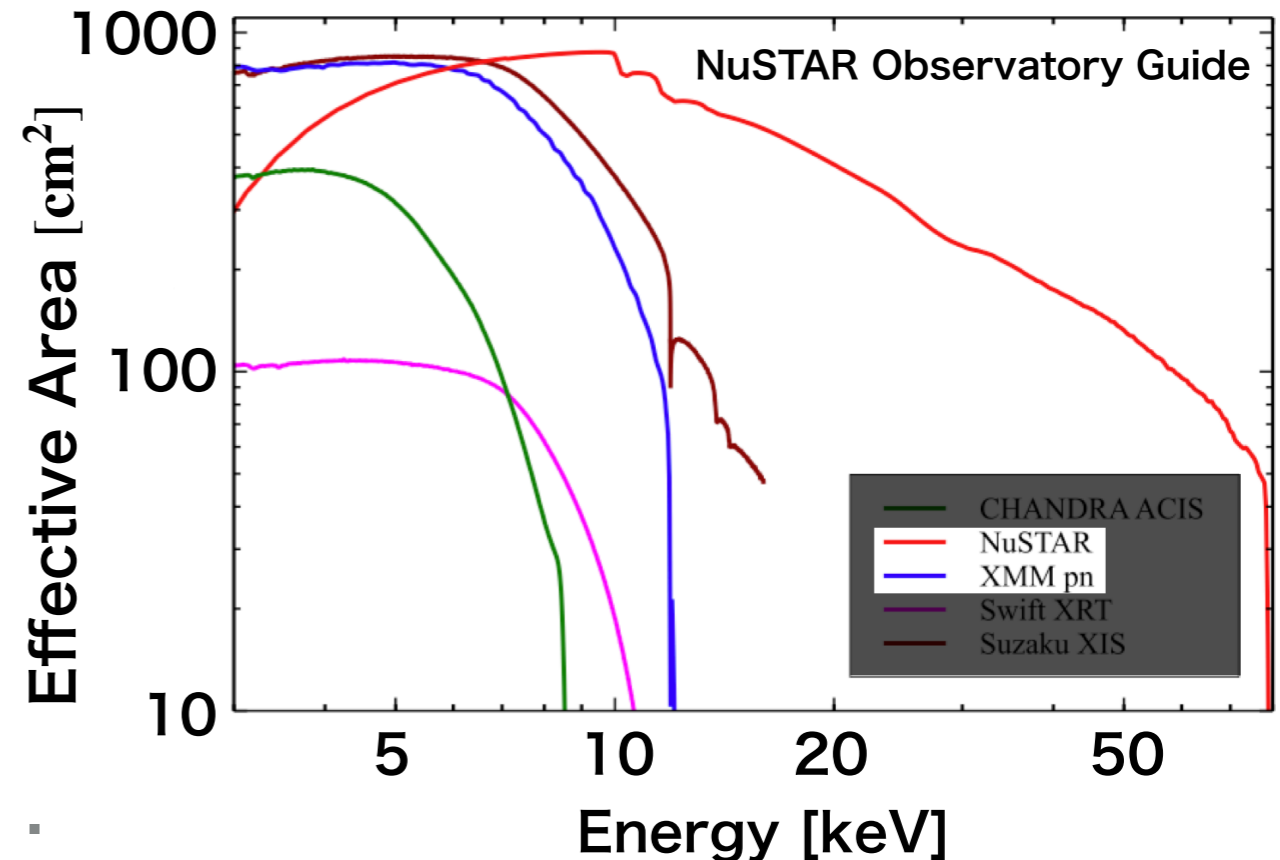
広帯域のスペクトルを得るため、次の二つの衛星による同時観測データを使用。

1. XMM-Newton

- ▶ スペクトルには0.3 – 10 keVを使用。
- ▶ EPIC-pn (時間分解能：73.4 ms)。

2. NuSTAR

- ▶ スペクトルには3 – 30 keVを使用。
- ▶ FPMA, FPMB (時間分解能：2 μ s)。



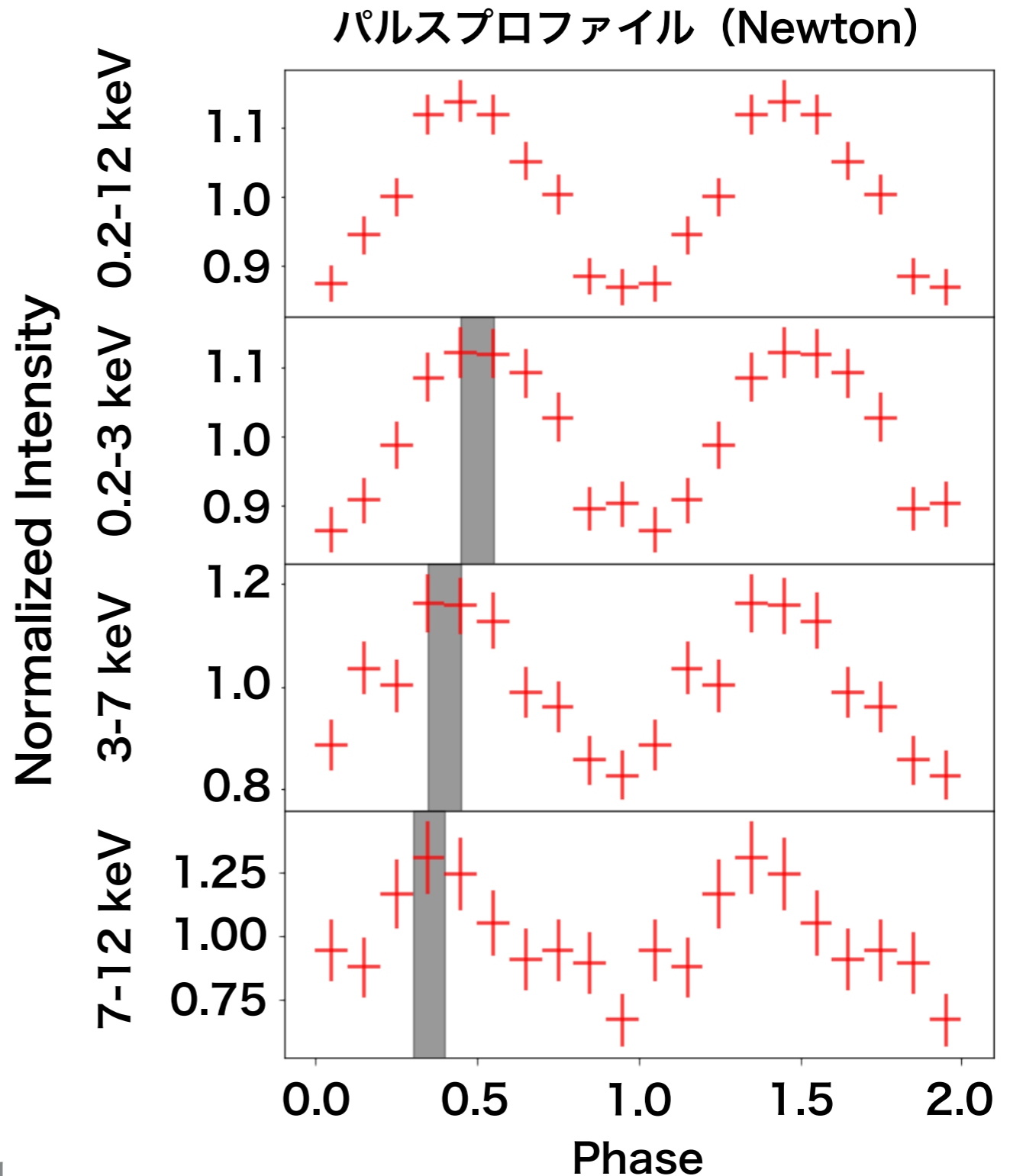
| Mission | Start time | Exposure (ks) |
|-------------------|------------|---------------|
| <i>XMM-Newton</i> | 2014-07-09 | 38 |
| <i>NuSTAR</i> | 2014-07-09 | 57 |

自転周期の決定

- ▶ 全検出器が感度をもつ3 – 10 keVのライトカーブを使用.
- ▶ Z_n^2 searchという手法を用いた.
- ▶ 結果はIsrael et al. 2017と一致.
- ▶ 検出器間でも誤差の範囲で一致.

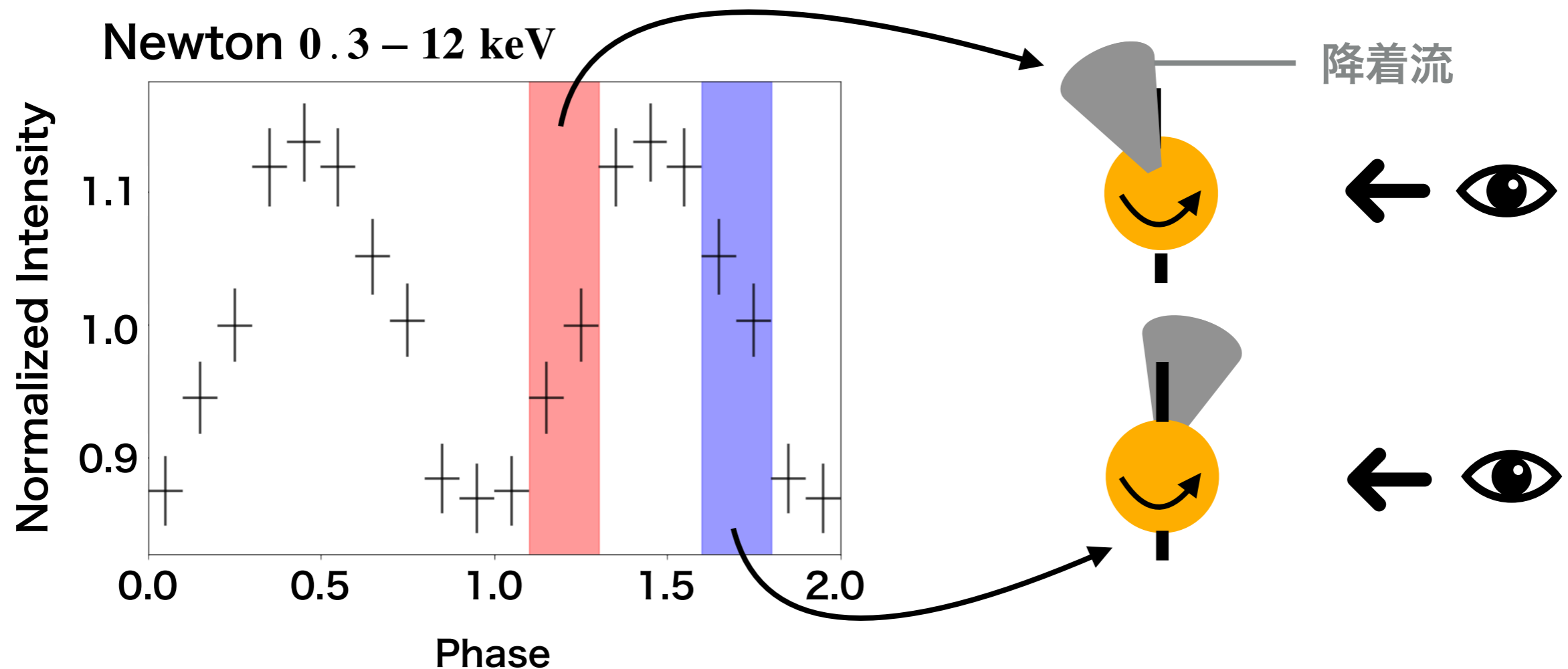
| 検出器 | f (s^{-1}) | \dot{f} ($10^{-9} s^{-2}$) |
|---------|--|--------------------------------|
| EPIC-pn | $0.878\,985 \pm 0.000\,015$ | $4.16^{+0.71}_{-0.79}$ |
| FPMA | $0.878\,999 \pm 0.000\,007$ | $4.00^{+0.13}_{-0.14}$ |
| FPMB | $0.878\,997^{+0.000\,007}_{-0.000\,006}$ | $4.02^{+0.12}_{-0.14}$ |

- ▶ 時間分解能に優れるFPMAの結果を採用.



自転位相分解

- ▶ イベントを自転位相で10分割し，スペクトルを作成.
- ▶ 特にパルスプロファイルの**ピーク前後**に注目し，それぞれビンをまとめて統計を増やした.



スペクトル解析

先行研究と同じモデル (Fürst et al. 2017).
不変成分の値は先行研究と誤差の範囲で一致.

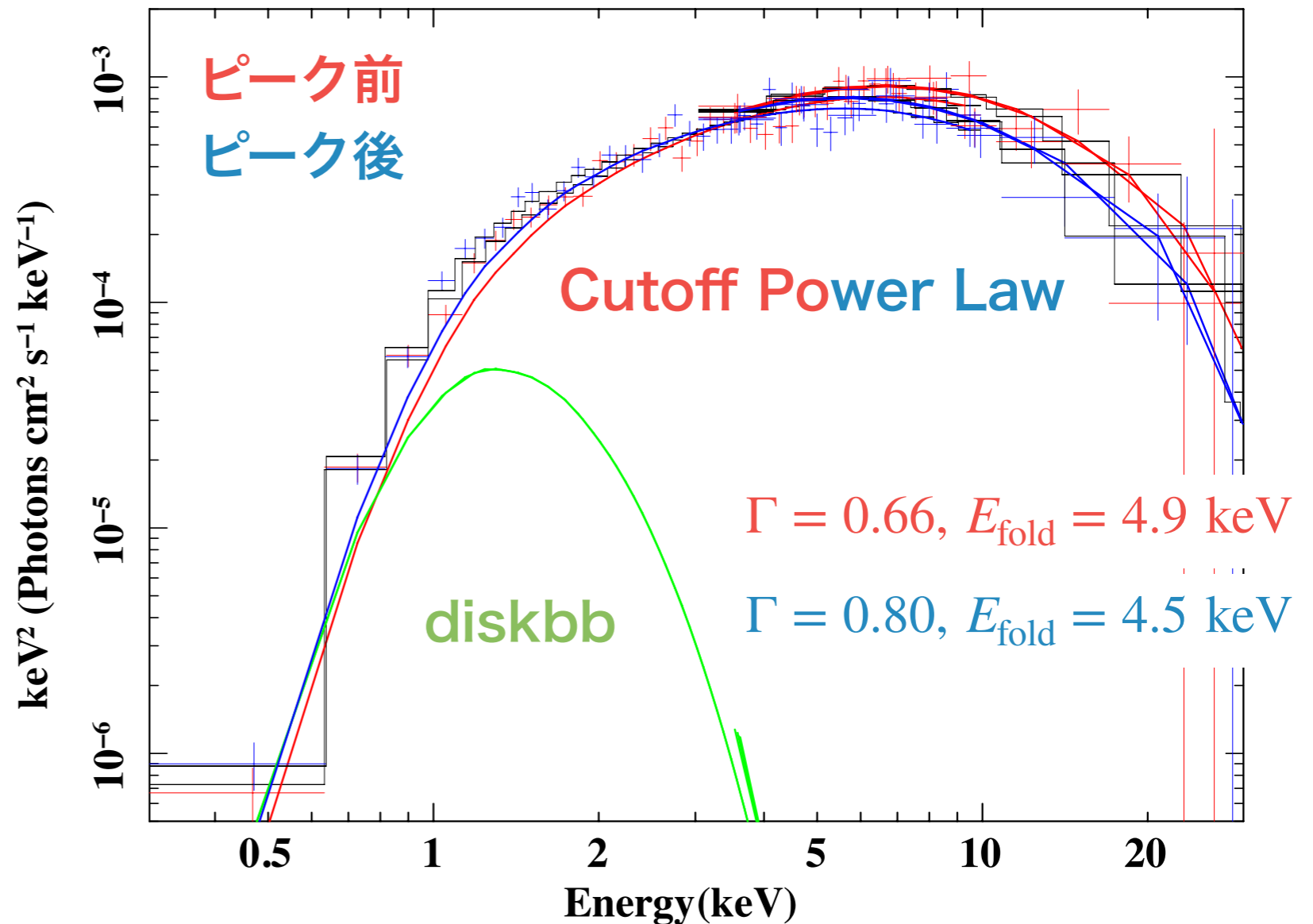
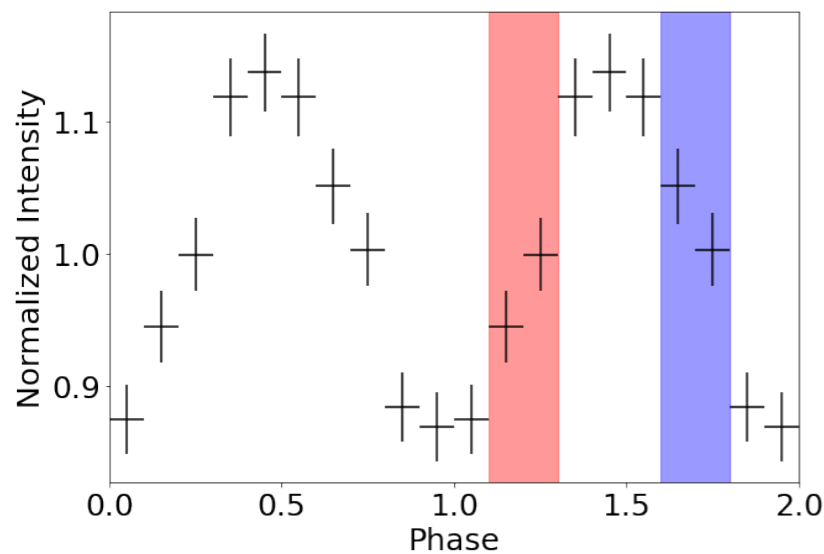
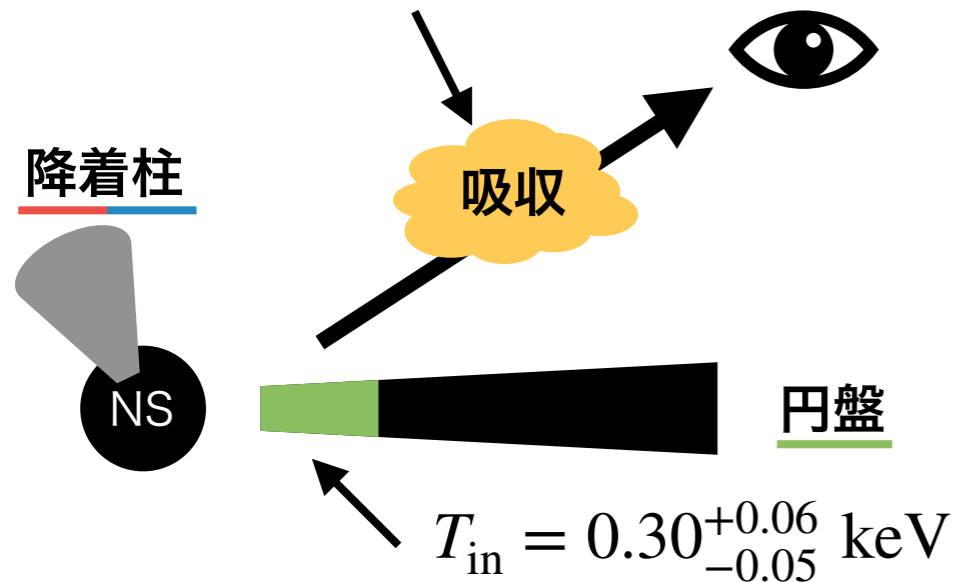
標準円盤による黒体放射+Cutoff Power Law でフィッティング.

不変成分

降着柱 (変動成分)

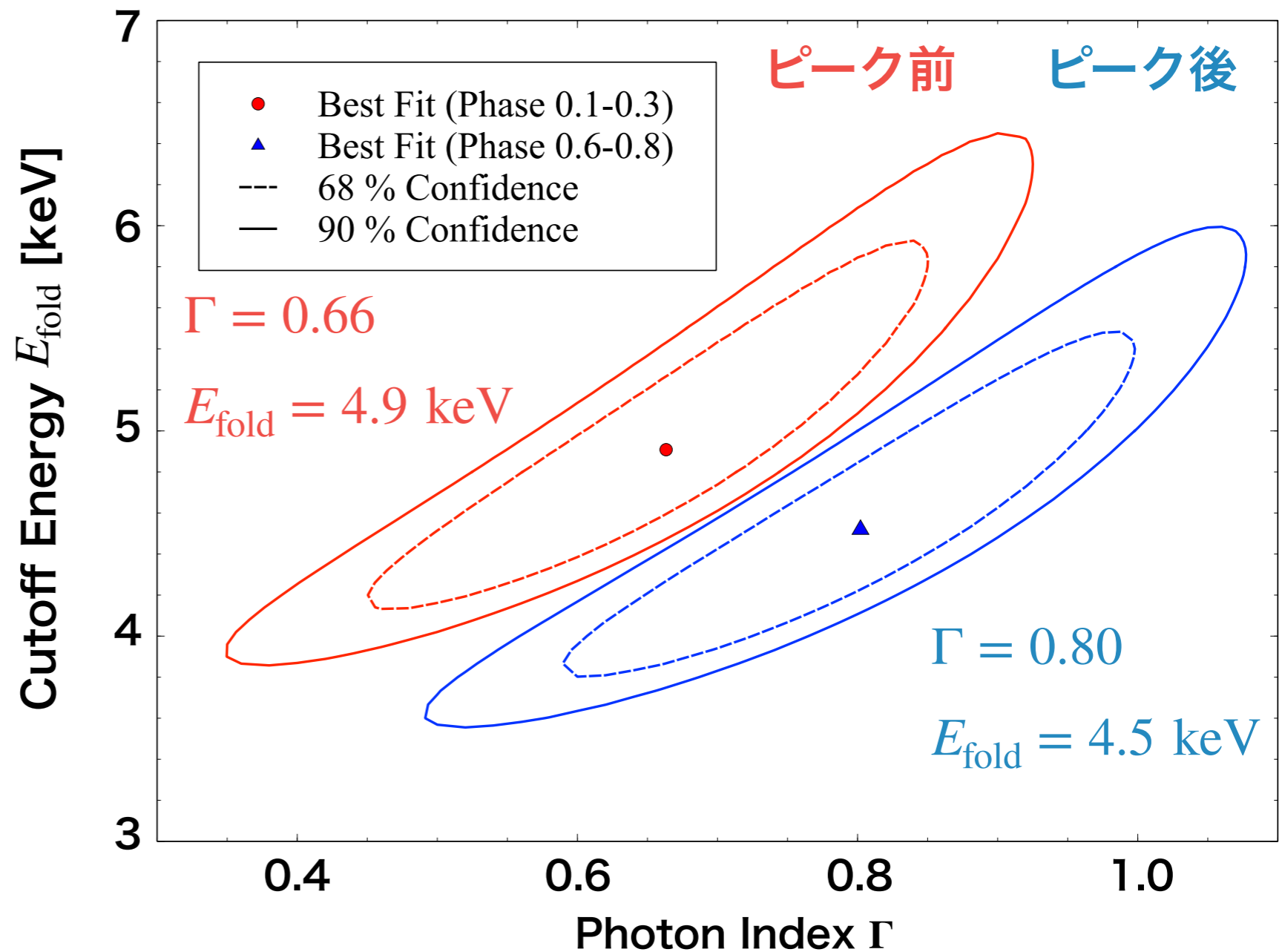
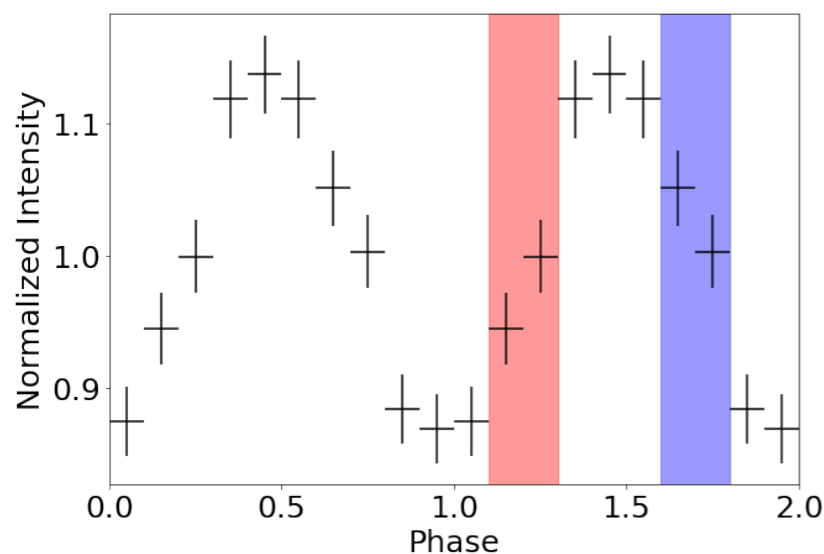
$$N_H = 0.79^{+0.09}_{-0.08} \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$$

PG-statistic : 7426.43 (d.o.f. = 9416)



スペクトル解析

パルスプロファイルのピーク前後でCutoff Power Lawの
パラメータの組(Γ, E_{fold})が有意に異なることを発見.



議論：パルス放射成分の解釈

降着率が大きく、**光学的に厚い降着流**。

光子はかなり散乱を受ける。

(Mushtukov et al. 2017)

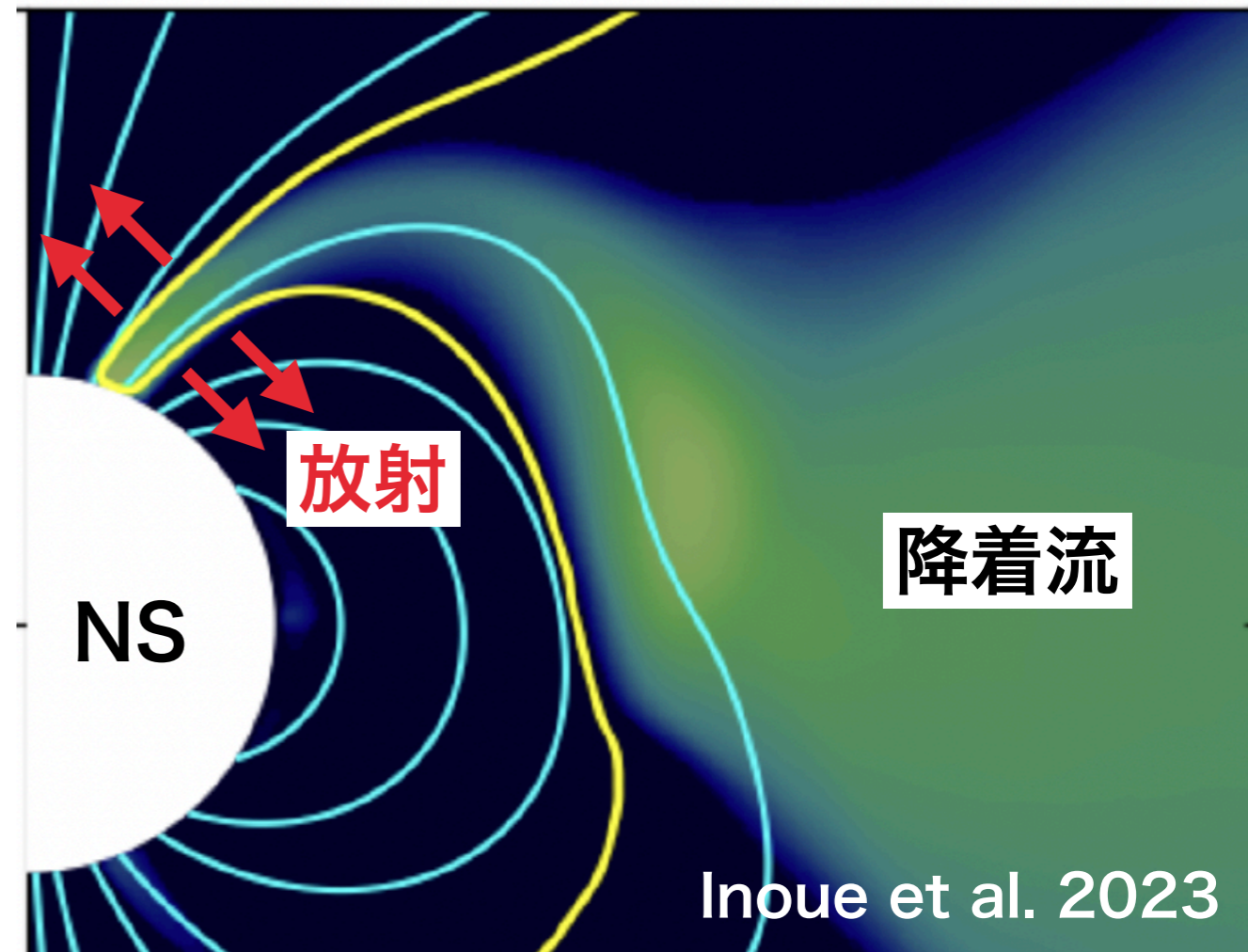
→パルス放射成分は**多温度黒体放射**で近似できる。

この場合、

E_{fold} : 降着流の**最大温度**

Γ : **温度勾配**

にそれぞれ対応する。

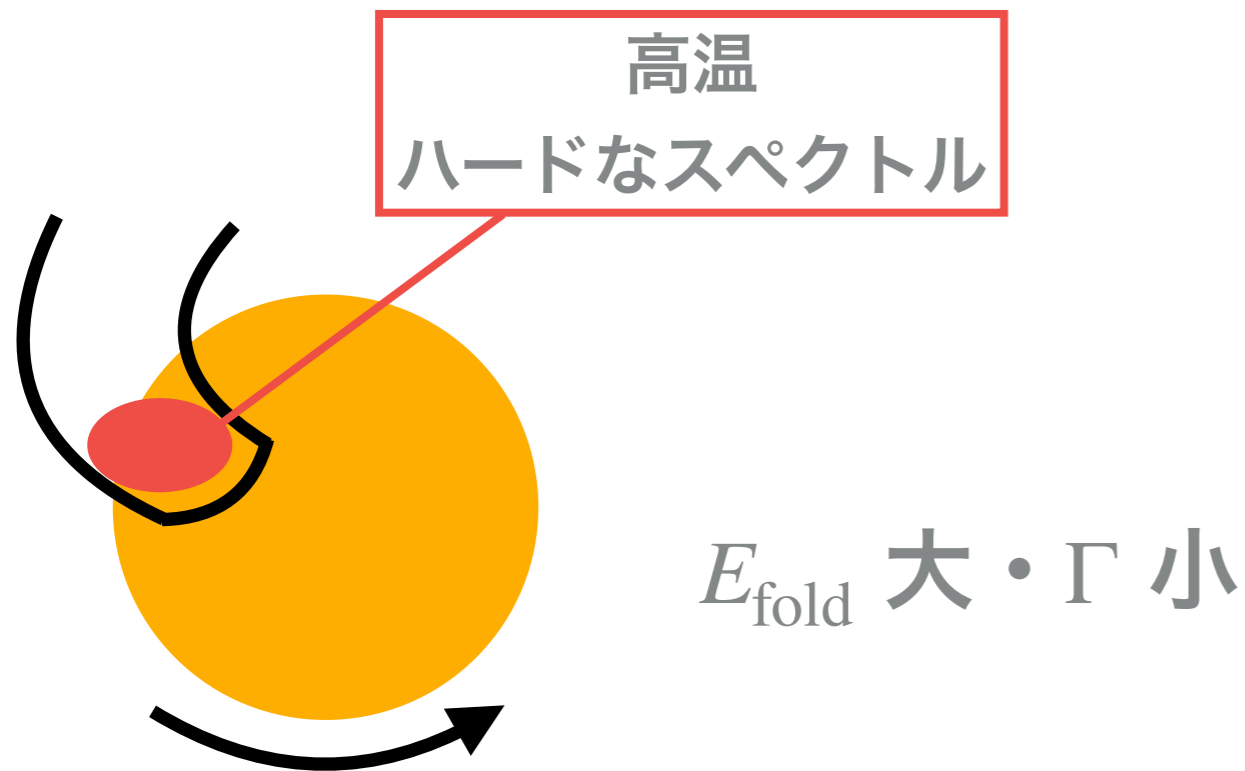


議論：考えられる構造1

降着柱が回転方向奥向きにたなびいたような構造.

ピーク前：降着柱の根元が最も手前に見えている.

ピーク後：降着柱の先の方が最も手前に見えている.



議論：考えられる構造 2

降着柱の構造が**非対称**.

E_{fold} : 降着流の最大温度
 Γ : 温度勾配

E_{fold} 小・ Γ 大



低温
温度勾配大



E_{fold} 大・ Γ 小



高温
温度勾配小

まとめ

- ▶ ULXパルサーは**超臨界降着**について観測的に研究する上で理想的な対象。
- ▶ 超臨界降着流の構造を調べるために**自転位相分解スペクトル**の解析を行った。
- ▶ パルスプロファイルの**ピーク前後で異なるスペクトルを示す**ことを発見した。
- ▶ そこから考えられる降着流の構造について予想を立てたが、その構造がどの物理量に依存して実現するのか（磁場強度？降着率？...），理論・シミュレーションの方の意見が欲しい。

今後の課題

- ▶ より詳細な構造の情報を得たい。
 - 統計の良い観測データが必要。
- ▶ パルスプロファイルのピークシフトの有無はどの物理量と関係しているのかを知りたい。
 - 同一天体の複数の時期，他天体との比較。
- ▶ ULXパルサーにおけるアウトフローについて理解したい。
 - XRISMを用いた吸収線の分光観測。