

食を持つ低質量中性子星連星系 AX J1745.6-2901 から XRISM により発見された狭い鉄K吸収線とその 解釈について

前田良知 (JAXA 宇宙科学研究所)

Narrow iron- and nickel-K absorption lines from the eclipsing low-mass X-ray binary AX J1745.6–2901

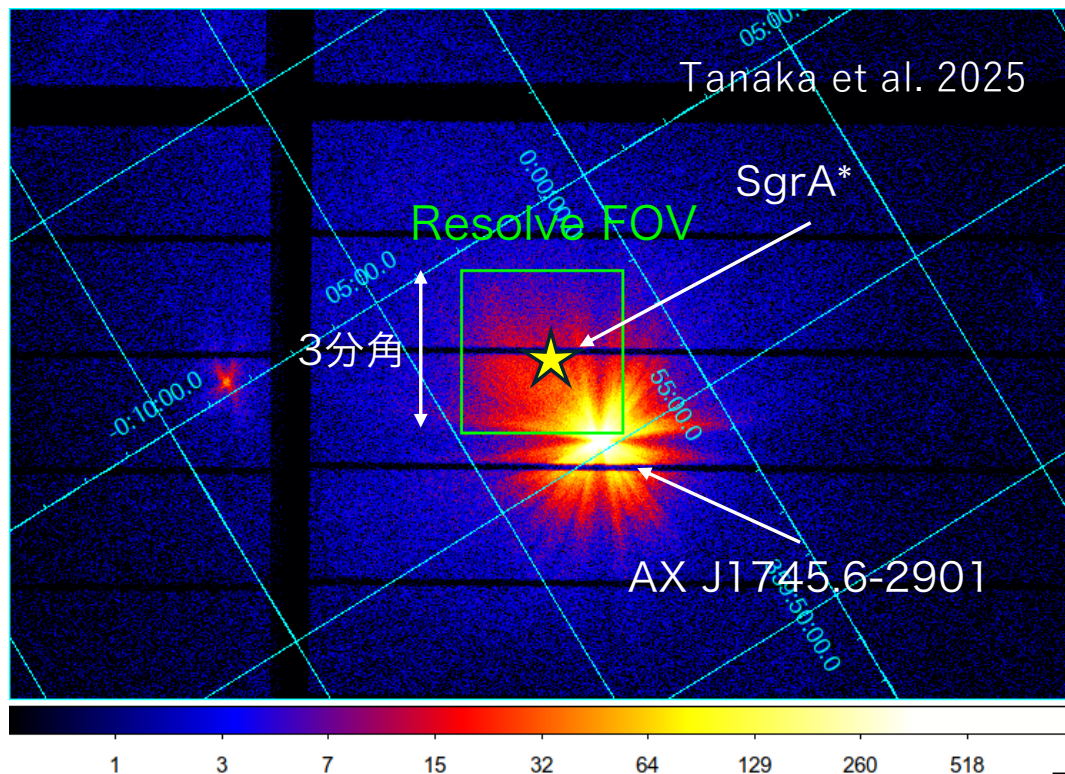
Kojiro Tanaka¹, Yoshitomo Maeda², Ryota Tomaru³, Lia Corrales⁴, María Díaz Trigo⁵, Chris Done⁶, Tadayasu Dotani², Manabu Ishida², Satoru Katsuda⁷, Yoshiaki Kanamaru², Richard Kelley⁸, Aya Kubota⁹, Hironori Matsumoto³, Masayoshi Nobukawa¹⁰, Megumi Shidatsu¹¹, Randall Smith¹², Hiromasa Suzuki^{2,*}, Hiromitsu Takahashi¹³, Yohko Tsuboi¹⁴, Hideki Uchiyama¹⁵, Shigeo Yamauchi¹⁶, Anje Yoshimoto¹⁶, Q. Daniel Wang¹⁷, Jon M. Miller⁴, Frederick S. Porter⁸ and Shinya Yamada¹⁸

PASJ submitted

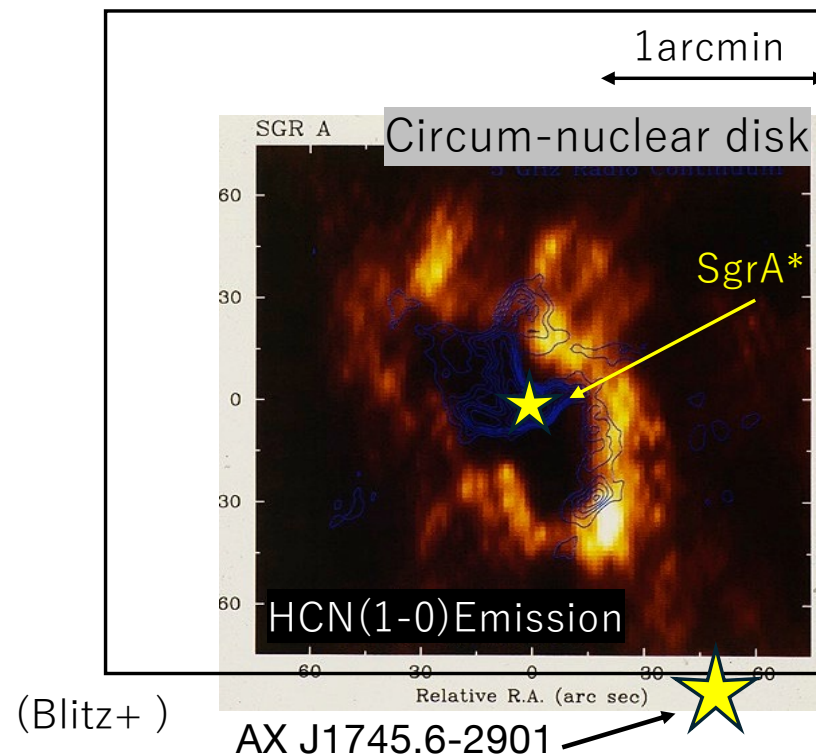
田中虎次郎 修士論文(2025)

Introduction - AX J1745.6-2901 -

All band image with Xtend



Resolve FOV



- Sgr A*から1.5 分角離れた場所に位置する低質量X線連星 (Maeda et al. 1996/Kennea & Skinner 1996)

→XRISM : Sgr A East の測定中の Serendipitous source

Introduction - AX J1745.6-2901 -

Maeda et al. 1996

Maeda et al. 1996

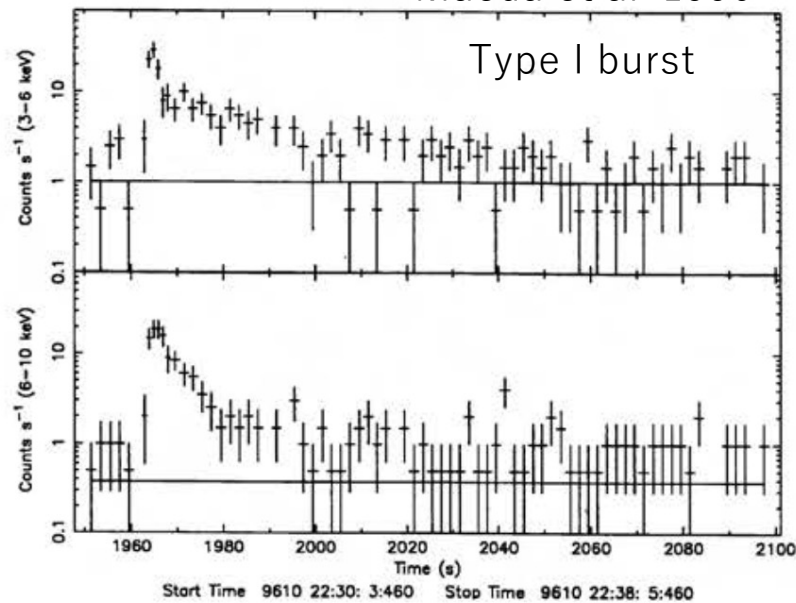


Fig. 2. X-ray light curve of AX J1745.6-2901 during the X-ray burst (GIS) in two different energy bands. The solid line is the averaged flux of the persistent X-ray during the eclipse.

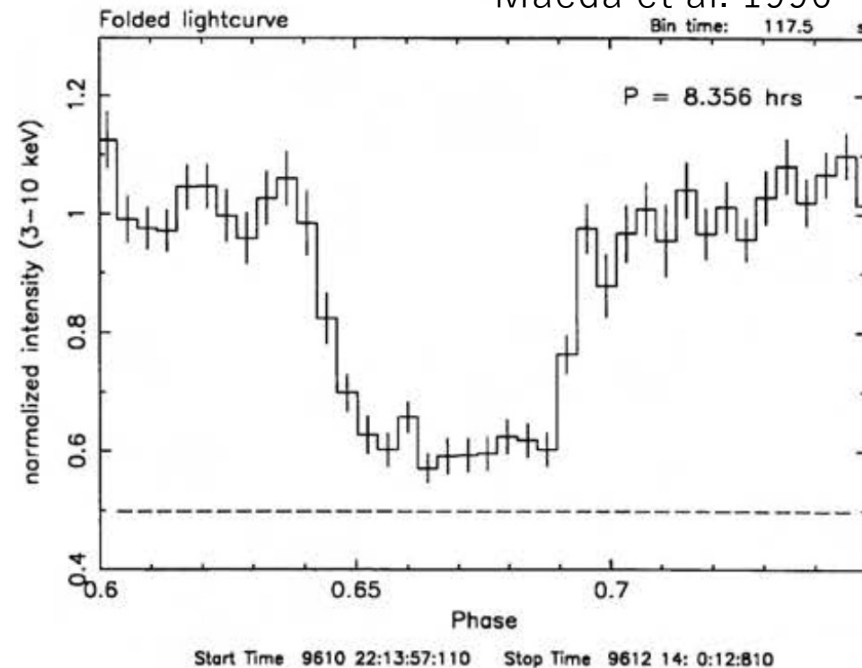


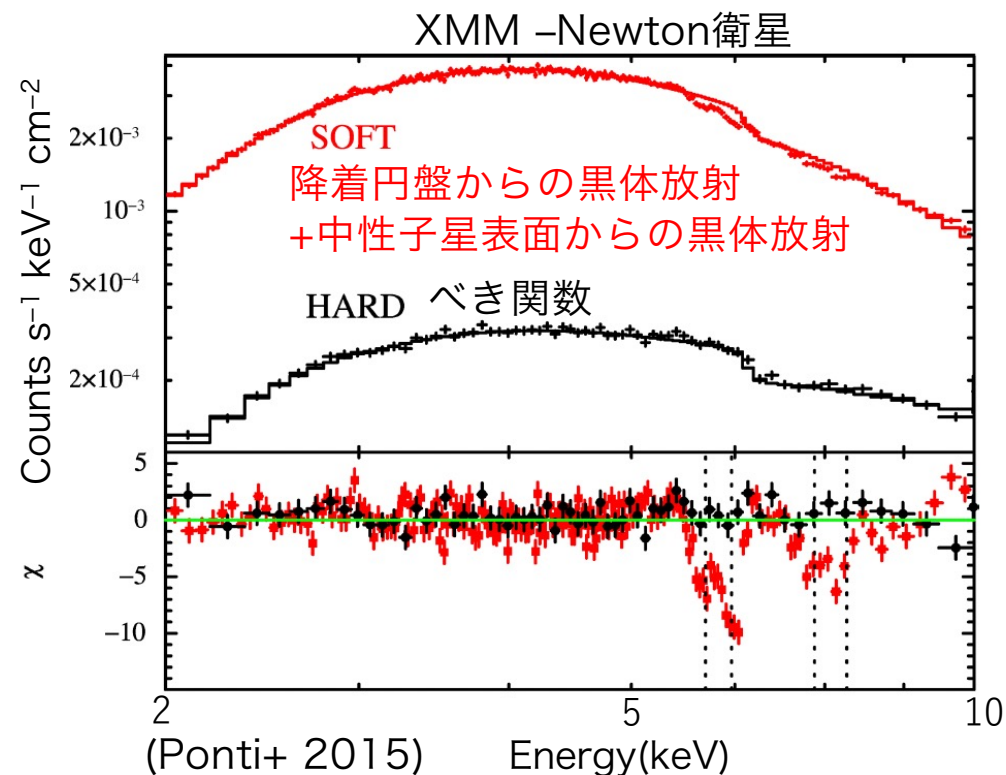
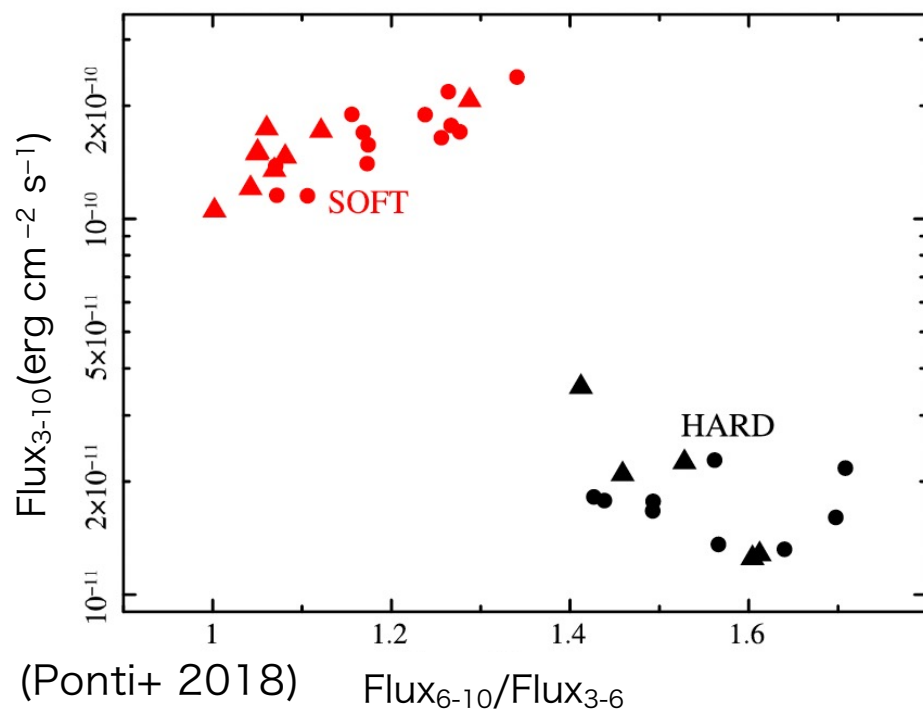
Fig. 3. Folded light curve (3-10 keV) in the AO2 data, with the phase 0 epoch of MJD 49610.0. The folded period is 8.356 hr. The dotted line is the background level.

- Type I X-ray burst : 弱磁場中性子星連星系
- 軌道周期 8.4 hr, 食率 ~5%. (Companion ~1Mo, Inc. angle ~ 70deg.)

$$V \sin i \sim 151 \text{ km/s}$$

→XRISM : 高傾斜角の最初のサンプルの1つ

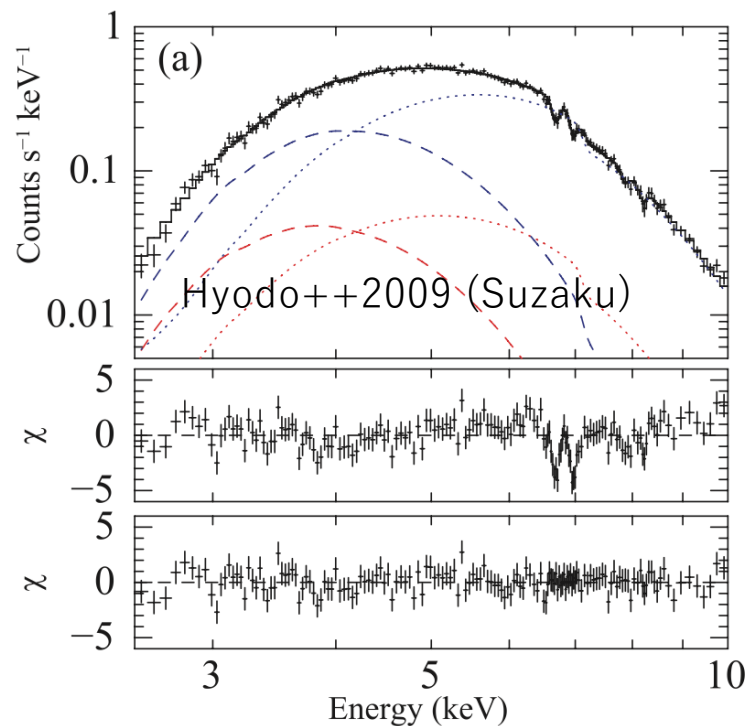
Introduction - AX J1745.6–2901 -



- High/Soft stateとLow/Hard stateの二つの状態に分かれる（標準円盤）
- High/Soft stateでは大きな高電離の鉄吸収線が見られる。(log $\xi \sim 4$, Trueba et al. 2022など)

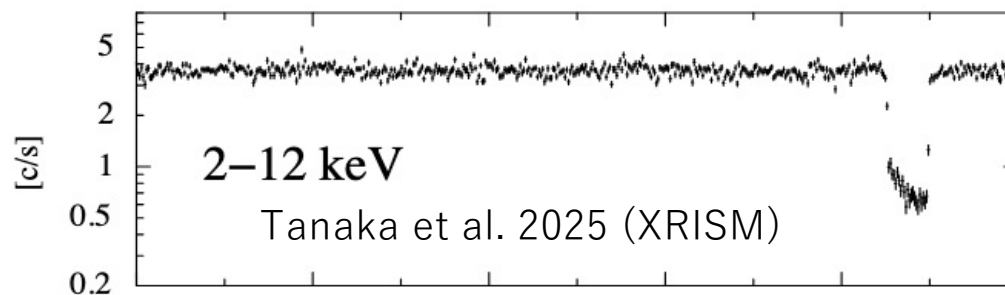
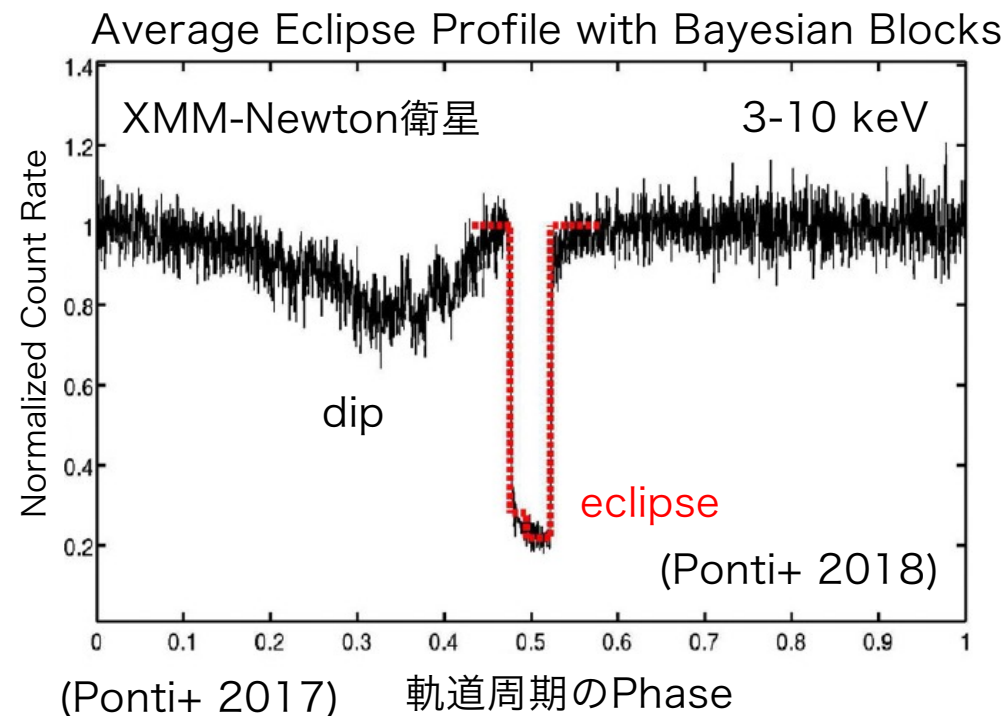
→XRISM : Soft/High state での観測

Introduction - AX J1745.6–2901 -



- Dip を示すことがある。

→XRISM : Dip なし。



研究のきっかけ

Sgr A East の観測中に、Resolve 検出器の視野の端に検出できた。← 積分時間等は AX J1745.6 に最適化されていない。

研究の目的

光電離プラズマ吸収体の物理量の測定

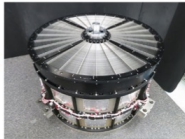
- 高傾斜角の数少ないサンプルの 1 つ。
 - Soft/high state 標準円盤 (光度 10^{37} ergs/s)
 - Dip なし
- } XRISM 初期観測の中でユニークな位置付け

銀河中心天体の特徴

- 距離は 8kpc 程度
 - 大きな星間吸収を受ける。低電離鉄吸収端／ダスト散乱もスペクトルに現れる。
 - X線域のみで観測可能。固有運動がわからない。
 - 広がった銀河中心X線バックグラウンドの寄与が大きい。
- } データ解析がややこしい。

XRISM衛星 (2023/9/7打上げ)

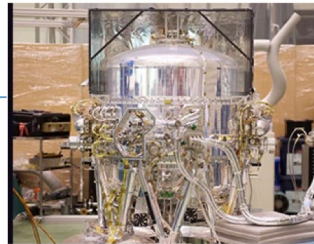
X-ray Mirror Assembly (XMA)



Xtend-Soft X-ray Imager



Resolve-Soft X-ray Spectrometer



[XRISM Quick Reference]

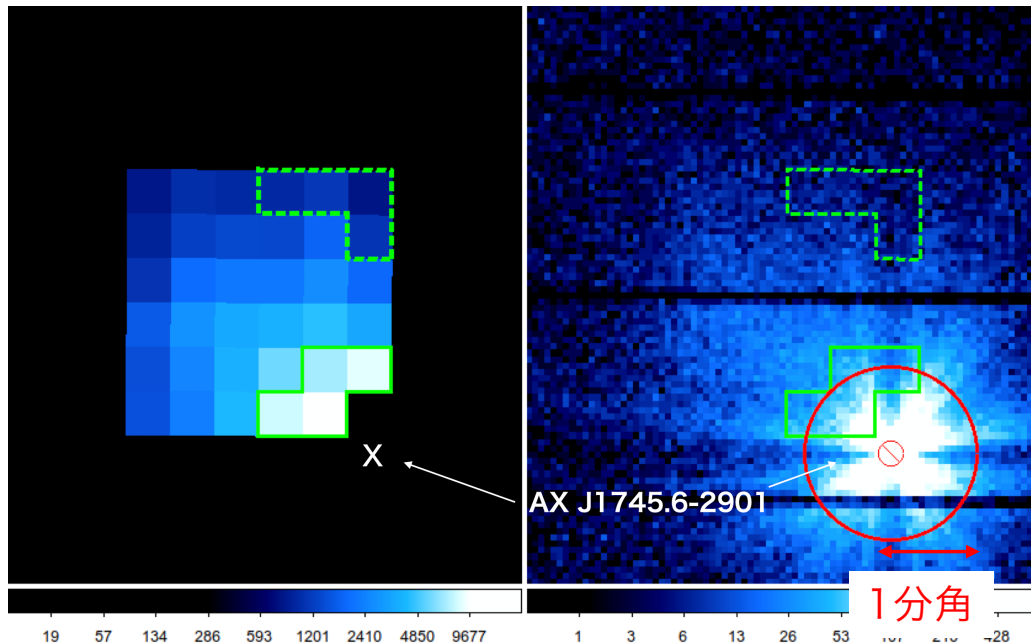
	Resolve	Xtend
検出器	マイクロカロリメータ	X線CCDカメラ
視野 [arcmin ²]	2.9x2.9	38.7x38.7
エネルギー範囲	1.7-12 keV	0.4-13 keV
エネルギー分解能	4.3 eV @ 6keV	250 eV @ 6keV

観測ログ(銀河中心領域)

Obs. ID number	ra (deg)	dec (deg)	Observation start (UT)	Exposure (sec)
300044010	266.42	-28.99	2024-02-26 00:41 19:34	189600

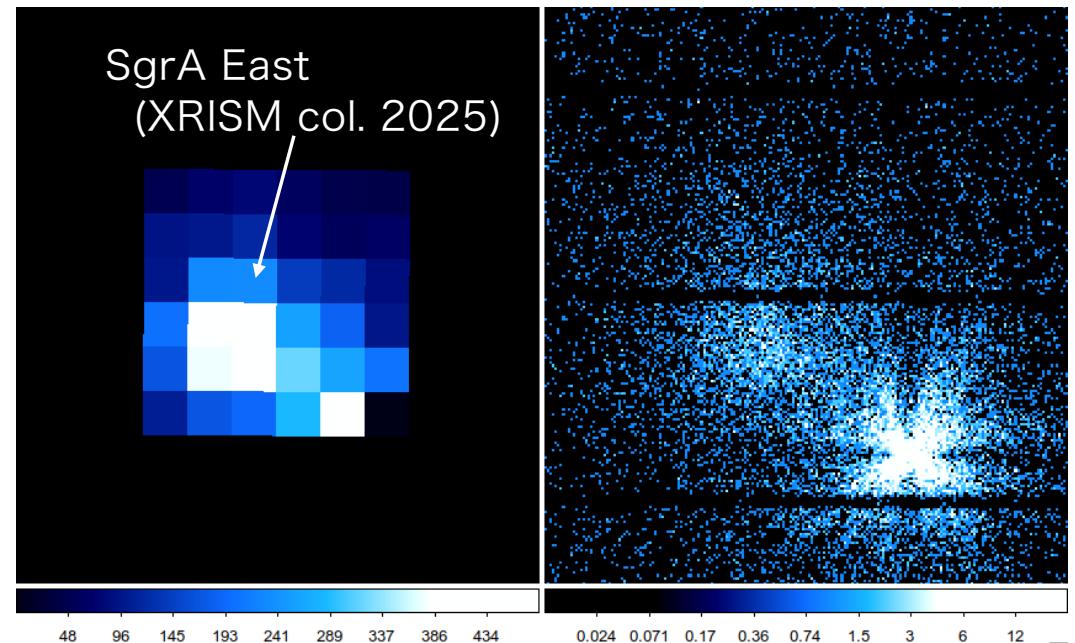
X線イメージとスペクトル

Resolve 2-10 keV Xtend



鉄輝線を含むエネルギーバンド

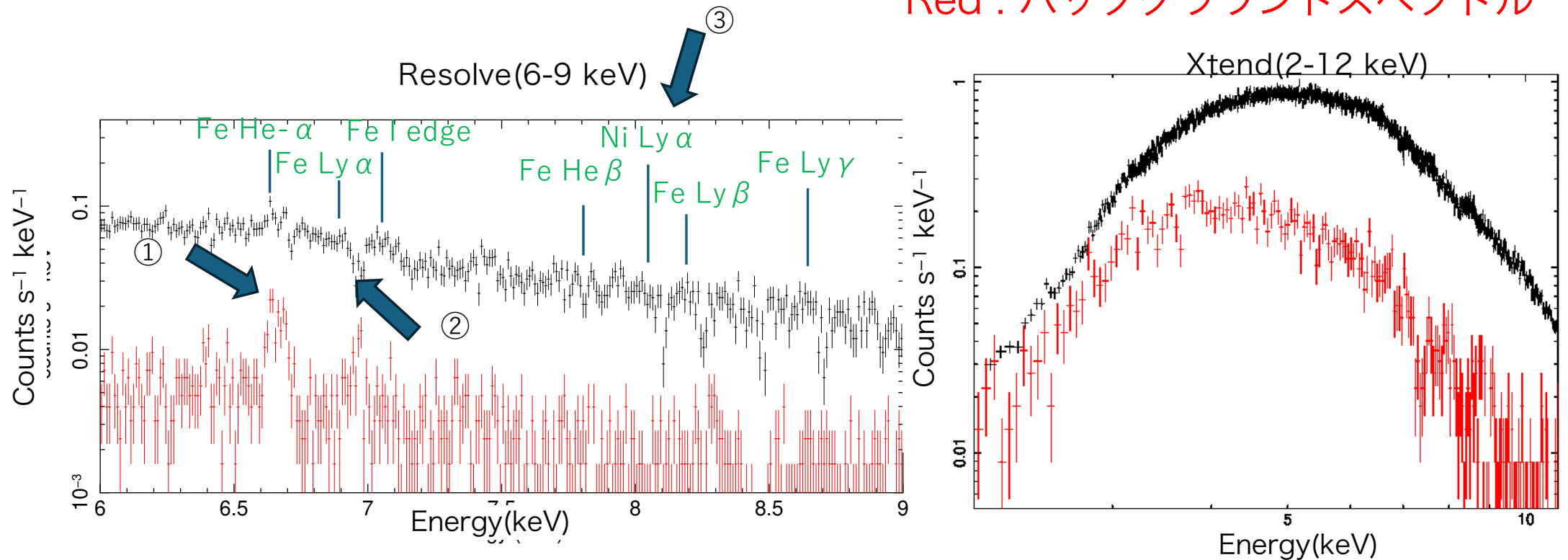
Resolve 6.60-6.72 keV Xtend



- 目標天体の積分領域
Resolveは目標天体付近の4ピクセル, Xtendは半径1分角の領域を用いてスペクトルを作成
- バックグラウンドの積分領域
Resolveは端の4ピクセル, Xtendは半径1分角の領域で食の期間をバックグラウンドとする。

X線イメージとスペクトル

Black : 目標天体のスペクトル
Red : バックグラウンドスペクトル



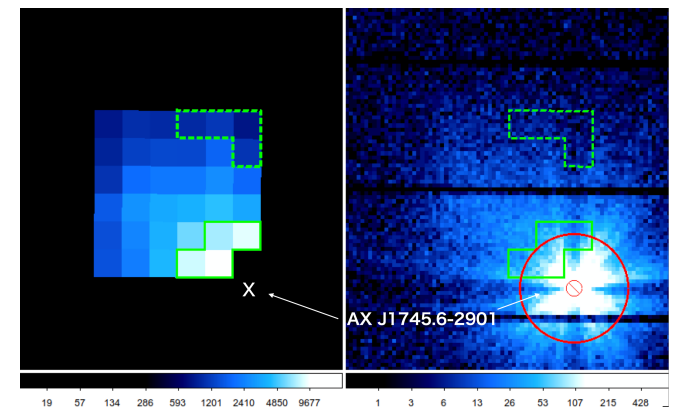
- ① Fe He-like は生スペクトルでは輝線として見えるが、バックグラウンドを引くと吸収端になる。
→ He-like の解析はXtendに委ねる。
- ② H-like が一番深い吸収線。→ 電離が進んでいる。
- ③ Fe の 1/40 しかない Ni の輝線がはっきり見える。→ 吸収体は厚い。

XRISMの2つの検出器の役割分担

1. Xtend: Broad band + robust background subtraction

- 光度 L_x
 - 連続X線温度 (Blackbody + diskBB)
 - Fe-He-like / H-like 比
- 電離パラメーター ξ の導出。

吸収体の位置を教えてくれる。



2. Resolve : Line spectroscopy

- 吸収体の視線速度と速度分散の測定

吸収体の運動を教えてくれる。

Xtend - 電離度と厚さの測定 -

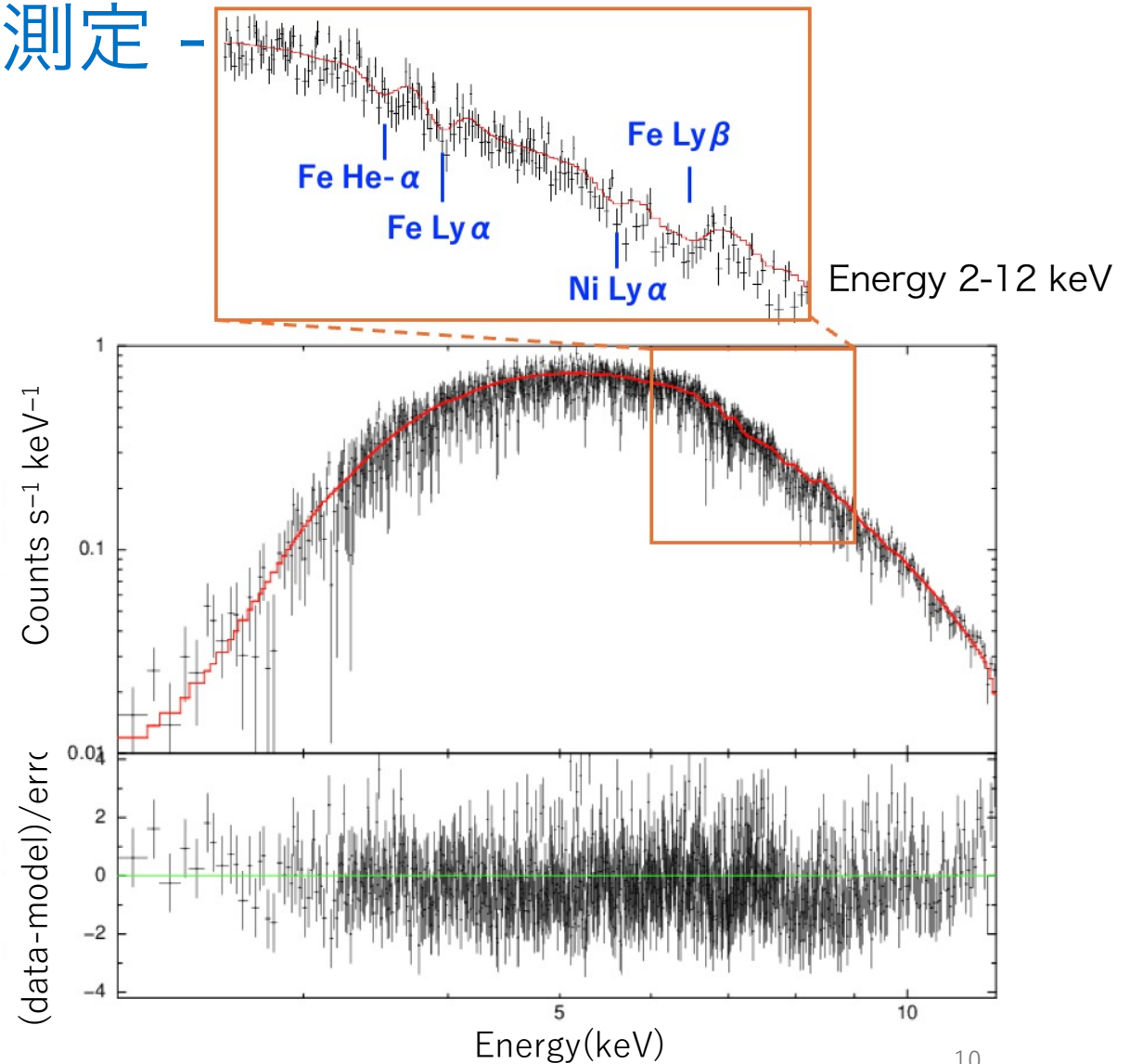
Model

- 降着円盤からの黒体放射
- 中性子星表面からの黒体放射
- 星間物質による吸収
- 星間ダストによる散乱
- 光電離プラズマによる吸収 (Pionモデル)

連続成分

吸収体の

電離パラメータ ξ ($\propto n_{\text{H-like}}/n_{\text{He-like}}$)
厚さ N_{H}



Xtend - 電離度と厚さの測定 -

Xtendのスペクトルフィットより

電離度 $\log \xi = 4.4^{+0.2}_{-0.2}$ [erg cm s⁻¹]

厚さ $N_H = 1.5^{+1.3}_{-0.7} \times 10^{24}$ [cm⁻²]

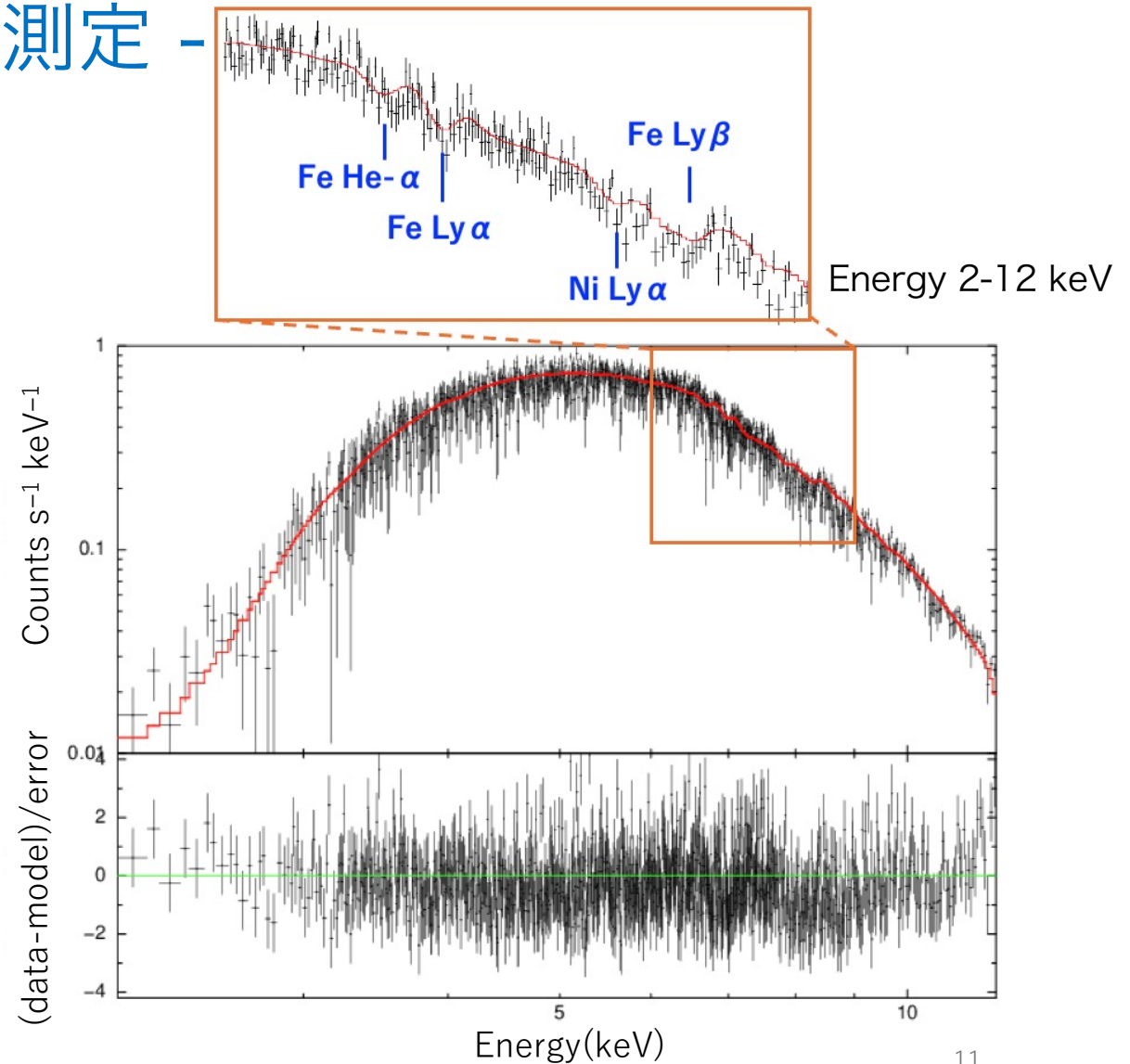
$\chi^2/\text{d.o.f} \cdots 1209/998$

観測されたFlux (3-6 keV)

7×10^{-11} [erg cm⁻² s⁻¹]

Flux(6-10 keV)/Flux(3-6 keV) = 1.35

→ **soft state**



Resolve - 視線速度と速度分散の測定 -

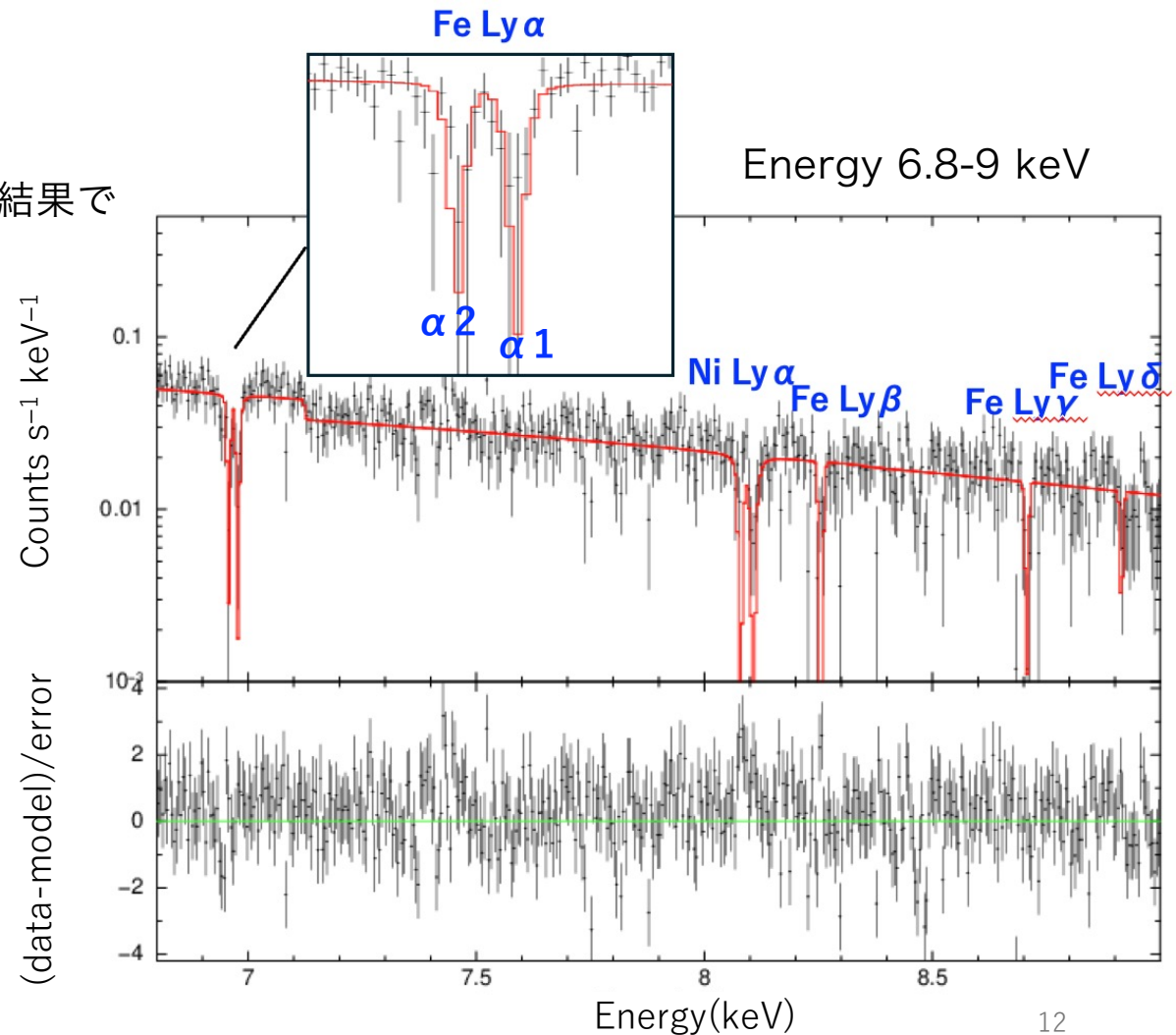
Model

- 降着円盤からの黒体放射
- 中性子星表面からの黒体放射
- 星間物質による吸収
- 光電離プラズマによる吸収 (ionabsモデル)

青方偏移 [km s^{-1}]
速度分散 [km s^{-1}]

吸収線はFe XXVI, Ni XXVIII
を入れてフィット

Xtendの結果で
固定



Resolve - 視線速度と速度分散の測定 -

Resolveのスペクトルフィットより

青方偏移 : 190^{+40}_{-80} [km s⁻¹]

→円盤風の吹き出し速度

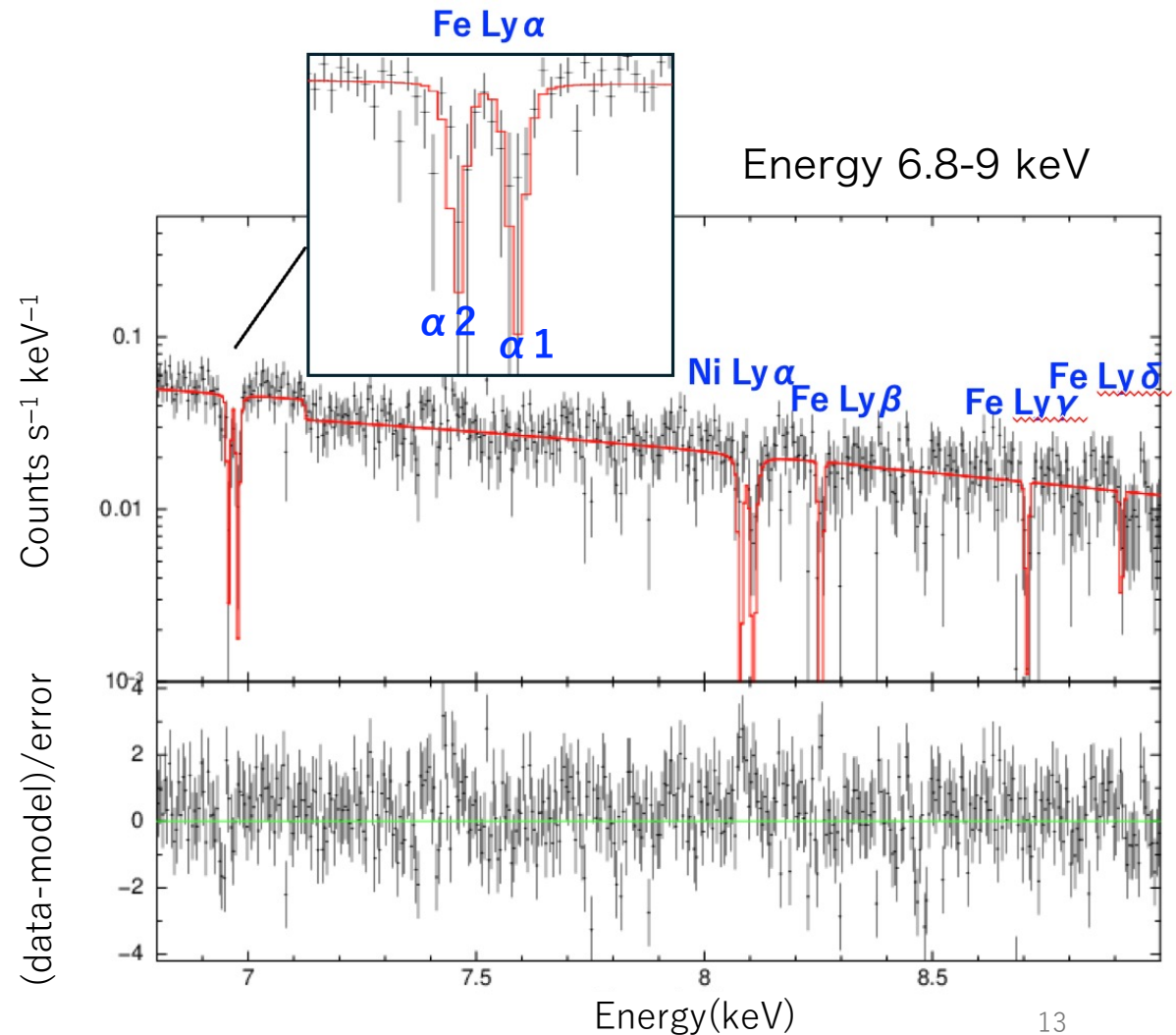
速度分散 : 90^{+50}_{-20} [km s⁻¹]

→粒子の熱運動

乱流運動

中性子星のケプラー運動

$\chi^2/\text{d.o.f}$... 4746/4399



議論1 - 吸収体の位置 -

電離パラメータ: $\xi \approx \frac{L_X}{N_H R}$

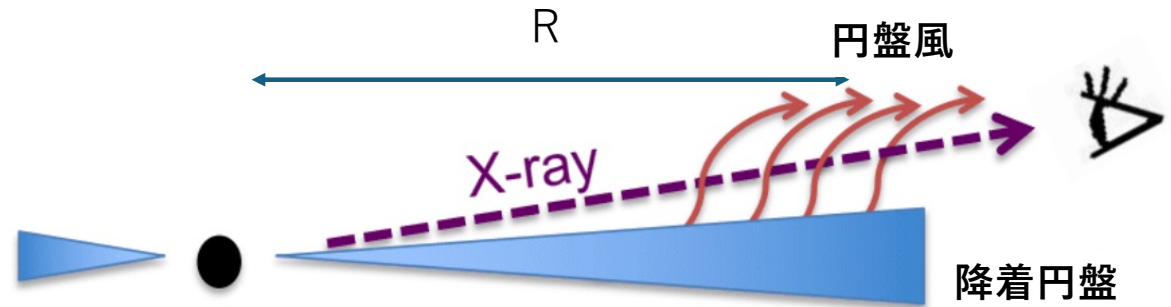
$L_X = 3.6 \times 10^{37} \text{ [erg/s]}$

- ・ D: 天体までの距離 = 銀河中心までの距離 = 8.277 kpcと仮定
- ・ F: 吸収や散乱を補正したフラックス

$\log \xi = 4.4^{+0.4}_{-0.2} \text{ [erg cm s}^{-1}\text{]}$

$N_H = 1.5^{+1.3}_{-0.7} \times 10^{24} \text{ [cm}^{-2}\text{]}$

$R < 10^9 \text{ cm}$



$R = 10^8 - 10^9 \text{ cm}$ の位置に吸収ガスが存在する

議論2 - 吸収体は連星系から脱出するか(1/2) -

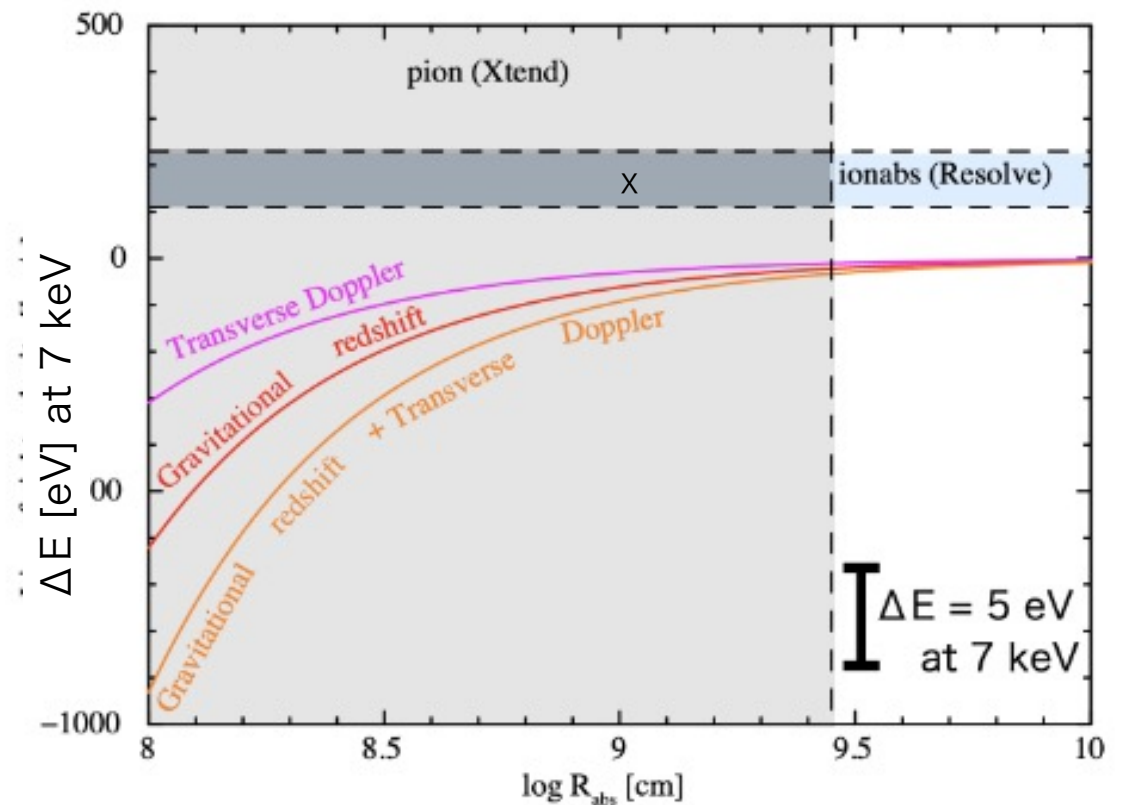
1. 地球の公転運動によるエネルギーシフト
対象の天体に対して28 km/sで近づいている

2. 横ドップラーによるエネルギーシフト
(中性子星の影響)

$$\Delta E = E_{\text{em}} \left(\sqrt{1 - \frac{GM}{Rc^2}} - 1 \right)$$

3. 重力赤方偏移によるエネルギーシフト
(中性子星の影響)

$$\Delta E = E_{\text{em}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}} \right)$$

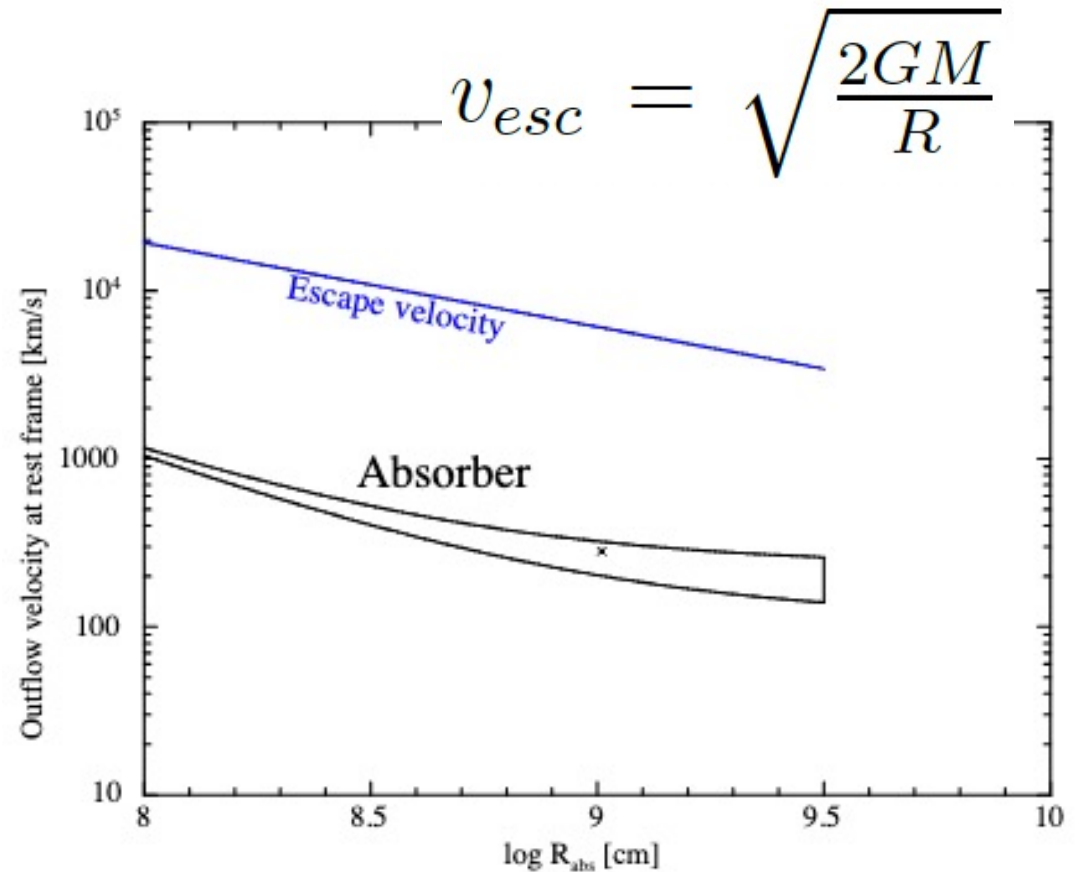


議論2 - 吸収体は連星系から脱出するか(2/2) -

観測された青方偏移
 190^{+40}_{-80} km/s

観測された円盤風は脱出速度に達していない

1. Wind なのか？
2. Accretion disk atmosphere？



議論3 - 吸収体の幅の起源-

吸収体の速度分散 90^{+50}_{-20} km/s

吸収体の幅の起源

1. 熱的広がり
2. 乱流運動
3. 中性子星のケプラー運動

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{kT}{m_{Fe}} + \underbrace{V_{\text{turb}}^2}_{\text{blue}} + \underbrace{(V_{\text{kep}} \sin i)^2}_{\text{orange}}}$$

40 km/s ?? 107 km/s

1. 熱的広がり

$$T = 10^7 \text{ K}, m_{\text{Fe}} = 56 m_p$$

$$\sim 40 \text{ km/s}$$

3. 中性子星のケプラー運動

$$V_{\text{kep}} = 161 \text{ km/s}$$

$$V_{\text{kep}} \sin(70^\circ) = 151 \text{ km/s}$$

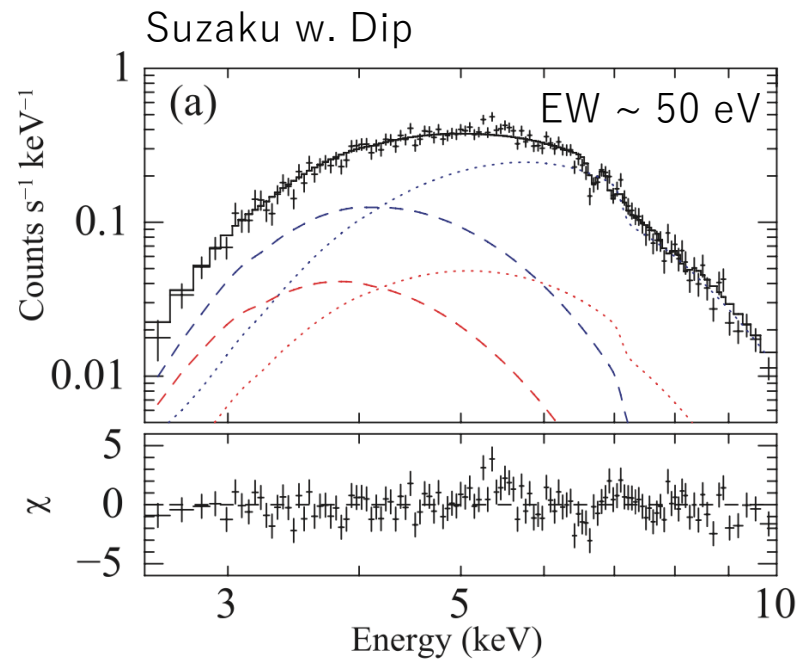
視線方向の実効値：107 km/s

$$114 \text{ km/s (} V_{\text{turb}}=0 \text{ として計算)}$$

熱的広がりと中性子星のケプラー運動で吸収線の広がりを説明できる
乱流運動は無視できるほど小さいと考えられる

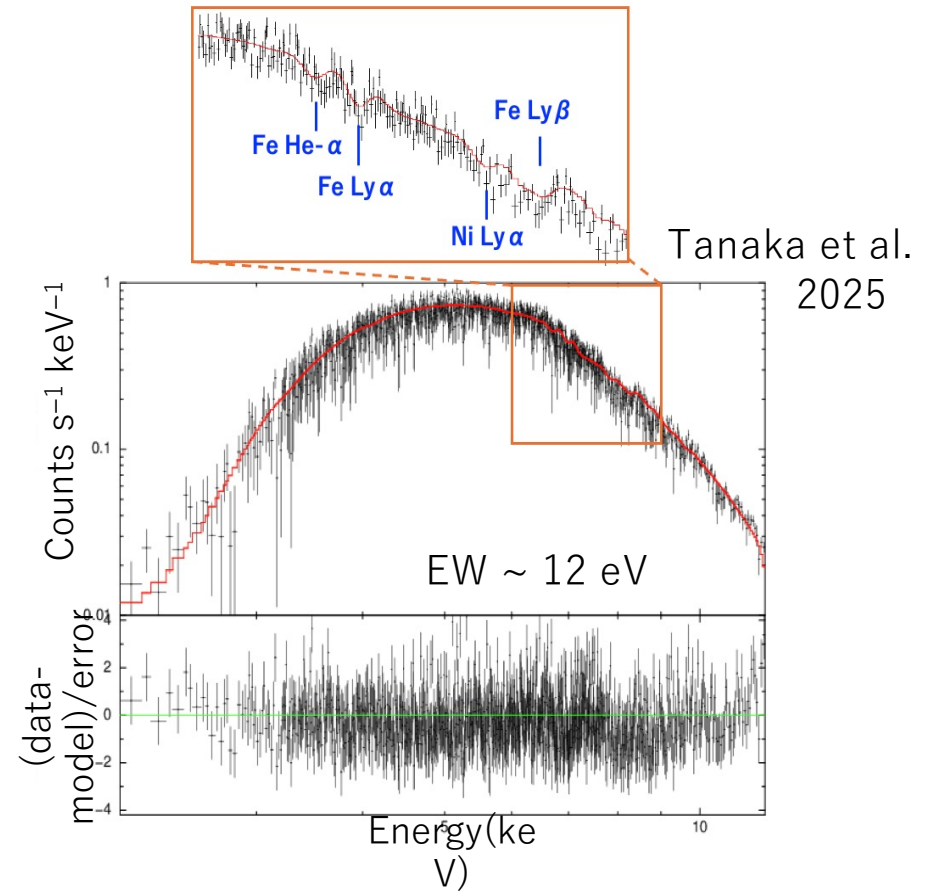
議論4 – Dip がない –

Hyodo et al. 2009



Log ξ ~3.5
 N_H cm⁻² 1.3×10^{23}

XRISM wo. dip

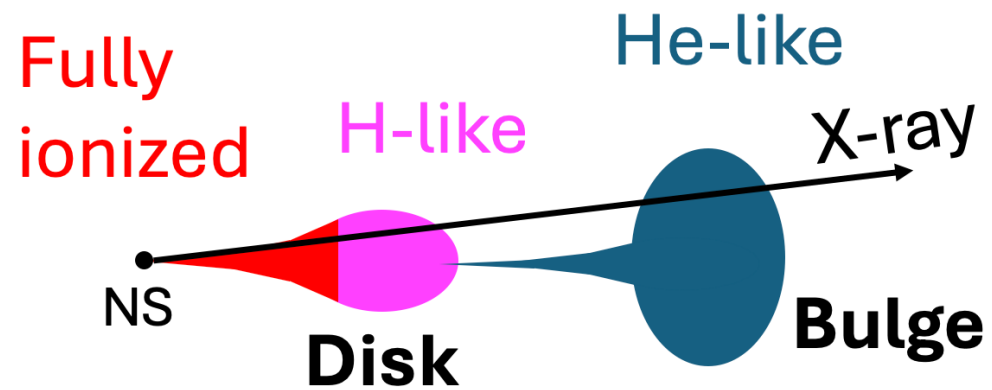


~4.4
 1.5×10^{24}

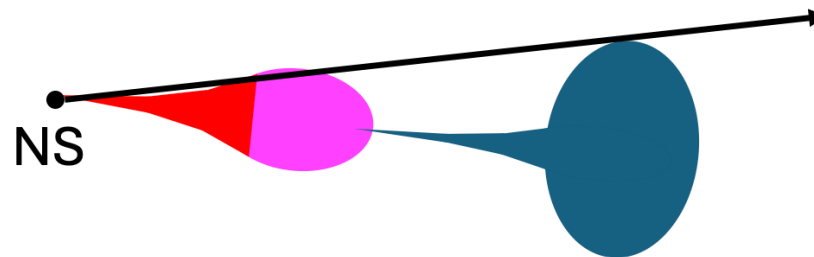
議論4 – Dip がない –

Disk precession ?

Dip



Non dip



まとめ

XRISM衛星で観測されたAX J1745.6–2901のX線分光解析によって鉄 $\text{He}\alpha$, $\text{Ly}\alpha$, $\text{Ly}\beta$, $\text{Ly}\gamma$, ニッケル $\text{Ly}\alpha$ の吸収線を検出した

- 吸収線(6.97 keV)の青方偏移(~ 190 km/s)と幅(~ 90 km/s)を見積もった
→吸収線の細い幅と速度はXRISM衛星によって初めて精密に測定
- この吸収体は $\log \xi \sim 4.4$, $N_{\text{H}} \sim 1.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ 。Dip がない影響か？
- $R=10^8 - 10^9 \text{ cm}$ に位置し、そのままでは連星系から脱出できない。
Wind というよりは、Atmosphere に近いかな？
- 吸収線の幅は軌道運動によって説明でき、乱流は無視できるほど小さい？

今後

2025年3月のGenetic ToO の視野に再度検出。松永さん（京都大学）を中心に解析が進行中。乞うご期待。