

IXPE衛星によるCyg X-1の X線偏光観測と短時間変動

二之湯開登

東京理科大学大学院 創域理工学研究科先端物理学専攻 修士1年

山田真也 五十嵐太一 早川 亮大 河村天陽(立教大) 幸村孝由 内田悠介(東理大)

▶ 主要なスペクトル状態

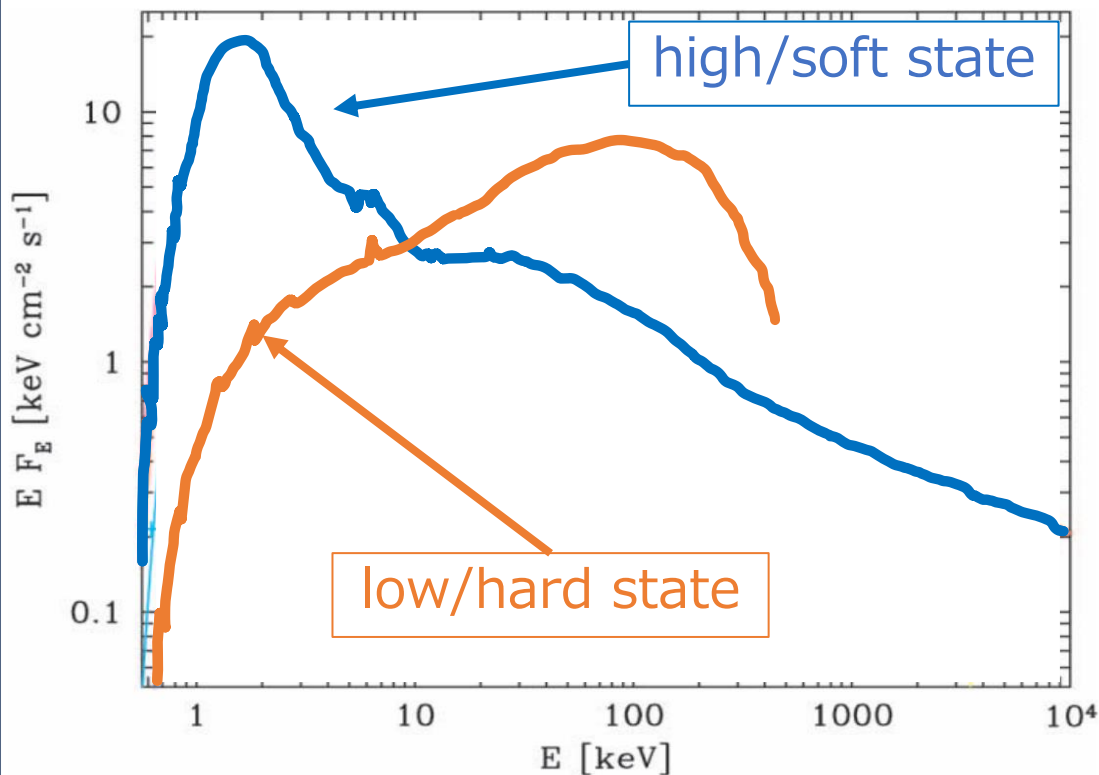


図1 Cyg X-1の様々なスペクトル状態 (Zdziarski et al. 2002)

■ high/soft state

- 降着円盤からの黒体放射 (~ 0.1 keV) が支配的
- 降着率が高い \rightarrow 円盤内縁 = 最内縁安定円軌道
- 高エネルギー側にハードテイル
 \rightarrow 熱的電子と非熱的電子のハイブリット型コロナ

■ low/hard state

- コロナによる逆コンプトン散乱が支配的
- ~ 100 keVで折れ曲がり = 高温の電子の存在
- 「円盤 + コロナ」モデル
 \dots 標準円盤とADAFでの説明が有力

✓ 降着流の構造は複雑で、放射過程の物理がについては多くの議論がなされている

➤ 降着円盤とコロナの幾何学的構造

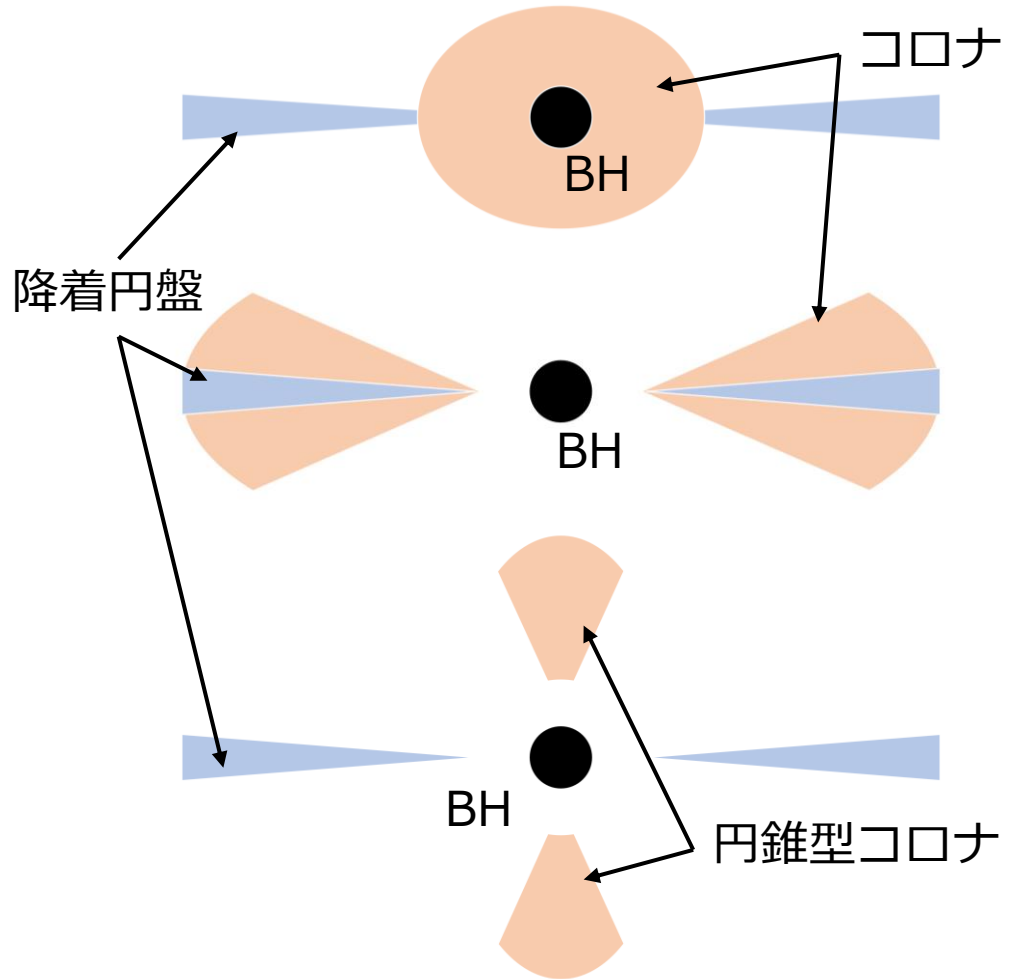


図2 予想される降着円盤とコロナの幾何学的構造の例

1. エネルギースペクトル解析
2. 時間変動解析
3. 偏光解析

➤ ブラックホール近傍のガス降着

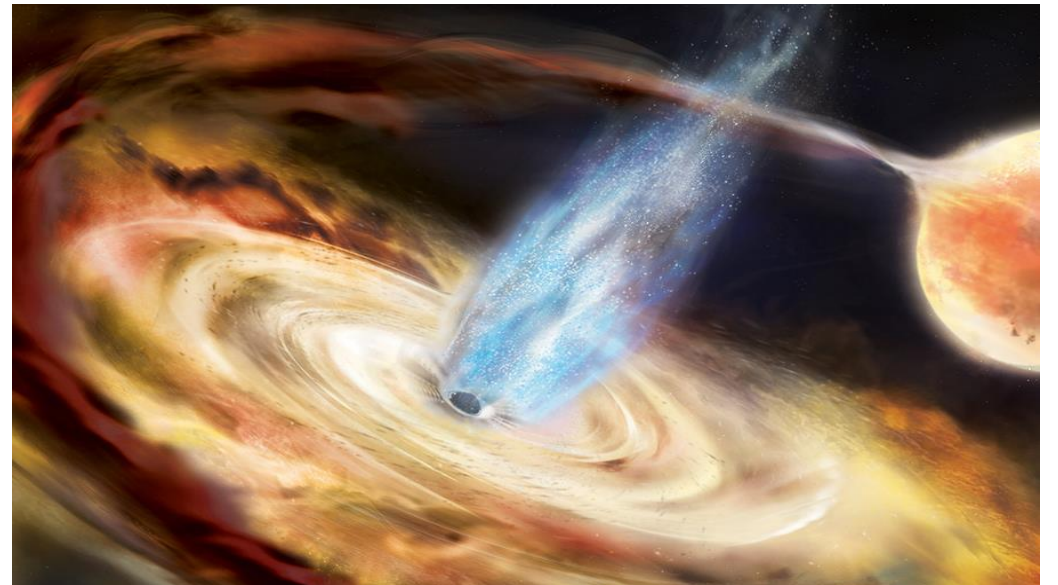
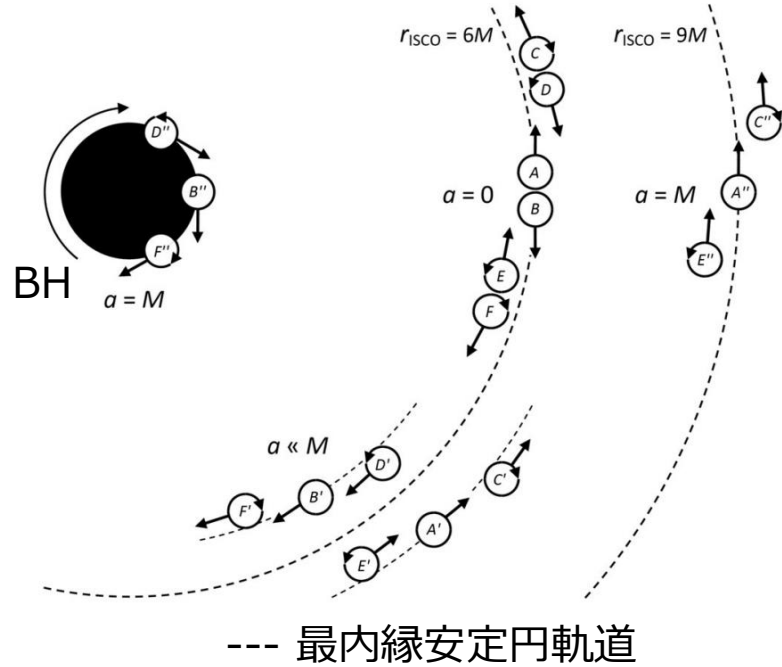
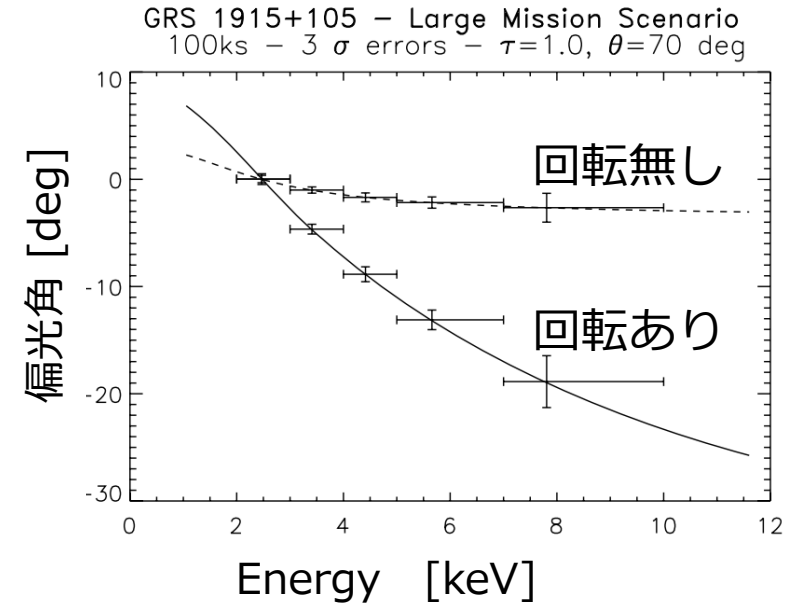
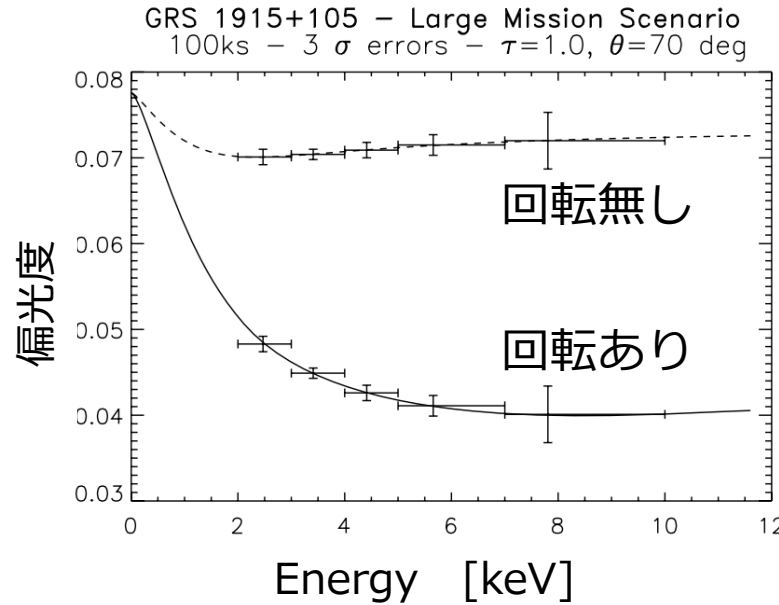


図3 ブラックホール連星の想像図

➤ ブラックホールのスピン



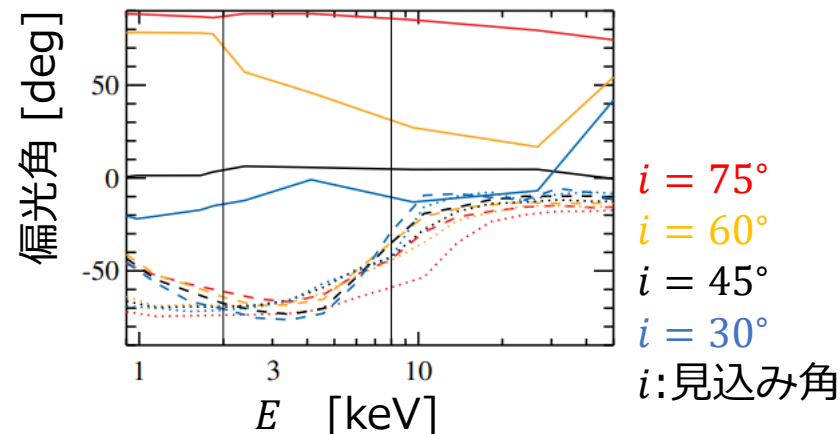
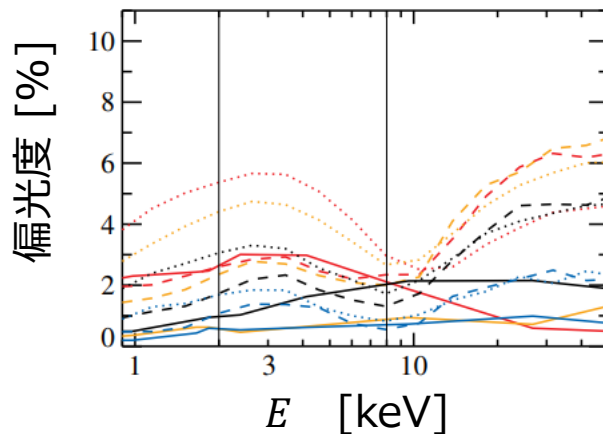
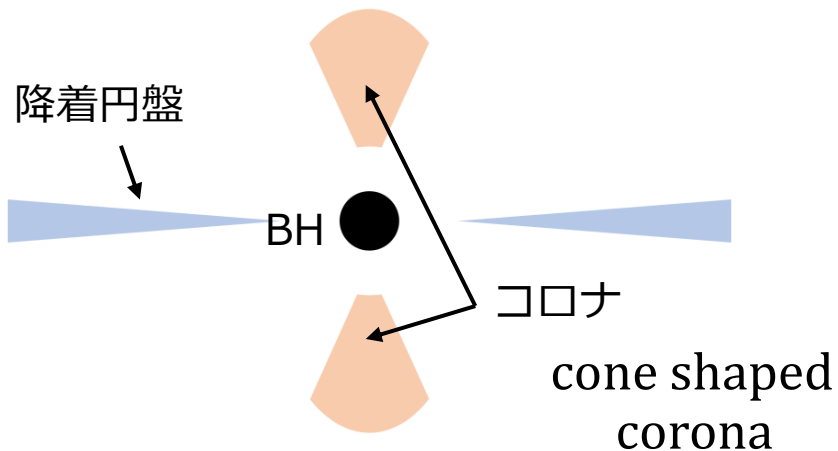
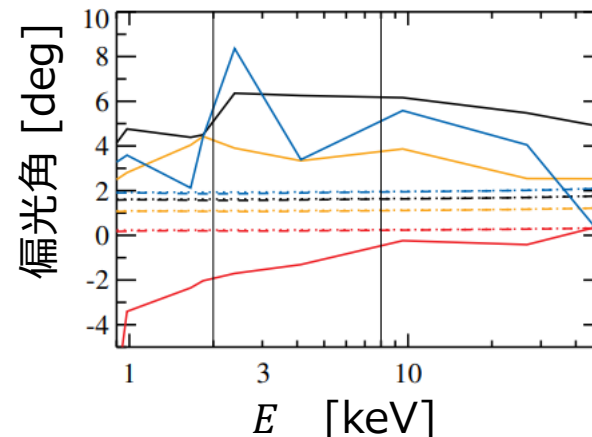
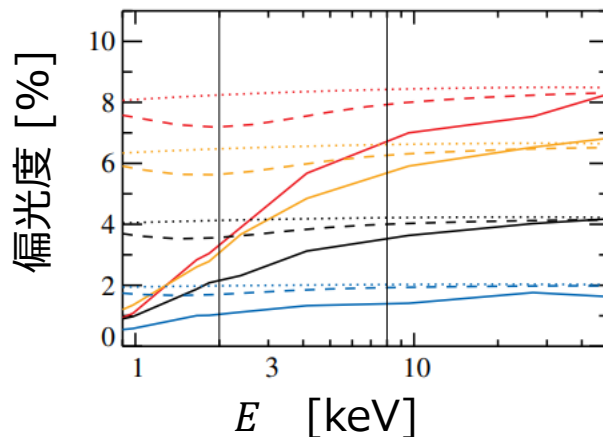
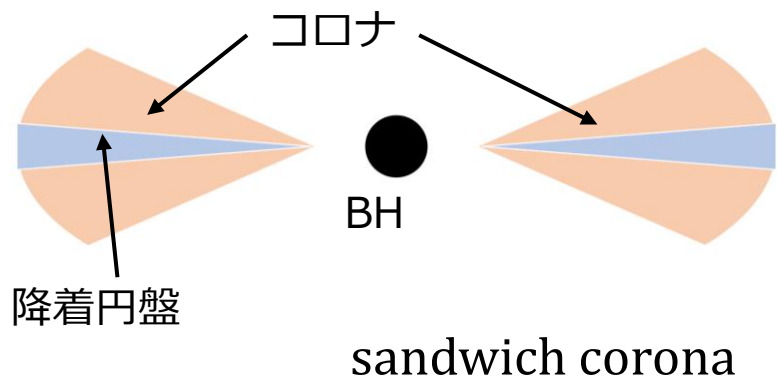
図* 粒子の運動方向とBHのスピンを変えたときの最内縁安定円軌道 (ISCO)の半径 (Jefremov et al. 2015)



図* GRS1915+105 のBHの回転ありと回転なしの偏光度(左)と偏光角(右)のエネルギー依存性の計算結果 (Dovciak et al. 2008)

✓ ブラックホールのスピンによって物質の空間分布・時空のゆがみ方が異なる \Rightarrow 偏光状態が異なる。
 \Rightarrow スピンの制約につながる。

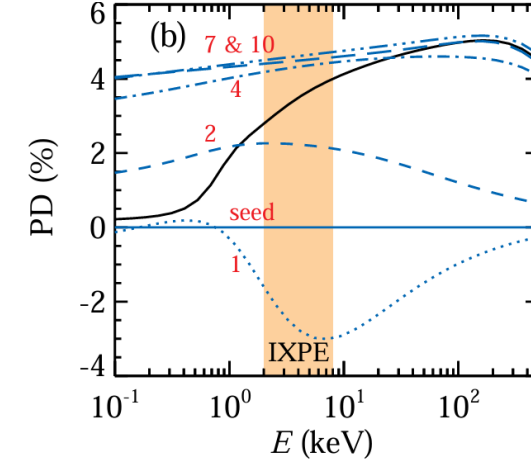
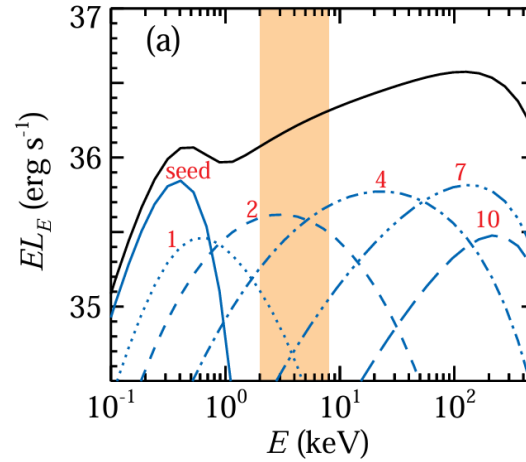
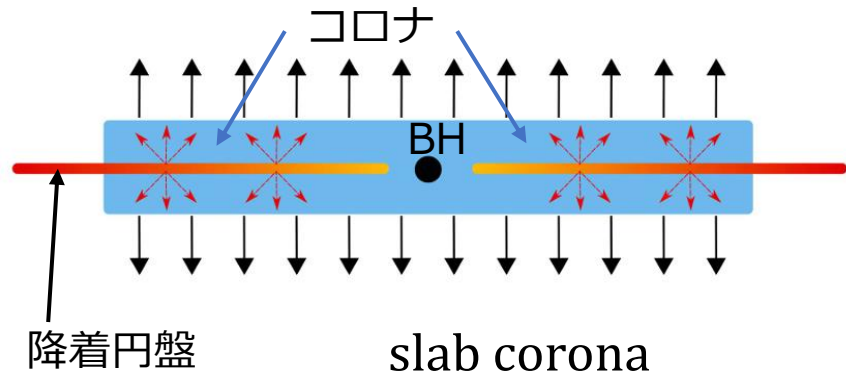
➤ 降着円盤とコロナの幾何学的構造



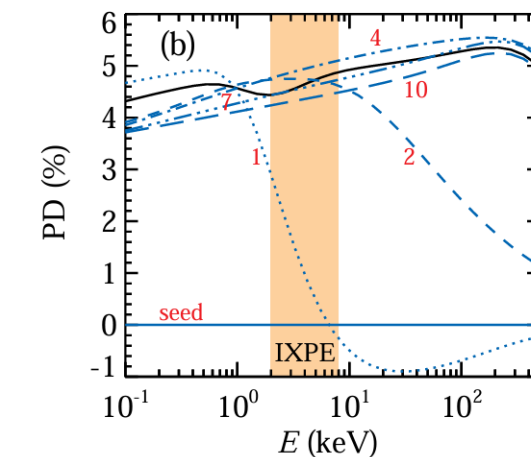
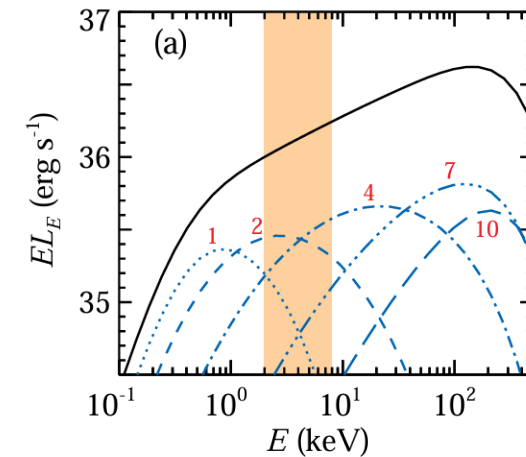
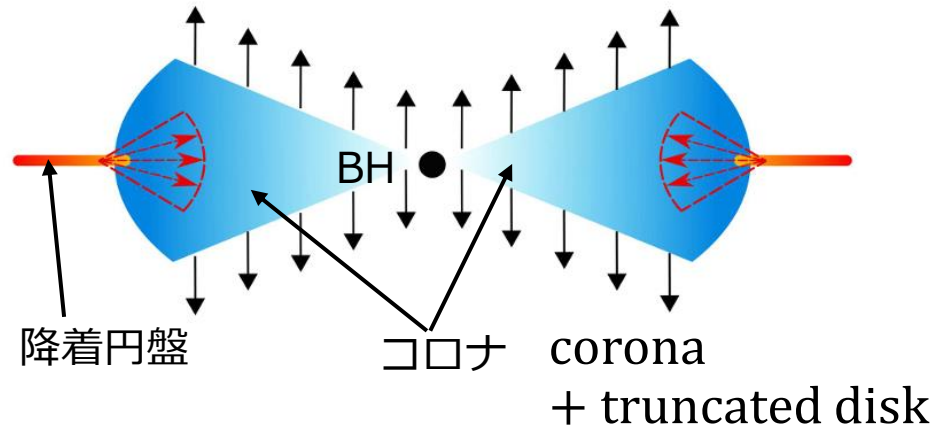
- ✓ ブラックホール近傍の降着流の分布が偏光度・偏光角に反映される。
- ✓ 観測と比較して考察することで、コロナの分布を推定できる。

図* コロナの形(左)を仮定したときの偏光度(中央)と偏光角(右)のエネルギー依存性の計算結果(上段:sandwich型 下段:三角錐型)

➤ 降着円盤とコロナの幾何学的構造



赤の数字は種光子の散乱回数

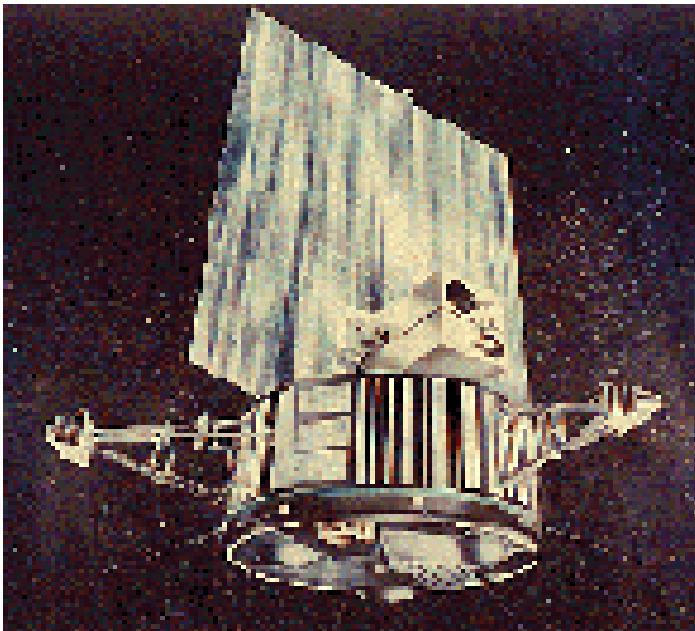


赤の数字は種光子の散乱回数

図* コロナの形(左)を仮定し、種光子の散乱回数を込みで計算したスペクトル(中央)と偏光度(右) (Poutanen et al. 2023)

➤ OSO-8衛星 (1975年打ち上げ)

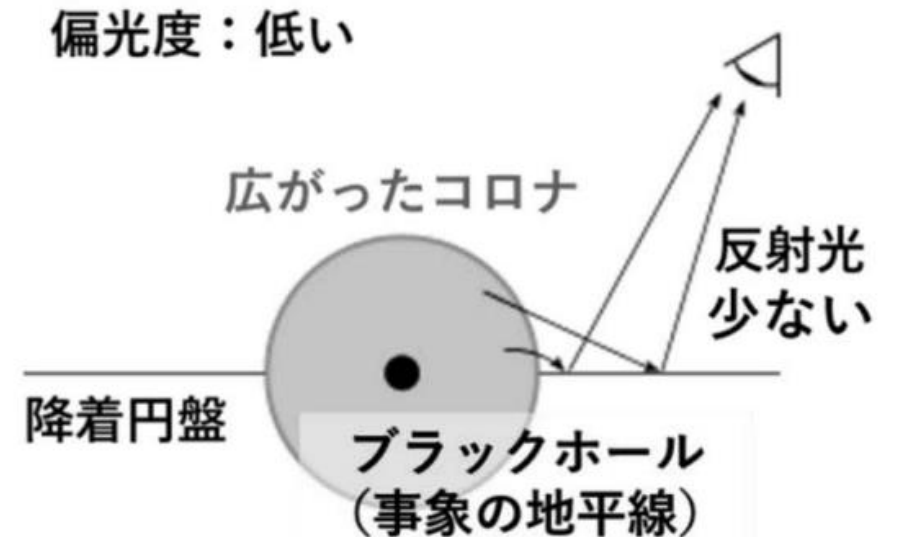
- グラファイト結晶のブラッグ反射を利用した偏光計
- 2.6、5.2 keVのみの感度
 - 2.4 ± 1.1 % @2.6 keV
 - 5.3 ± 2.5 % @5.2 keV



図* OSO-8衛星 引用：[HEASRAC: OSO-8](https://heasrarc.gsfc.nasa.gov/OSO-8/)

➤ POGO+気球実験 (2016年)

- コンプトン散乱の散乱角の異方性を利用した偏光計
- 19-181 keVの偏光情報の制限
 - 偏光度： < 8.6 % (90%上限)
 - 偏光角：降着円盤の表面に垂直 (が好まれる)



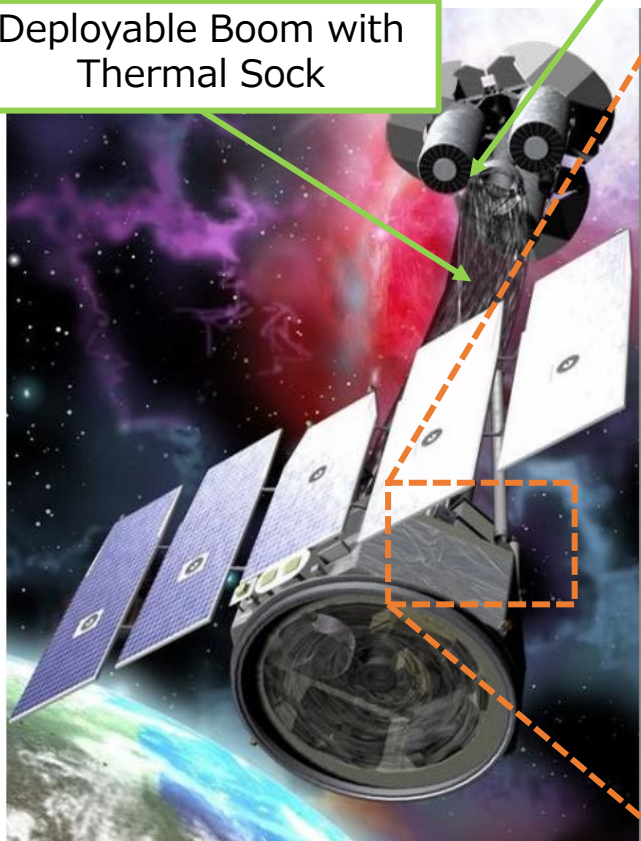
図* PoGo+の結果から予想されるコロナのモデル
引用：[天文月報 2019年7月](https://www.spa.go.jp/journal/201907/) 高橋弘充

➤ **IXPE**衛星 : **Imaging X-ray Polarimetry Explorer**

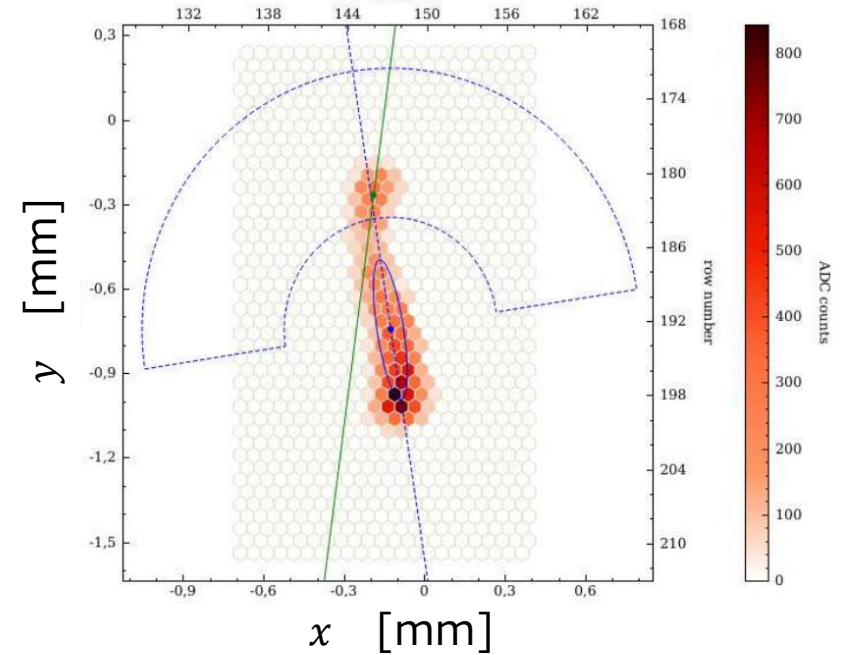
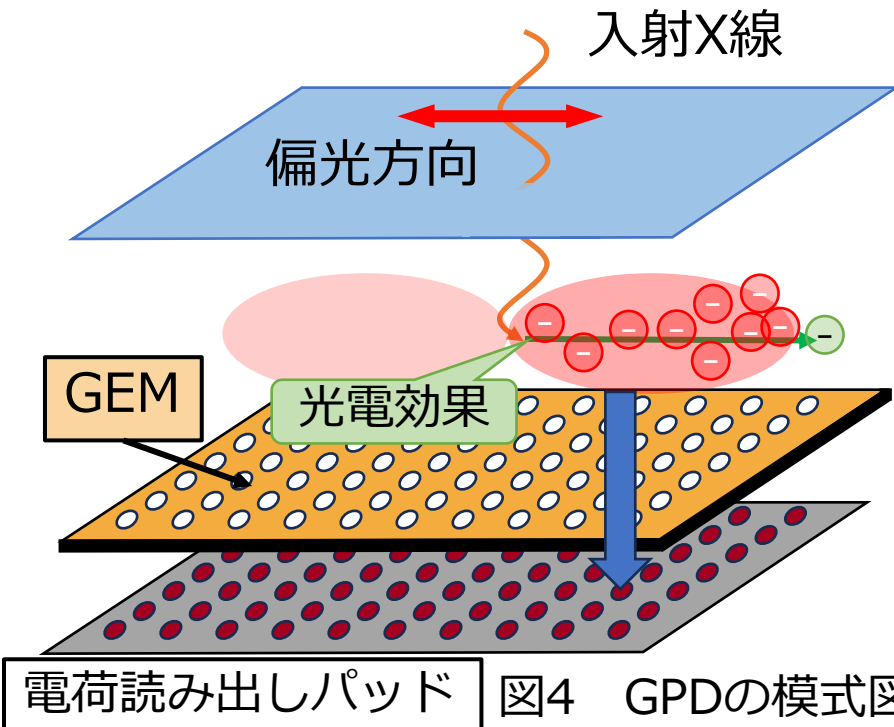
- 2021年 9月打ち上げ • 偏光X線による光電効果を利用して偏光測定を行うガス検出器
- X線偏光観測衛星 • 2-8 keVの軟X線帯域に感度をもつ

Mirror Module Assembly

Deployable Boom with Thermal Sock



Gas Pixel Detector×3 for each DU



電荷読み出しパッド 図4 GPDの模式図

図5 光電子の飛跡

➤ IXPE衛星によるCyg X-1の観測

- 2022/5/15の観測：low/hard state
- 光電効果の異方性を利用した偏光計
- 2-8 keVの偏光情報
 - 偏光度： 4.01 ± 0.20 %
 - 偏光角： -20.7 ± 1.4 deg
- 電波ジェットの方法とX線の偏光角の方法が一致 (Krawczynski et al. 2022)

コロナが降着円盤に沿った分布モデルが観測と一致

電波ジェットの方向

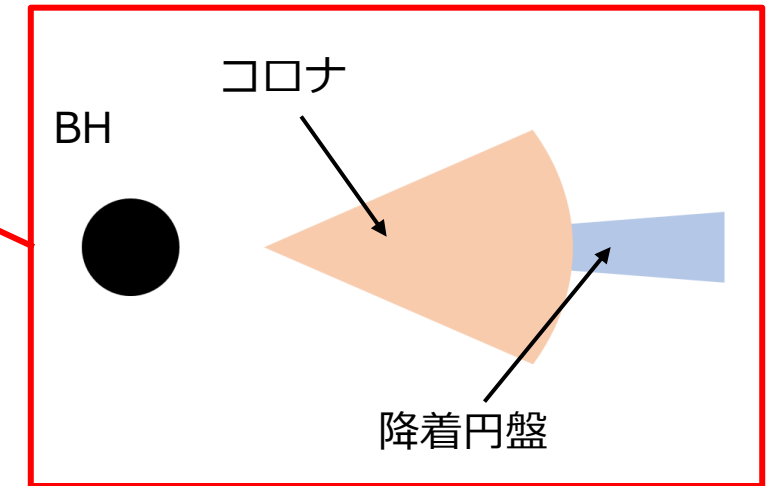
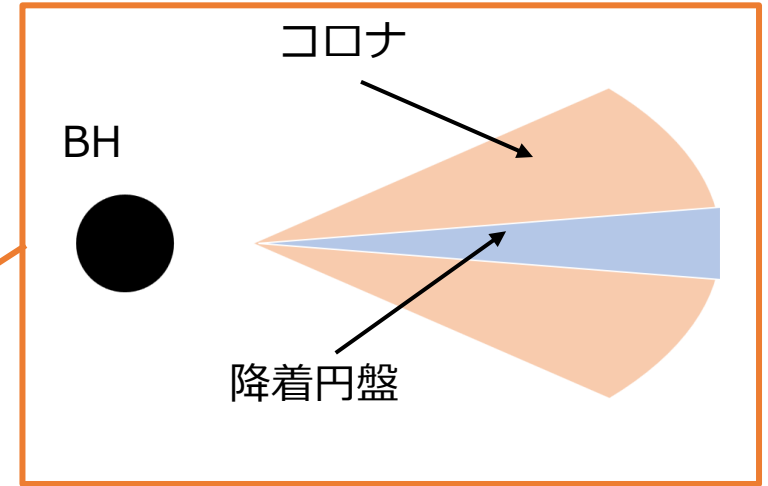
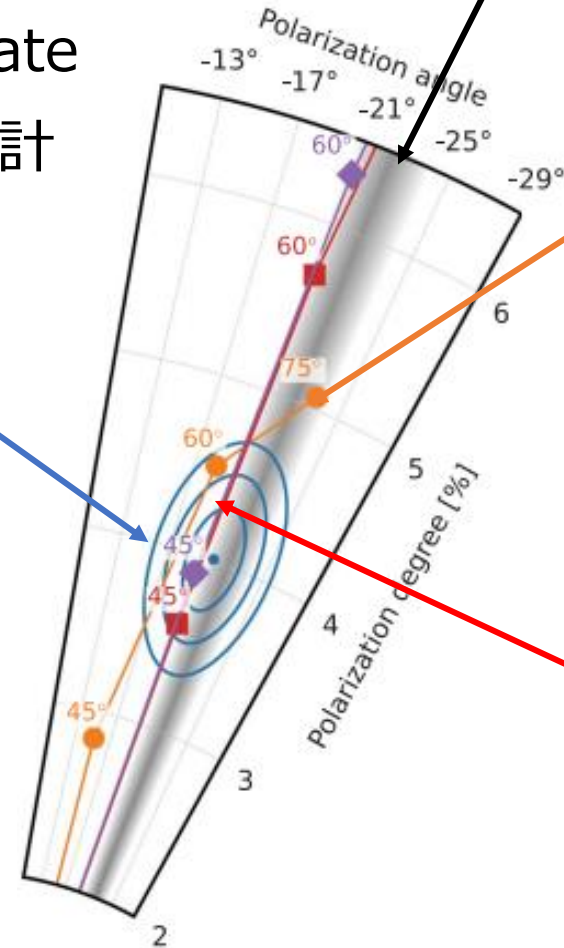


図6 IXPEによるCyg X-1の観測結果

✓ X線偏光にはブラックホール近傍の降着流の分布の情報が反映されている。

➤ 不規則な数秒スケールの明るさの変動

- Cyg X-1のlow/hardにおいて $< \sim 1$ sスケールのX線強度変動 = 「ショット」が観測されている。
- Yamada et al. 2013でショット解析(Negoro et al. 1994)を適用し短時間変動とスペクトルの変化を関連付けた。

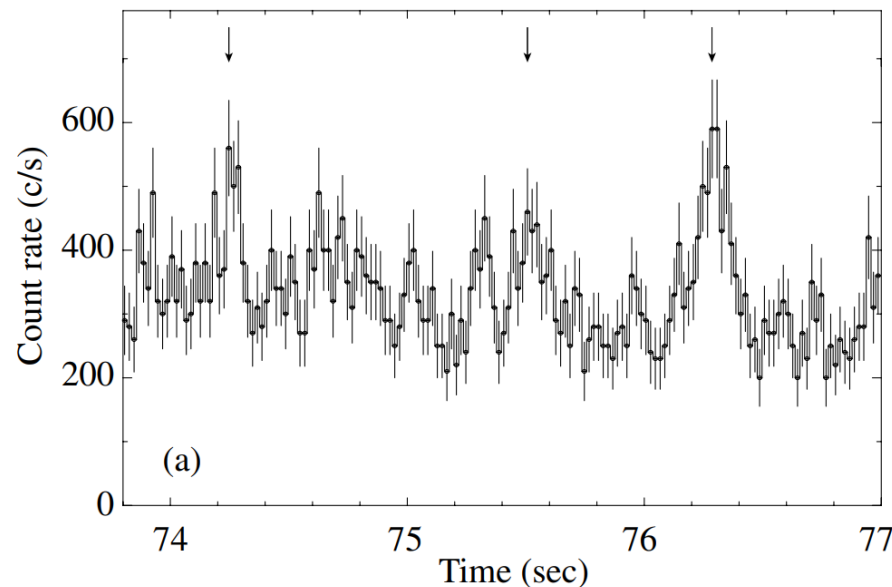


図7 すざく衛星XISのライトカーブにおけるショット

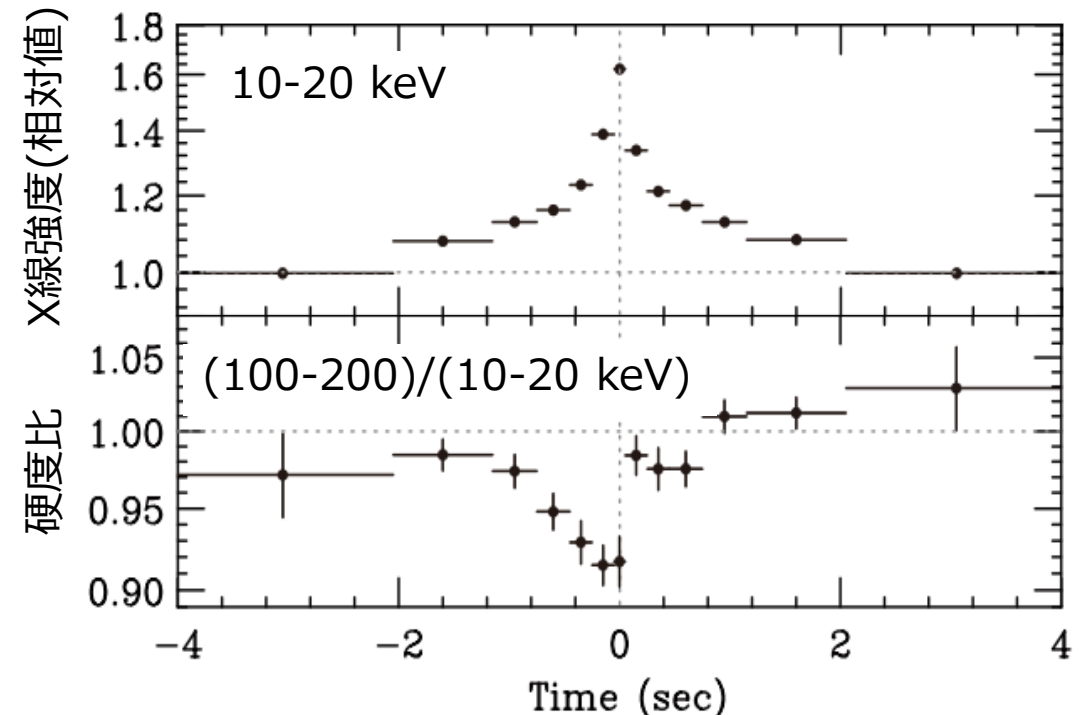
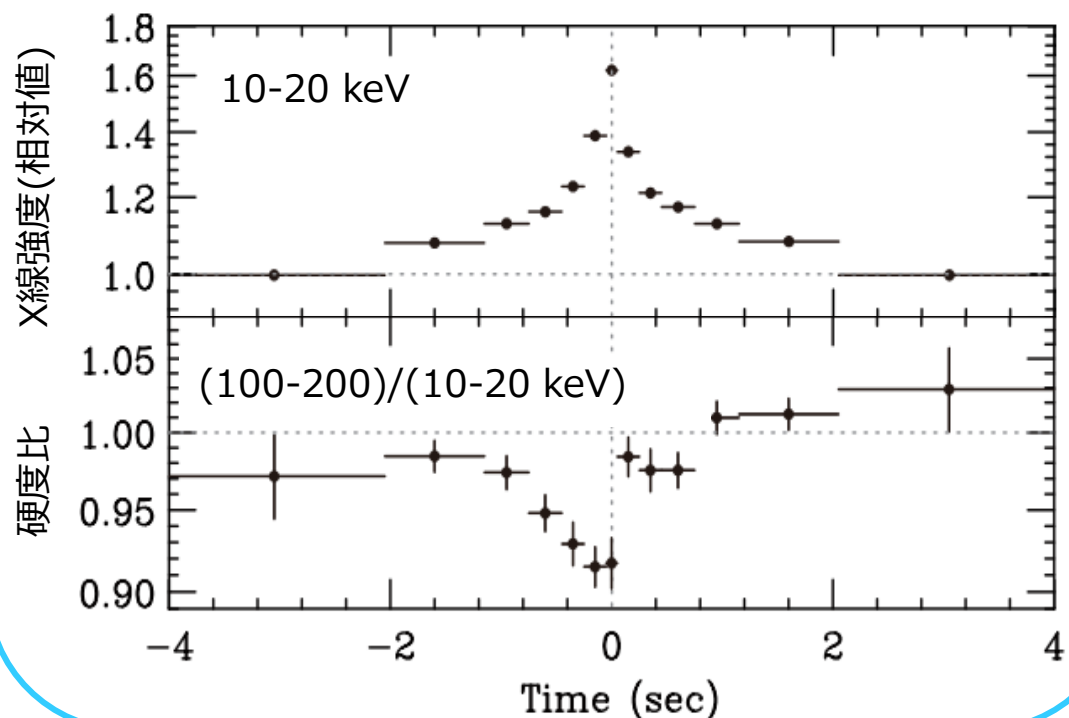


図8 ショットプロファイル(上段)と硬度比のプロファイル

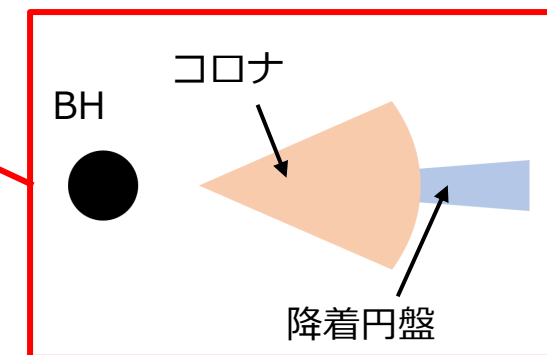
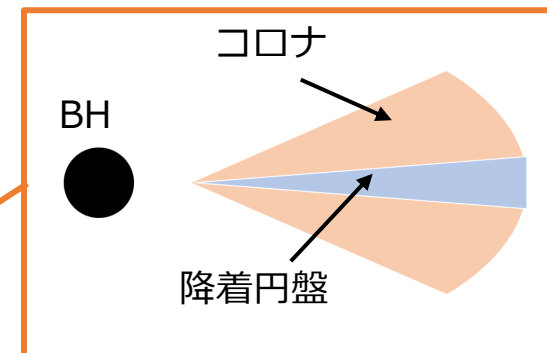
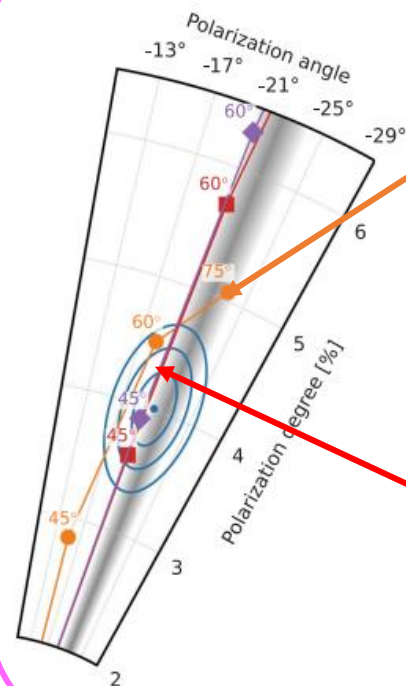
✓ 明るくなる(ピーク)瞬間 = ガスがブラックホールへ落ち込む瞬間 と解釈されている。

➤ 数秒スケールの明るさの変動における偏光の短時間変動を追う

数秒スケールの明るさの変動



偏光



IXPE衛星の観測データに対して、「ショット解析」を適用し、数秒スケールの強度変動に伴う偏光の時間変動を追った。

観測データ

- IXPEによるCyg X-1の全7回の観測について解析を行った。
- 典型的なlow/hard×2回、high/soft×5回の観測

	Date	Exposure	State
(A)	2022/06/18	248 ks	low/hard
(B)	2022/06/20	88 ks	low/hard
(C)	2023/05/02	23 ks	high/soft
(D)	2023/05/09	35 ks	high/soft
(E)	2023/05/24	29 ks	high/soft
(F)	2023/06/13	33 ks	high/soft
(G)	2023/0620	41 ks	high/soft

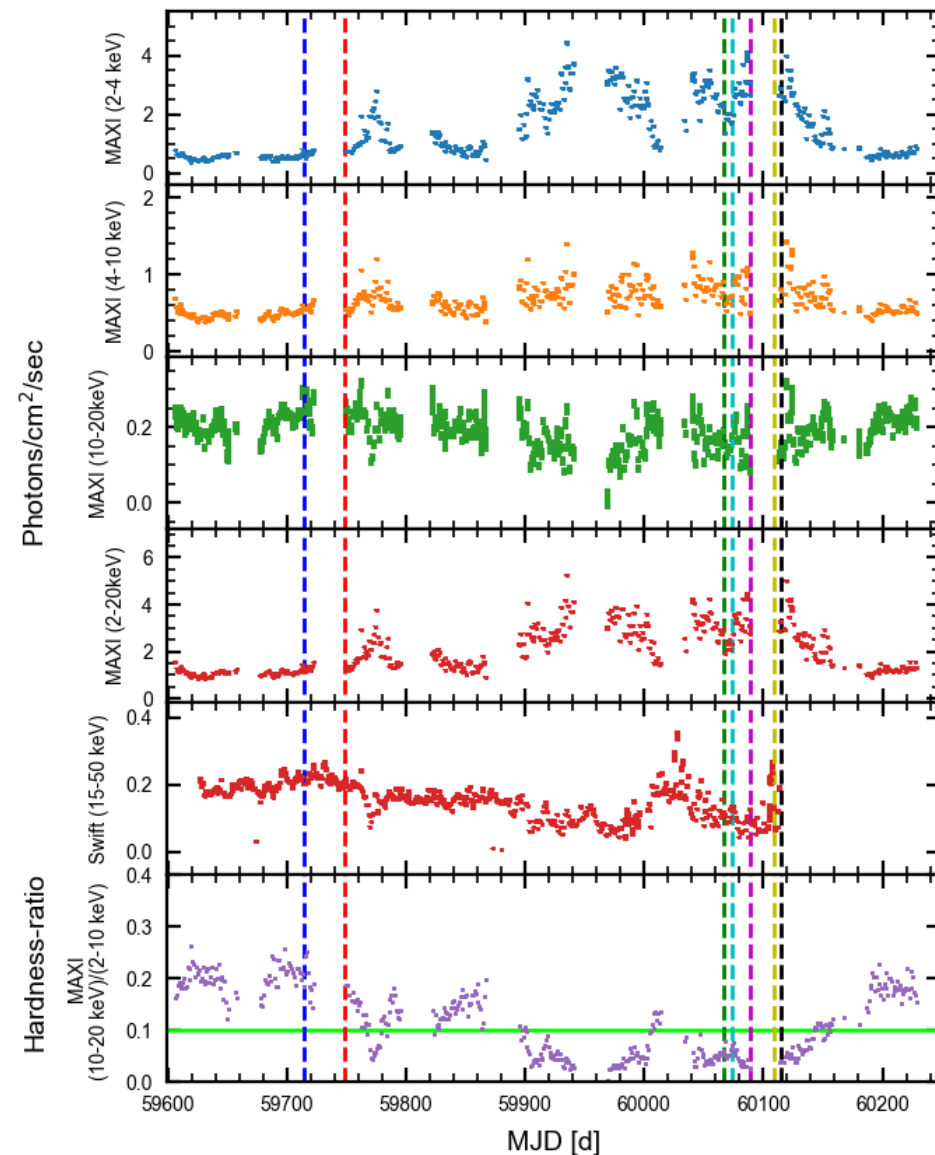


図9 Swift・MAXIによるCyg X-1の観測

▶ IXPEによるCyg X-1の観測(例: hard state)にショット解析を適用

- 周りよりも明るさが際立っているイベントをショットのピークとして判定。
- 1つのショットを分析しても、光子数が少なく統計が足りない。
⇒ 複数のショットをみつけ、ピークを合わせて足しこんで統計を上げる。

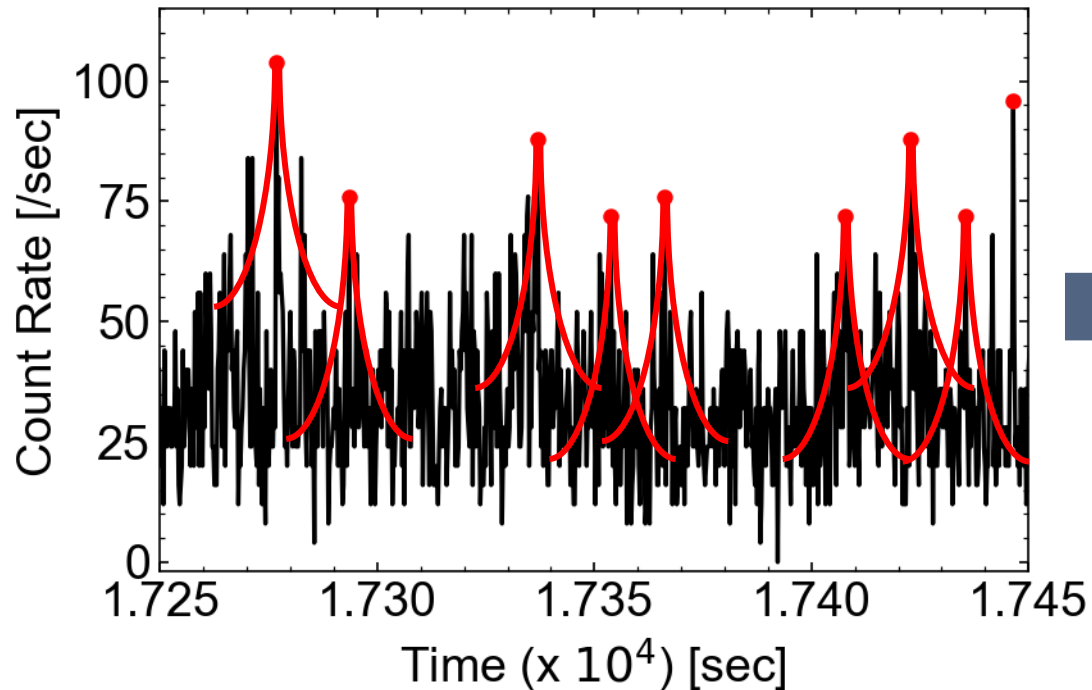


図10 ライトカーブとショットのピーク

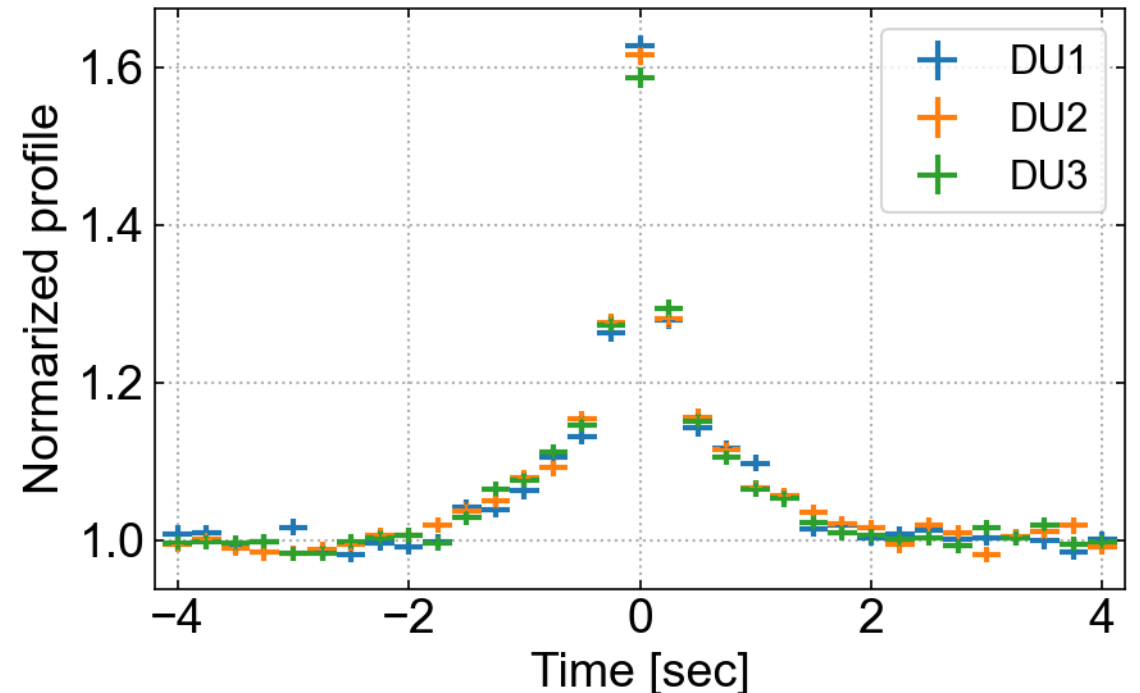


図11 2022年6月の観測のショットプロファイル

✓ ピークの~1 s前から増光が始まり、~1 sで暗くなる様子が確認できた。

▶ ショットのPhaseごとのスペクトル解析

- Model : 星間吸収×(黒体放射+コンプトン散乱)
- **1秒ごとに前後1秒の区間(2秒の移動平均)**でのスペクトルの硬度比 (4-8 keV/2-4 keV)

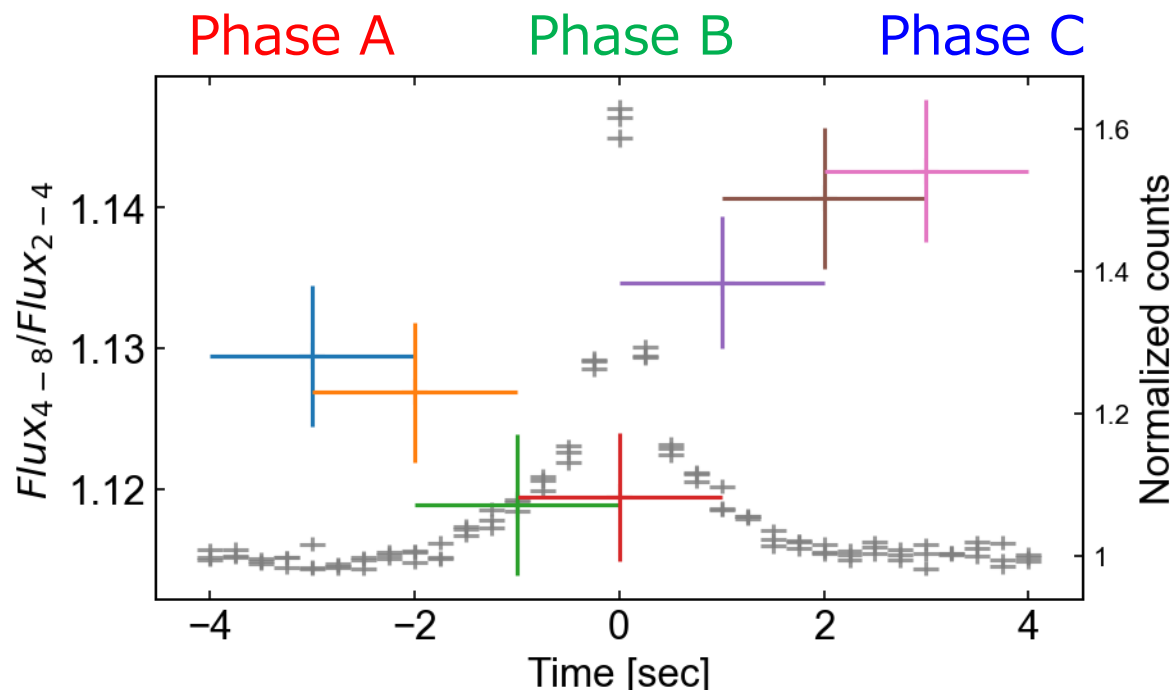


図12 ショットのPhase分割

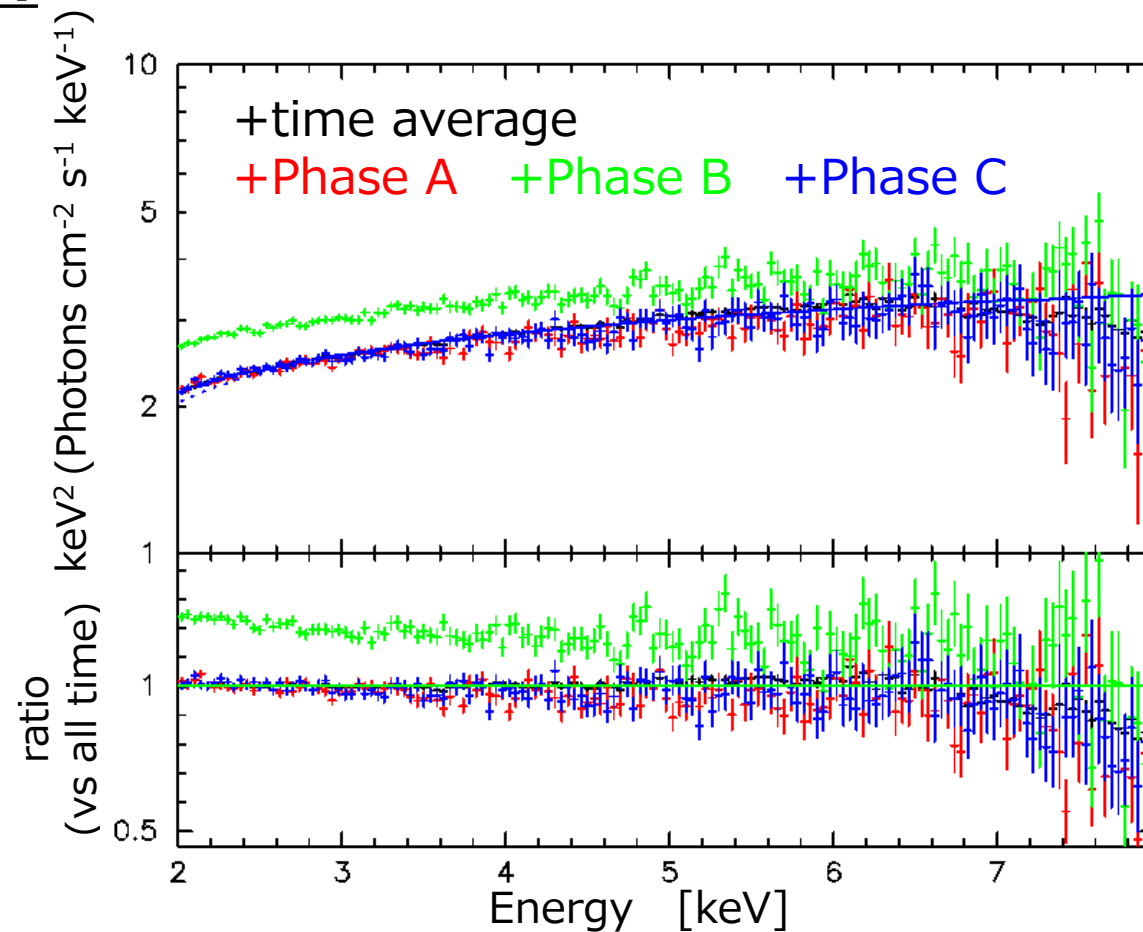


図13 ショットのPhaseごとのスペクトル

- ✓ ショットのピークに向けてソフトになり、ピーク後急激にハードになる。
- ✓ ブラックホール近傍の降着流の構造に変化があったことを示唆。

➤ 偏光解析方法

■ 方法1 : ixpeobssim/xpbinによる計算

- IXPEチームにより用意されたIXPE衛星による観測データの解析用ツール
- 各イベントのストークスパラメータの可算性を利用した偏光の算出

■ 方法2 : スペクトルフィットによる方法

- 星間吸収×**偏光**×(黒体放射+コンプトン散乱)

■ 方法3 : モジュレーションカーブ

- 光電子の方位角分布を三角関数でフィット

$$f(\phi) = N\{1 + A \cos[2(\phi - \phi_0)]\}$$

- 偏光度 Π 、偏光角 ϕ_{Π} の計算方法

$$\Pi = \frac{A}{A_{100}} = \frac{A}{\mu}, \quad \phi_{\Pi} = \phi_0$$

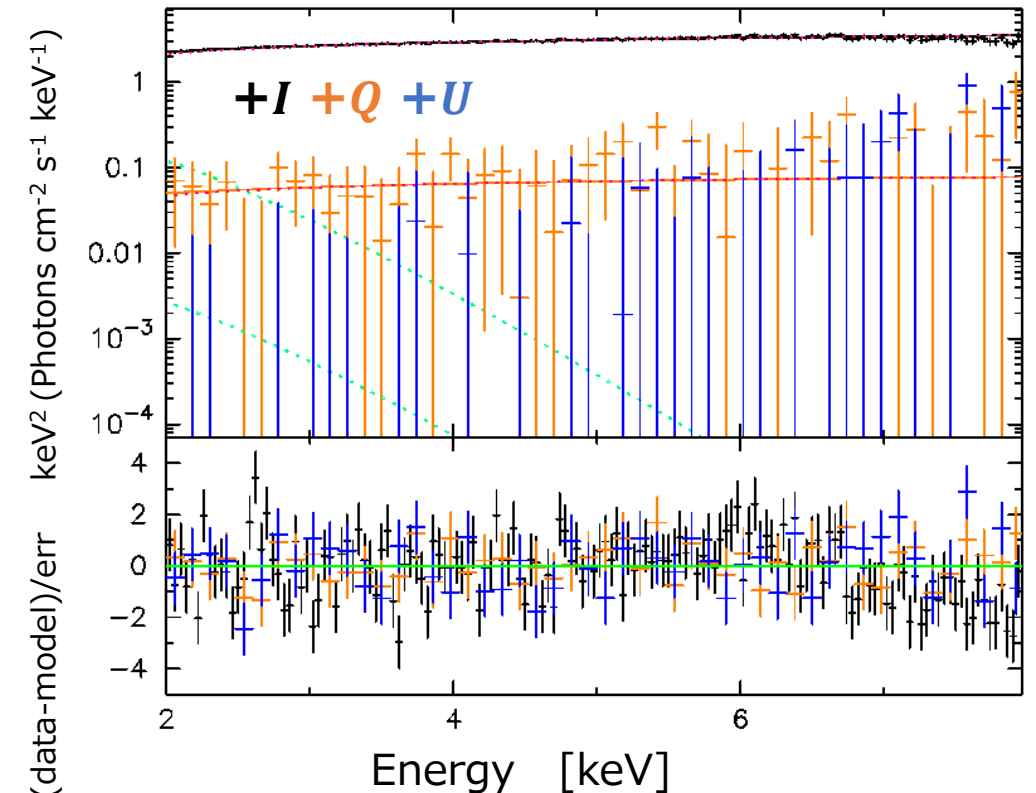


図14 2022年6月の観測のスペクトル

➤ 偏光解析方法

■ 方法1 : ixpeobssim/xpbinによる計算

- IXPEチームにより用意されたIXPE衛星による観測データの解析用ツール
- 各イベントのストークスパラメータの可算性を利用した偏光の算出

■ 方法2 : スペクトルフィットによる方法

- 星間吸収×**偏光**×(黒体放射+コンプトン散乱)

■ 方法3 : モジュレーションカーブ

- 光電子の方位角分布を三角関数でフィット

$$f(\phi) = N\{1 + A \cos[2(\phi - \phi_0)]\}$$

- 偏光度 Π 、偏光角 ϕ_{Π} の計算方法

$$\Pi = \frac{A}{A_{100}} = \frac{A}{\mu}, \quad \phi_{\Pi} = \phi_0$$

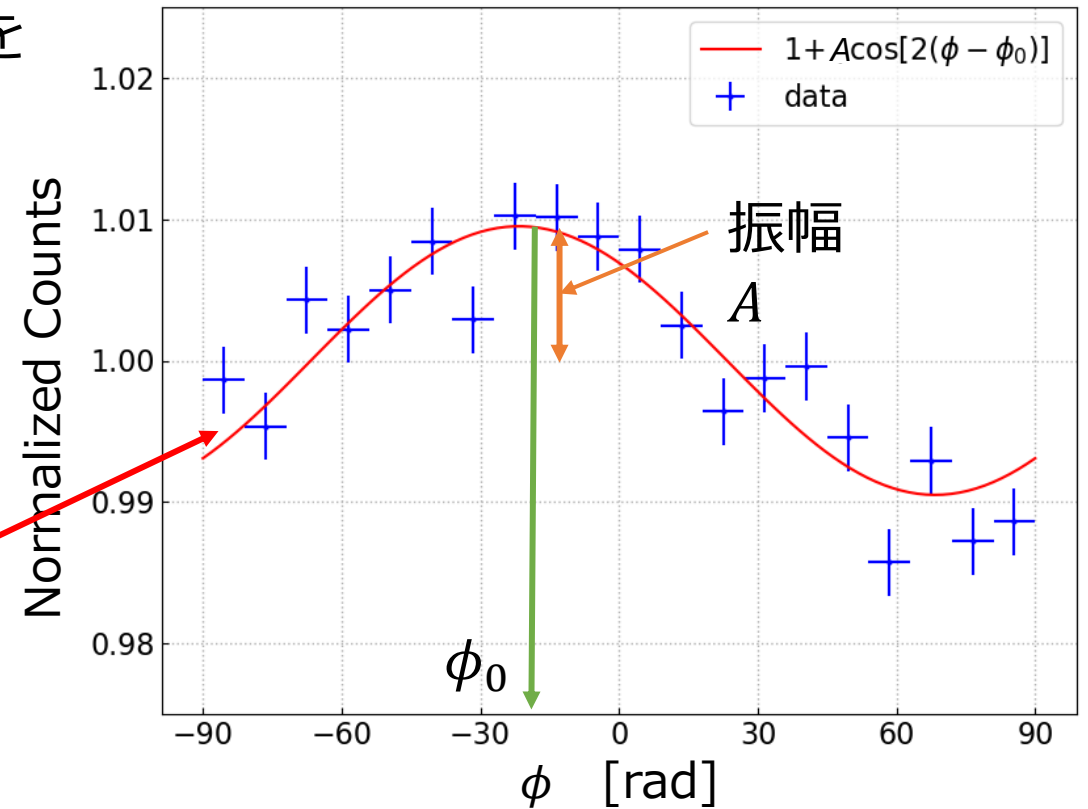


図15 2022年6月の観測のモジュレーションカーブ

➤ Cyg X-1 hard state のIXPEとNuSTARの観測データ

	Date	Exposure	State	Energy
IXPE	2022/6/18	86 ks	low/hard	2-8 keV
NuSTAR	2022/6/20	13 ks	low/hard	3-72 keV

- Cyg X-1 low/hard stateの観測についてIXPEとNuSTARの同時観測について、ショット解析を適用
- 重なった期間が約10 ksで、統計的に悪くなるが、
 - NuSTARによる高エネルギー帯が使える
 - NuSTARの方が有効面積大

✓ IXPEとNuSTARとの同時観測について、ショット解析を適用し、2-72 keVまでのショットによるスペクトルの変化を物理パラメータにより評価する。

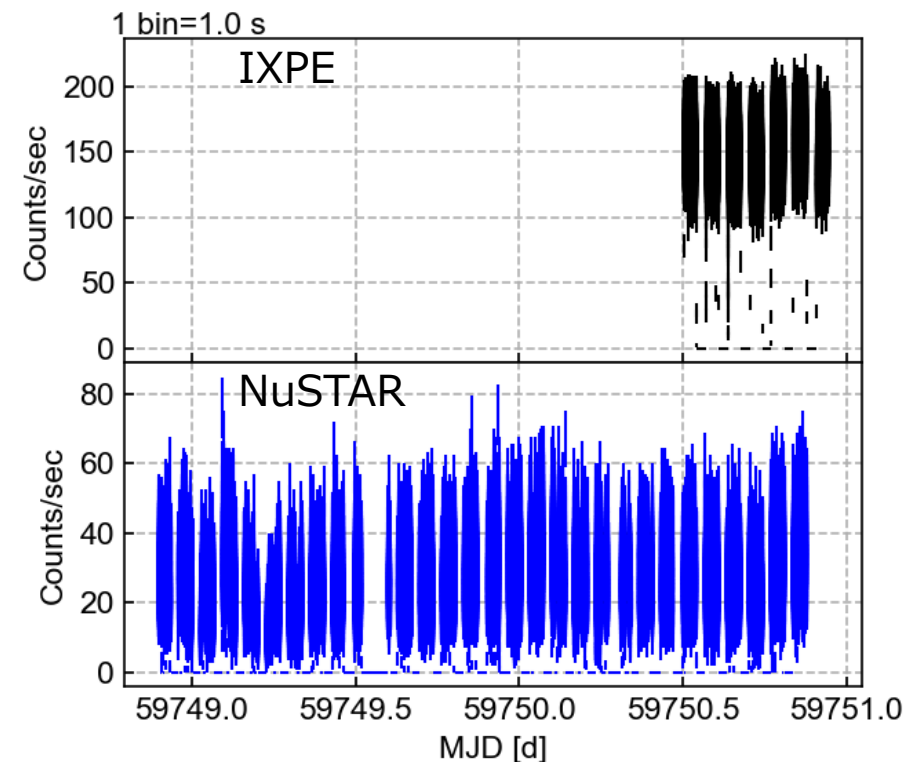


図17 IXPEとNuSTARのライトカーブ

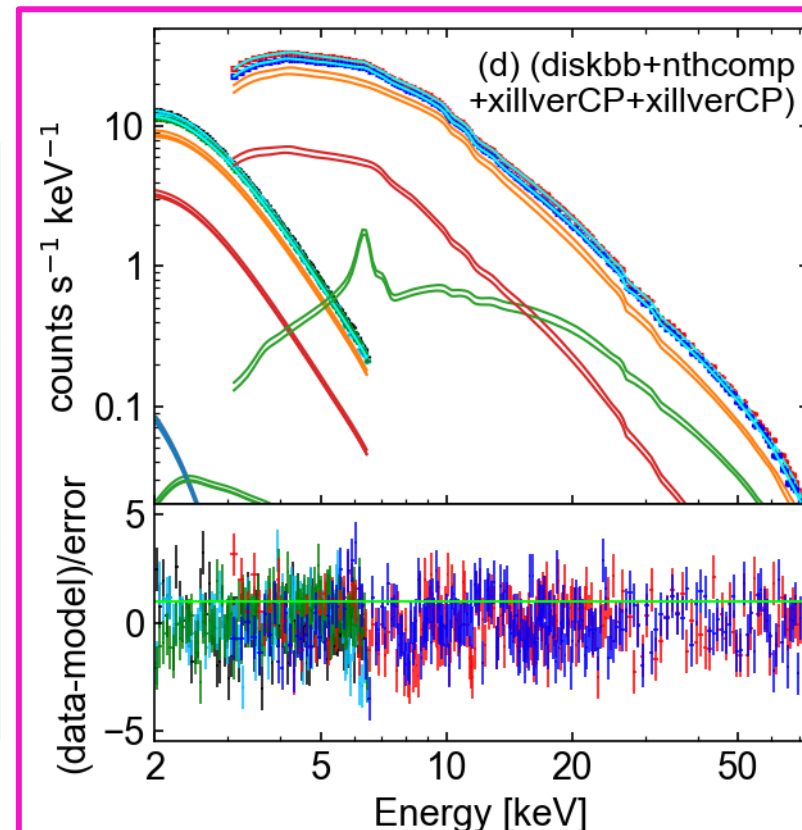
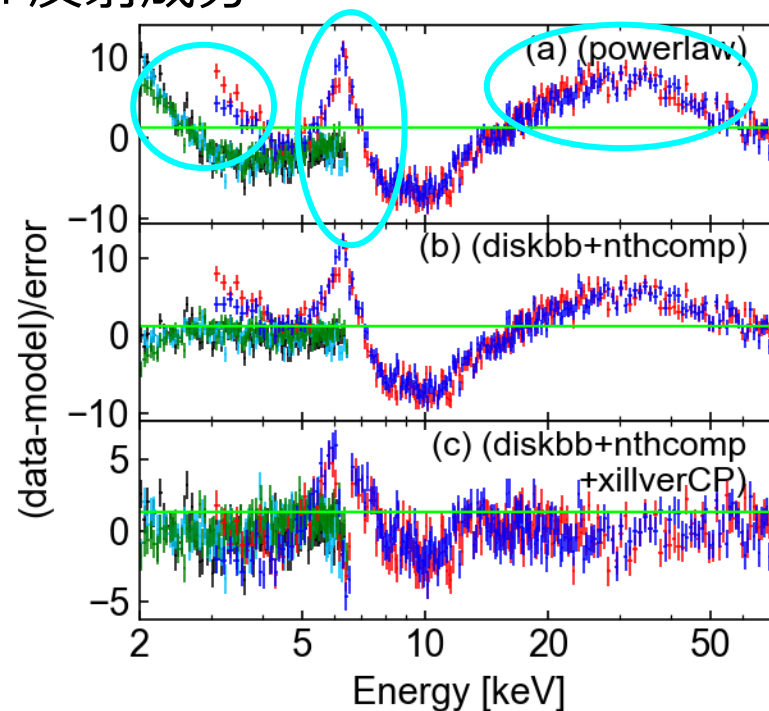
➤ IXPE (2-8 keV)とNuSTAR (3-72 keV)の同時観測による時間平均スペクトル

- (a) power-law (b) 降着円盤+コンプトン散乱
- (c) 降着円盤+コンプトン散乱+反射成分

- 2-4 keVは降着円盤由来
- 6-7 keVに鉄輝線
- 20-50 keVにCompton hump

- ベストフィットモデル
(降着円盤+コンプトン散乱
+反射成分1+反射成分2)

- $\Gamma \sim 1.7$ の典型的なlow/hard



- ✓ 反射成分2つ入れたモデルでよくあっている。
- ✓ 反射成分が1つよりも2つの方が良くデータを再現するが、 ~ 100 keV付近のスペクトルの折れ曲がりが見えていないので、これ以上議論はできない。

➤ NuSTAR観測でのショット解析

- IXPE帯域(3-8 keV)でのショットの判定によりショットの時間を元に、3-70 keV、10-20 keV、20-70 keVのプロファイルを作成。
- 各エネルギー帯のプロファイルと3-8 keVとの比をとる。

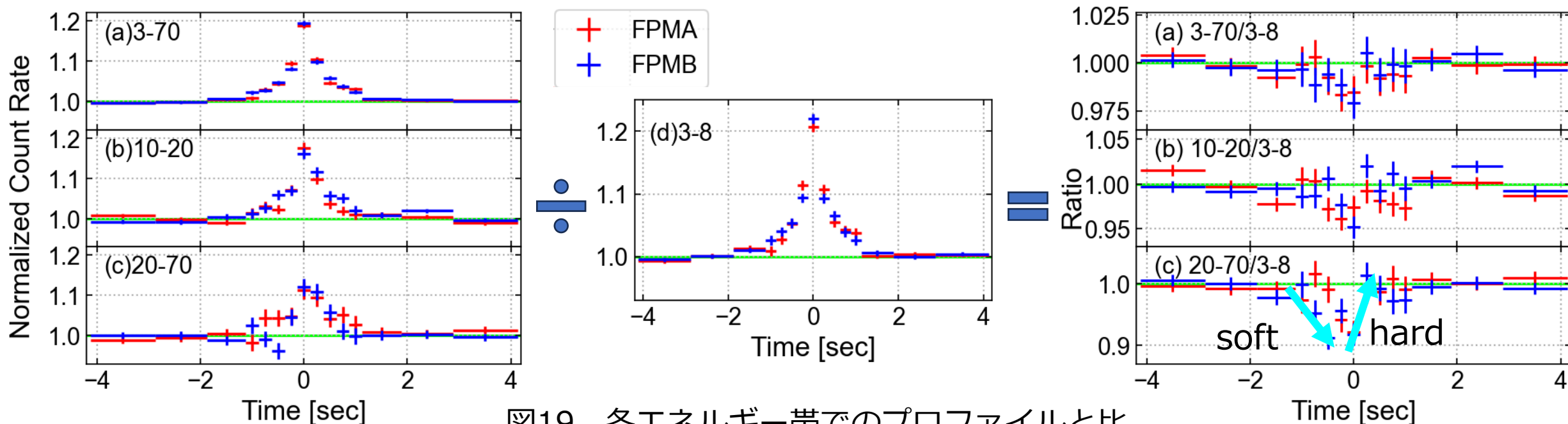
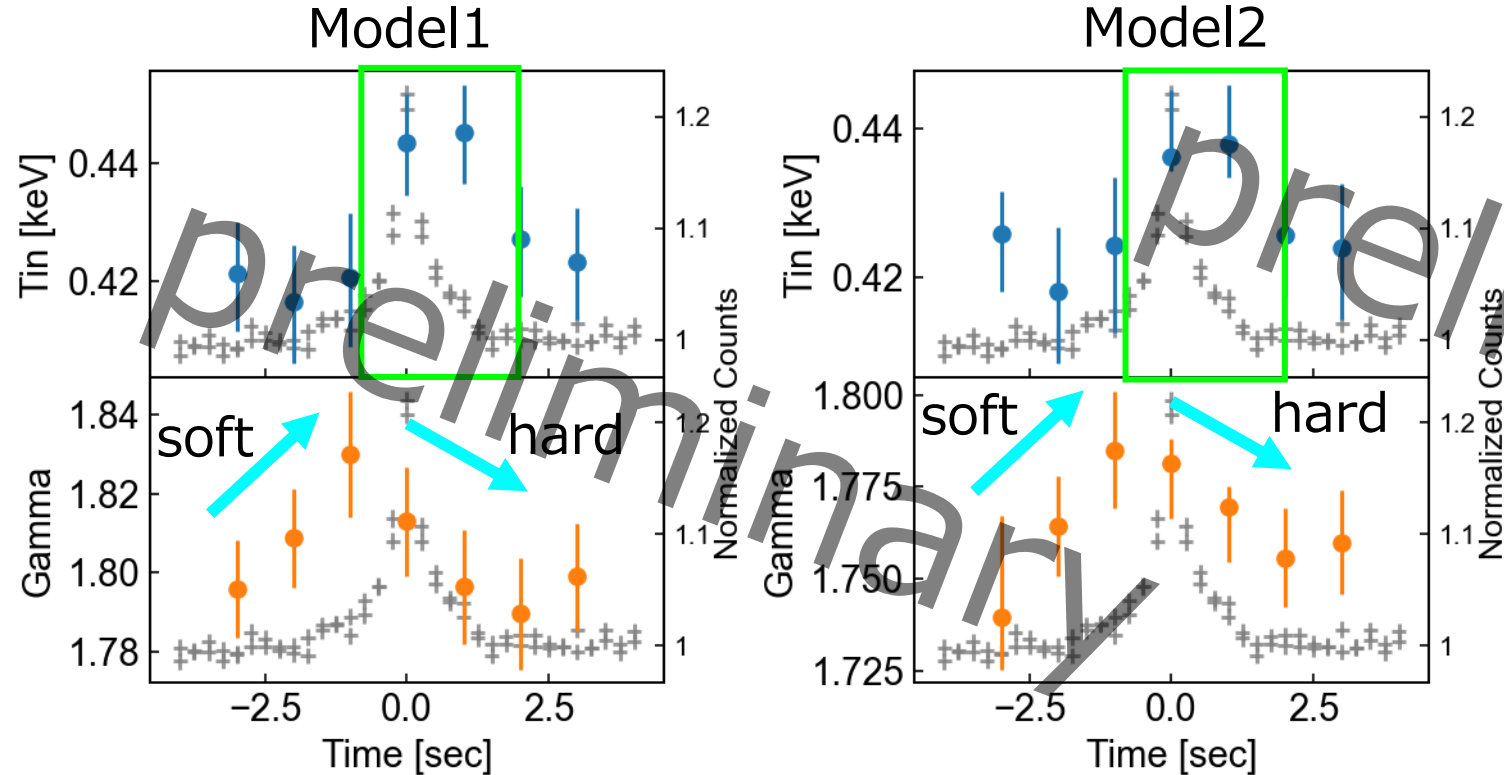


図19 各エネルギー帯でのプロファイルと比

- ✓ プロファイルの「振幅」にエネルギー依存ある。
- ✓ プロファイルの比はピークに向かってsoftになり、急激にhardに⇒スペクトルの変化に対応

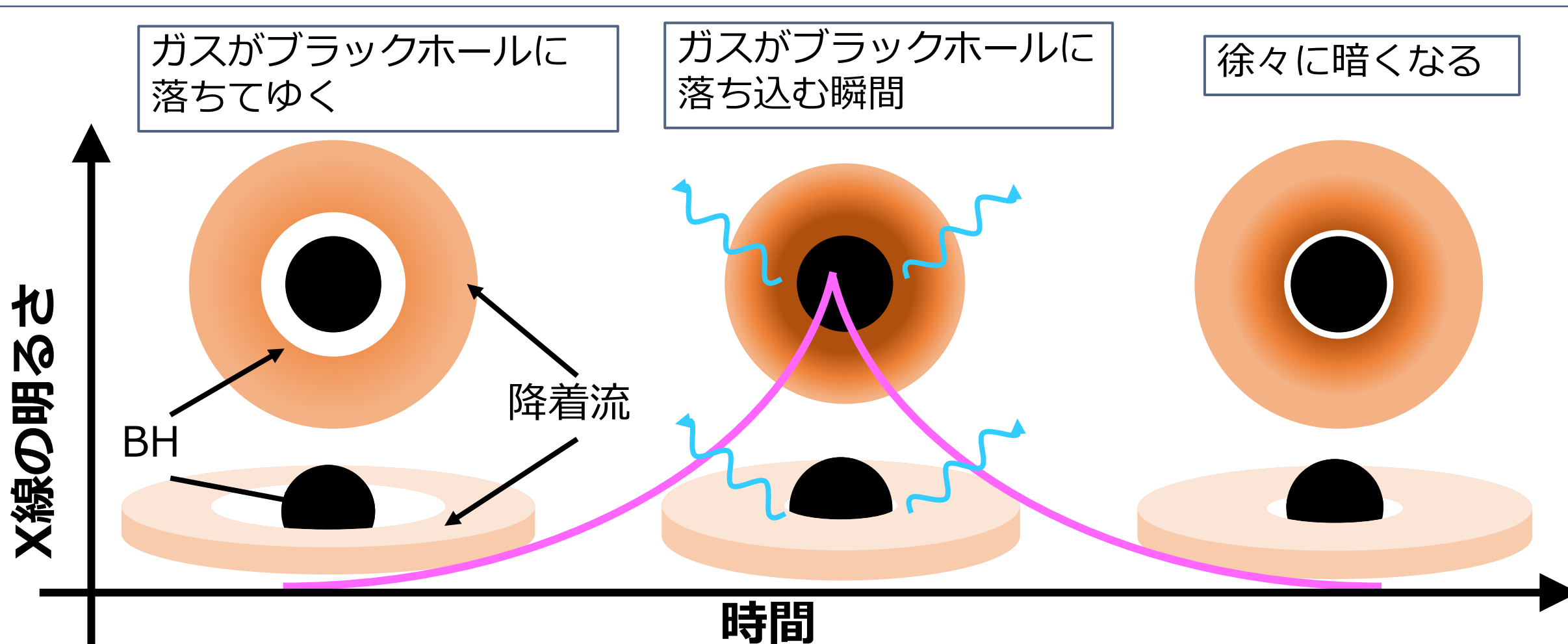
➤ スペクトルの物理パラメータの変化

Model 1: 降着円盤+逆コンプトン
+反射)

Model 2: 降着円盤+逆コンプトン
+反射(1)+反射(2)

• コンプトン成分、反射成分とも
にピークに向かって明るくなる
傾向が確認できた

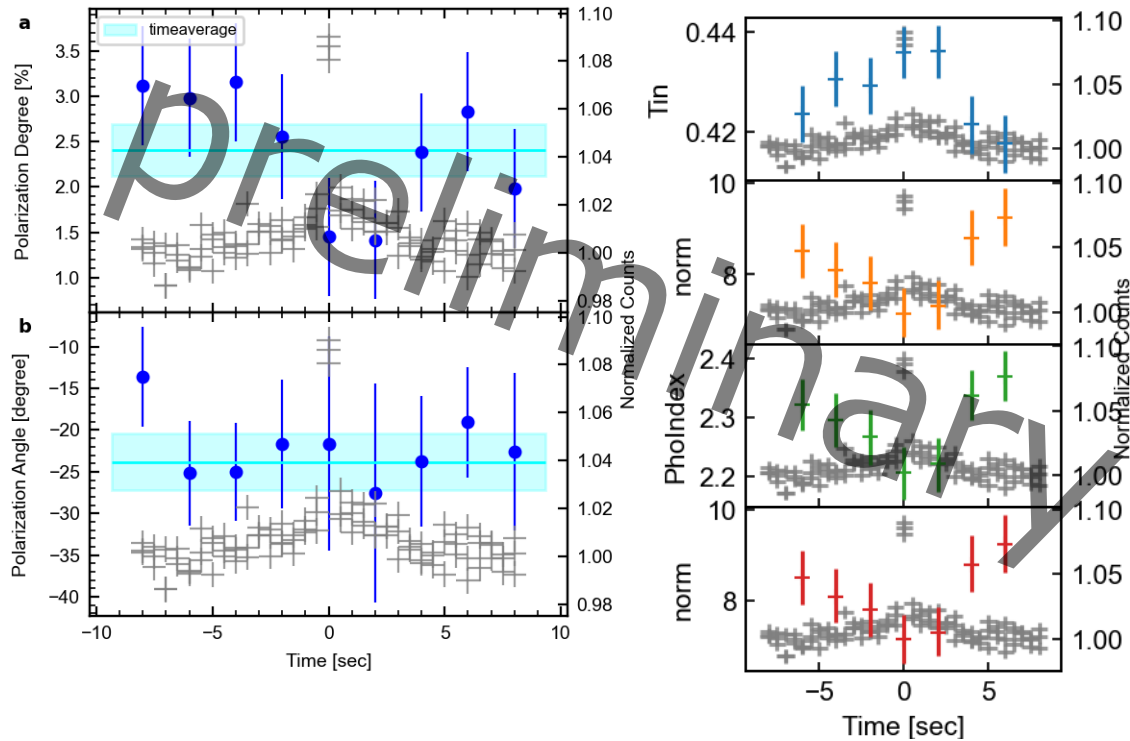
✓ 各Intervalで分けたスペクトルに関してはModel 1 とModel 2の縮退を解くほどのスペクトルの質は得られなかった。



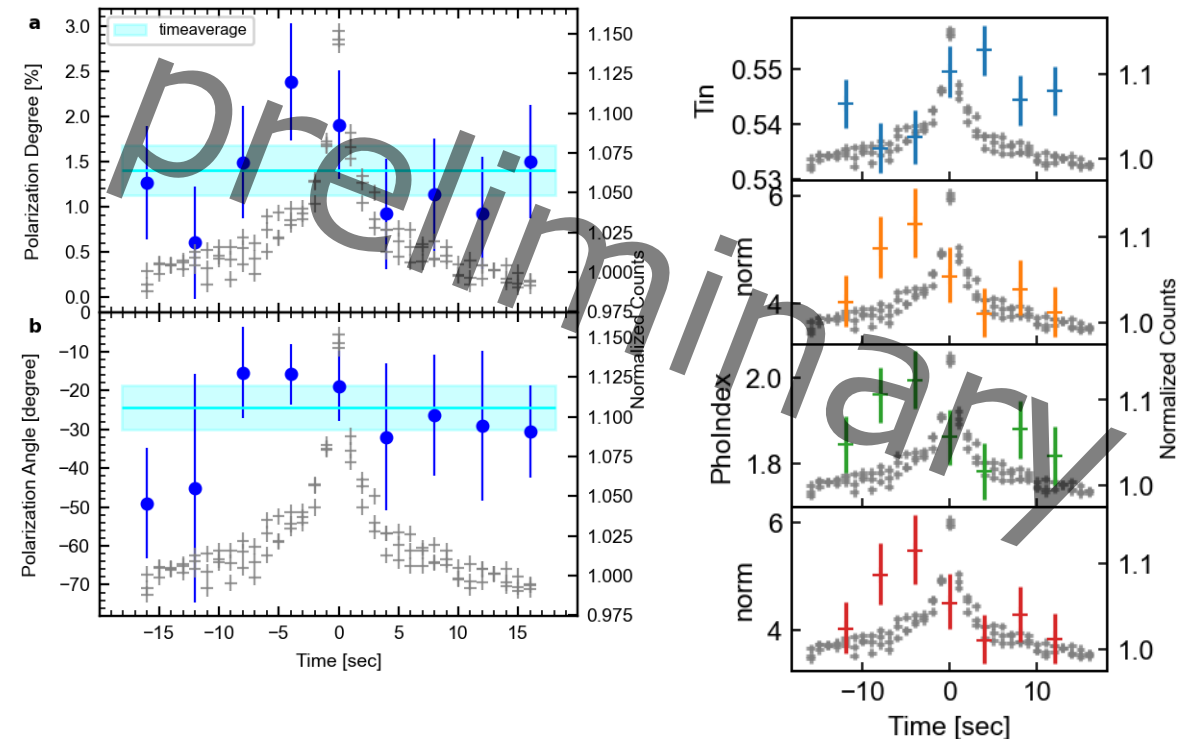
- ✓ 明るくなる瞬間 or そのすぐあとにブラックホール近傍から無偏光な成分の放射
- ✓ 偏光角が変化していることから、散乱のされ方が変わった？
- ✓ 降着流のダイナミックな構造変化が関わっていることを示唆している。

➤ IXPEを利用したショット解析をCyg X-1 high/soft stateに適用

- ショットの判定閾値・ライトカーブをさまざまためし、偏光が変動してる条件を選定



- ✓ 降着円盤 T_{in} が増加した時間に偏光度が下がる傾向がある



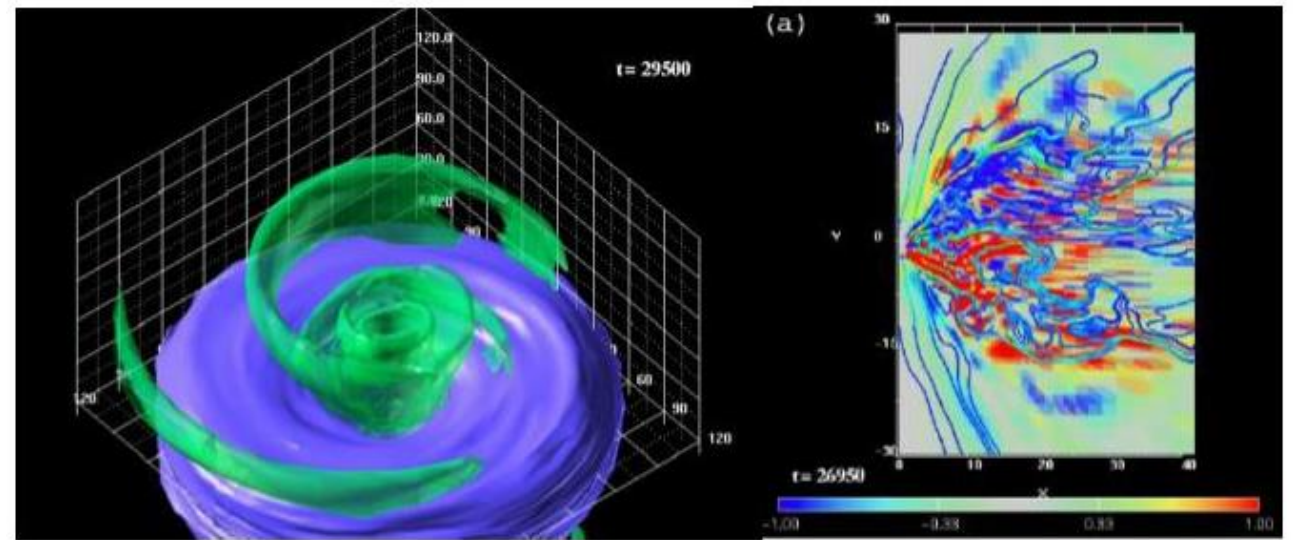
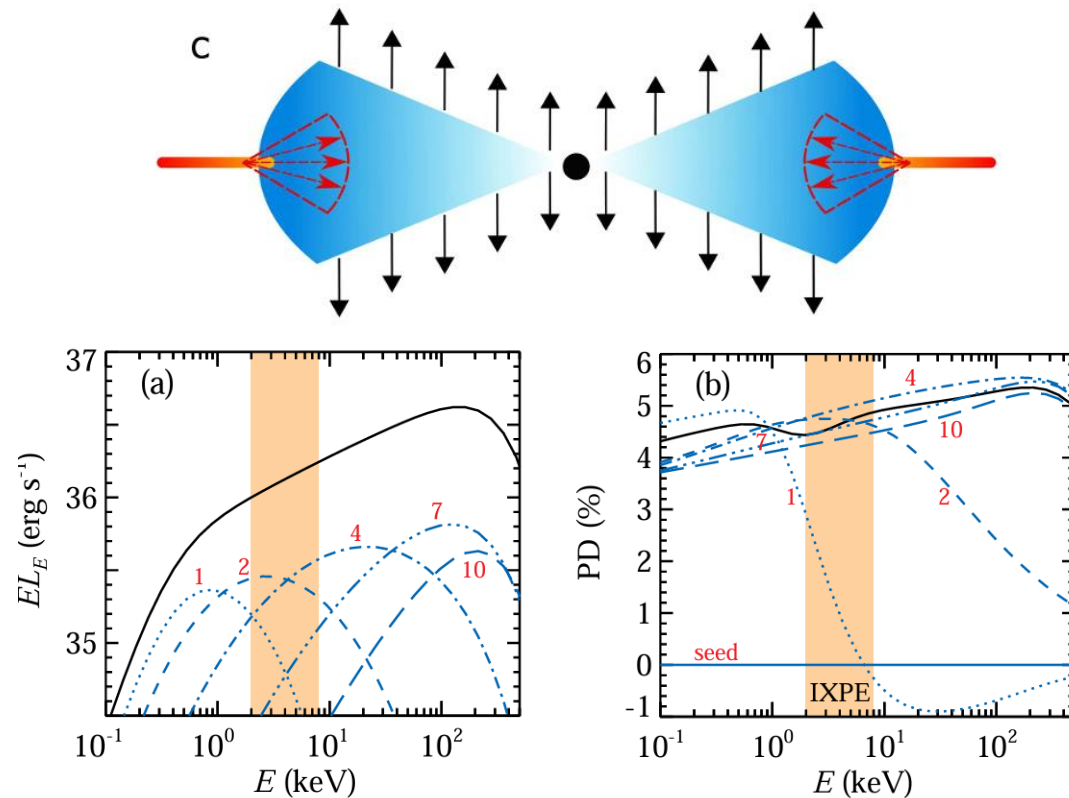
- ✓ 4-8 keVのフラックス、powelawのパワメータなど高エネ側(4-8 keV)の変化が起きている時間と、偏光度が上がる時間帯が同じ

目的：数秒スケールの明るさの変動における偏光の短時間変動を追う

- IXPEによるCyg X-1のlow/hard、high/softの観測に対して「ショット解析」を適用した。
- low/hard stateの観測に対してはNuSTARとの同時観測に対してショット解析を施した。

Blank

- ~ 1 sのタイムスケールの強度変動から、コロナ・降着円盤の構造変化のタイムスケールとの関係を見出し、構造に対して制約を与えたい。
- 理論との比較により、降着流の構造変化を明らかにする。
- AGNやブレイザー、LMXBなど系の大きさによる偏光の変動のタイムスケールの違いがあるかを調べる。



Isosurface of $v_z = 0.05c$ Magnetic field lines and azimuthal magnetic field

アウトフローの噴出領域のシミュレーション
(Machida and Matsumoto 2008)