

XRISMで探る巨大ブラックホール 降着流・噴出流の物理

2025年8月5日

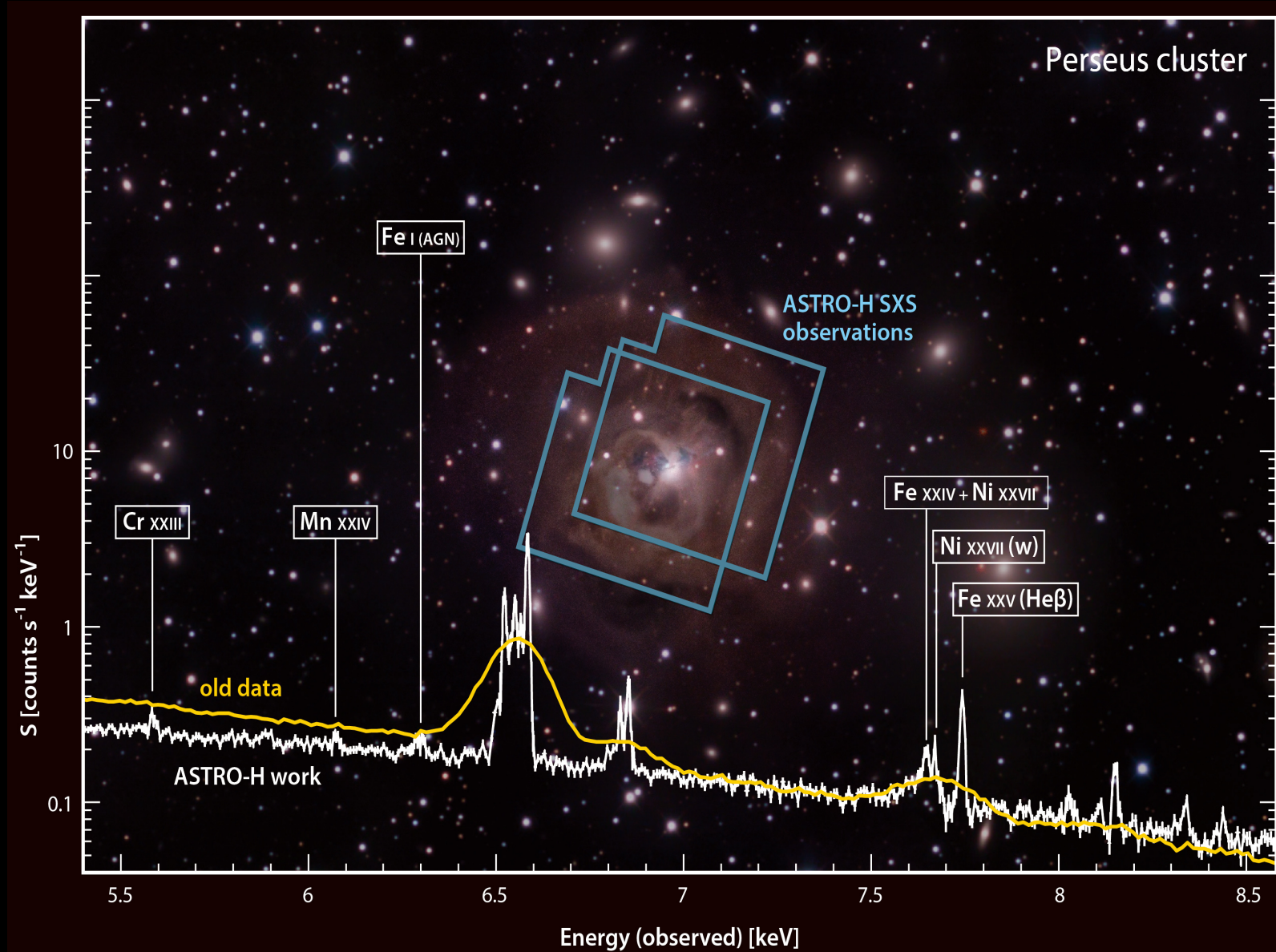
東北大学 天文学教室

野田 博文



X線天文衛星「ひとみ」で実現された精密X線分光

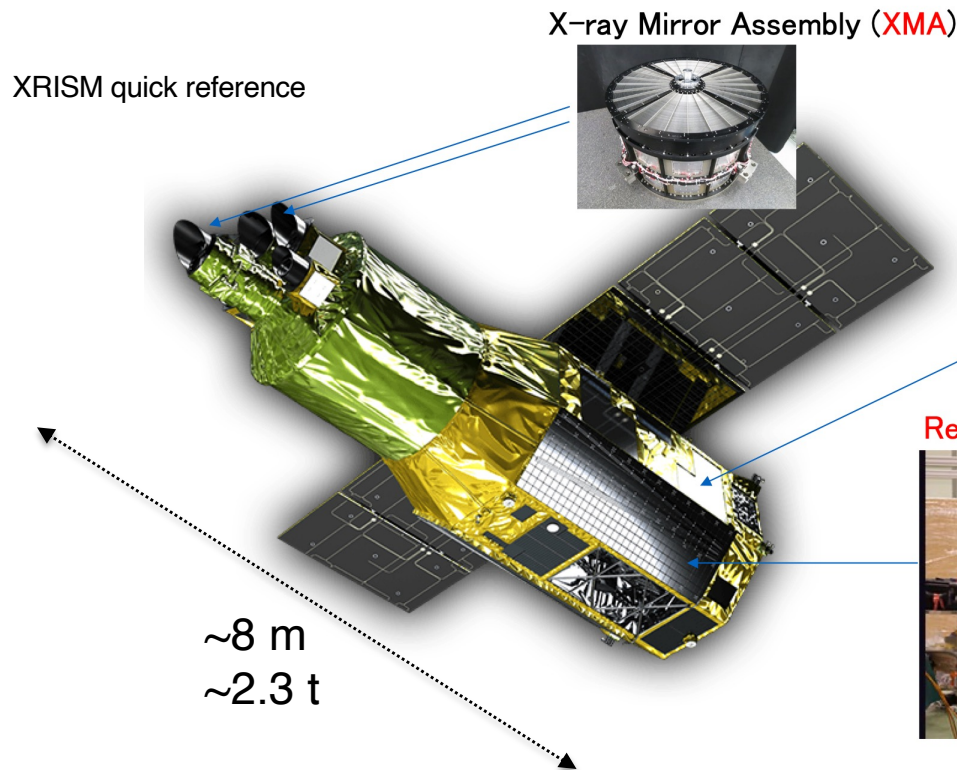
Hitomi collaboration (2016, 2018), Credit: JAXA/Ken Crawford (Rancho Del Sol Observatory)



しかし、打上から約一ヶ月後に姿勢系のトラブル。運用終了となった...

X線天文衛星XRISM

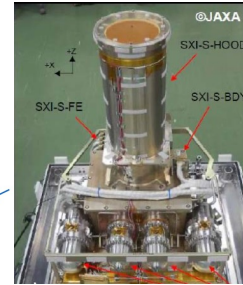
2016年2月17日に打ち上げられ、~1ヶ月で運用できなくなった「ひとみ」(ASTRO-H)のリカバリーミッション



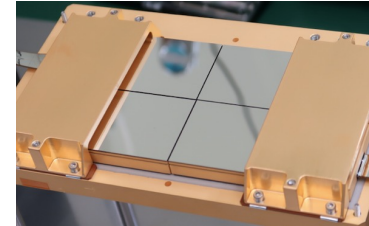
X-ray Mirror Assembly (XMA)



Xtend-Soft X-ray Imager



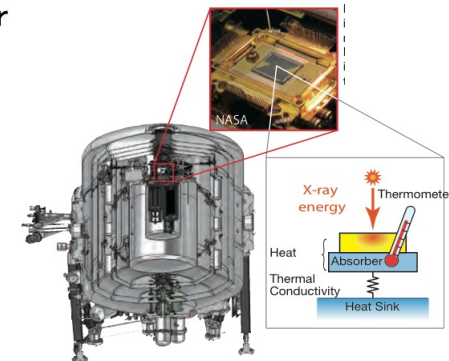
Noda et al. (2025)



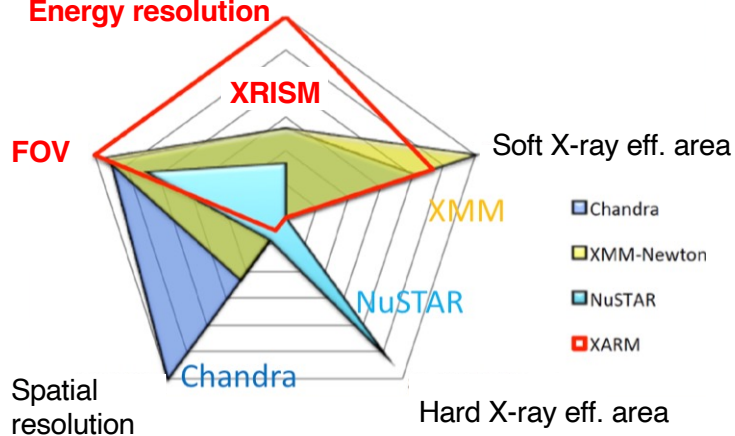
Resolve-Soft X-ray Spectrometer



Kelley et al. (2025) submitted

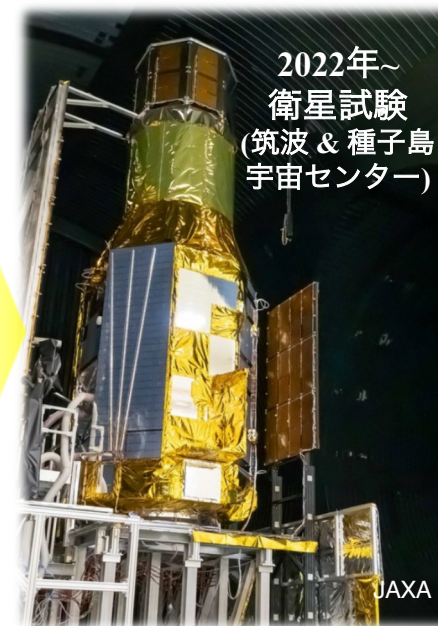
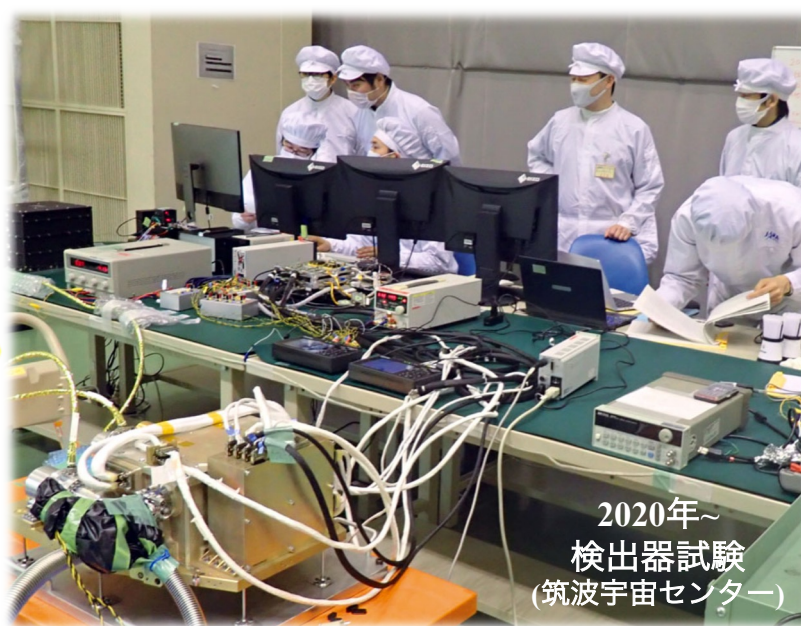
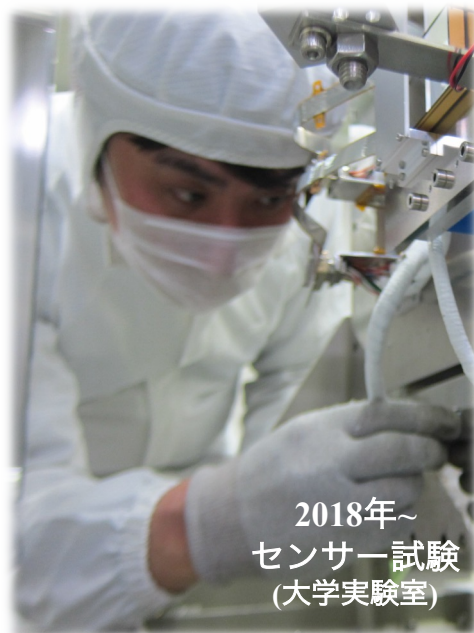


Energy resolution

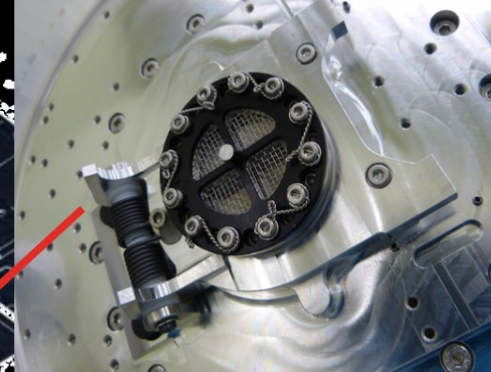
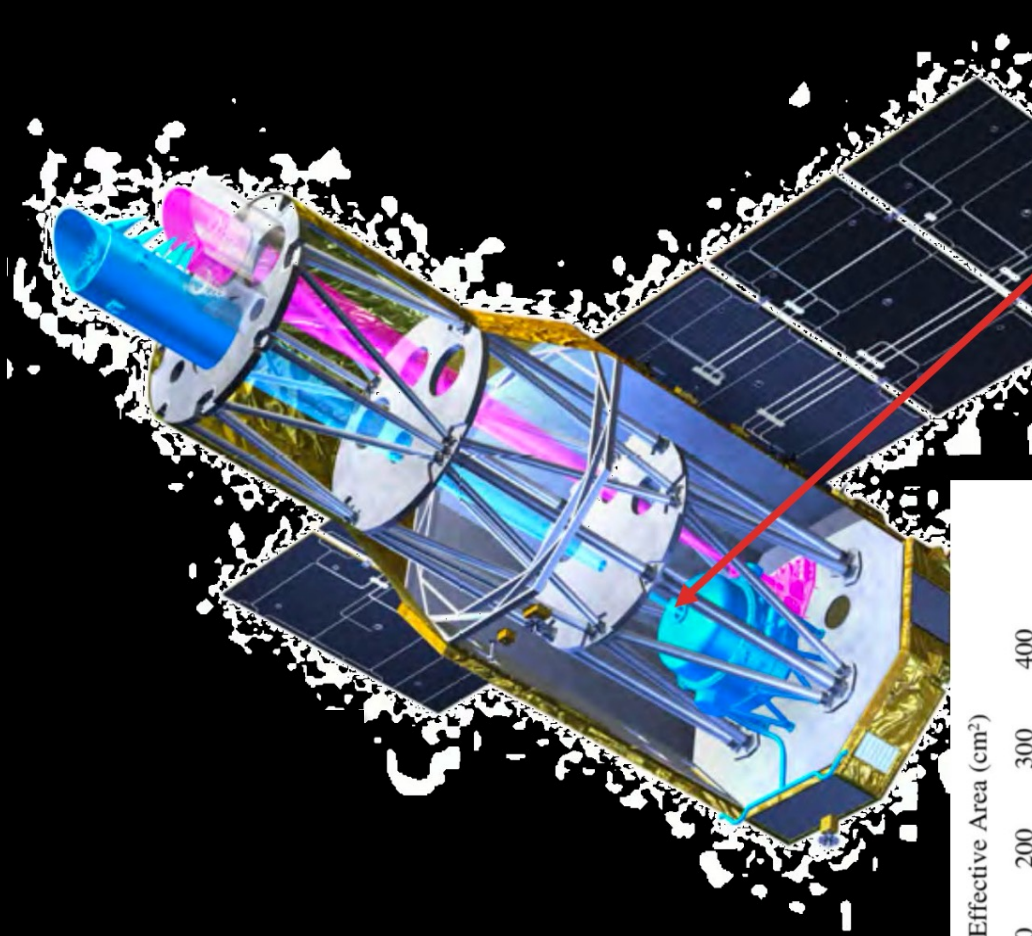


Instrument	FOV/pix	ΔE (FWHM at 6 keV)	E band
Resolve (X線ミラーアセンブリ + X線マイクロカロリメータ)	2.9' $\square$ / 6 $\times$ 6 pix	7 eV (goal 5 eV)	0.3–12 keV
Xtend (X線ミラーアセンブリ + X線CCDカメラ)	38' $\square$ / 1280 $\times$ 1280 pix	< 200 eV (BOL)	0.4–13 keV

XRISMの開発

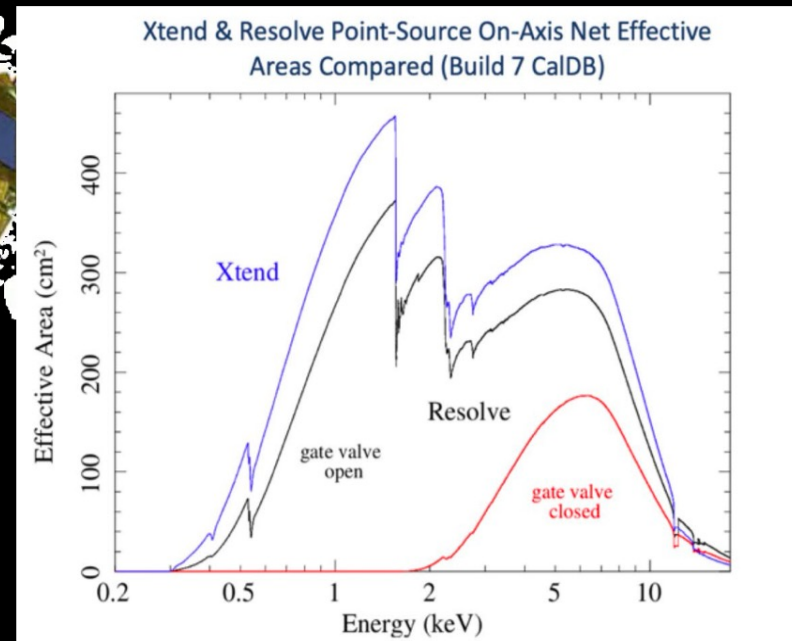


残された軌道上運用



Hitomi SXS
Gate Valve
(Leutenegger,
IACHEC 2019)

Tashiro et al. SPIE2024

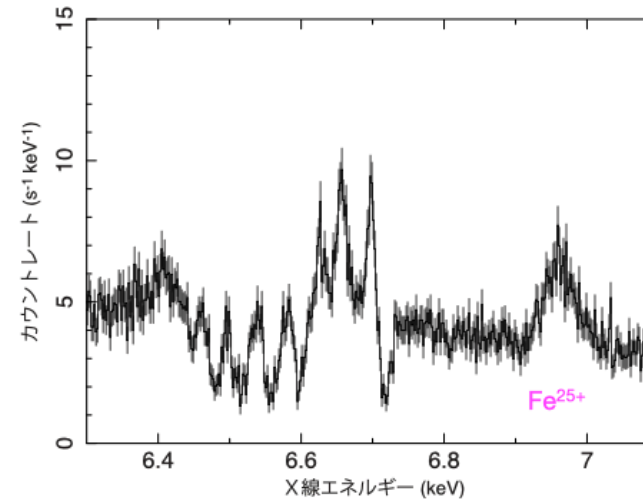
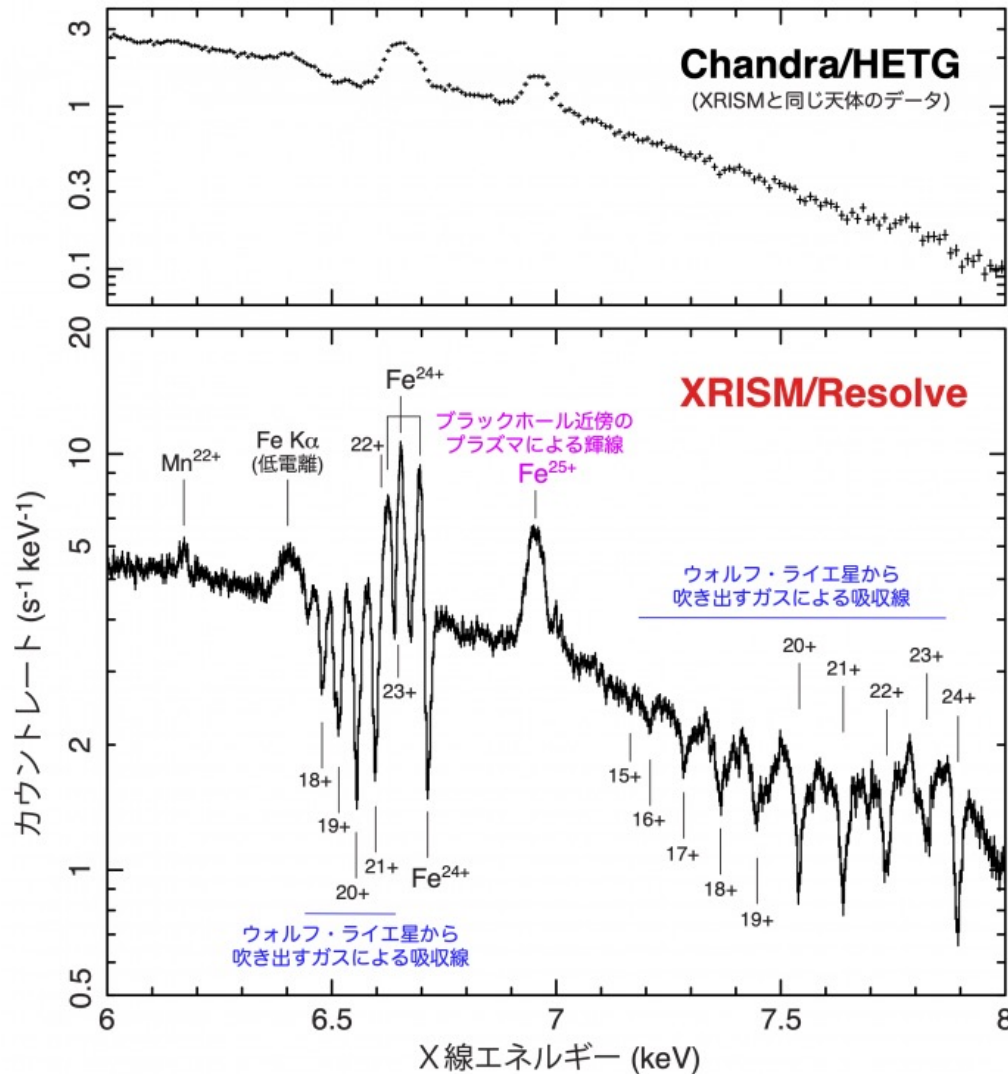


来月、Gate Valve Open 運用を実施予定



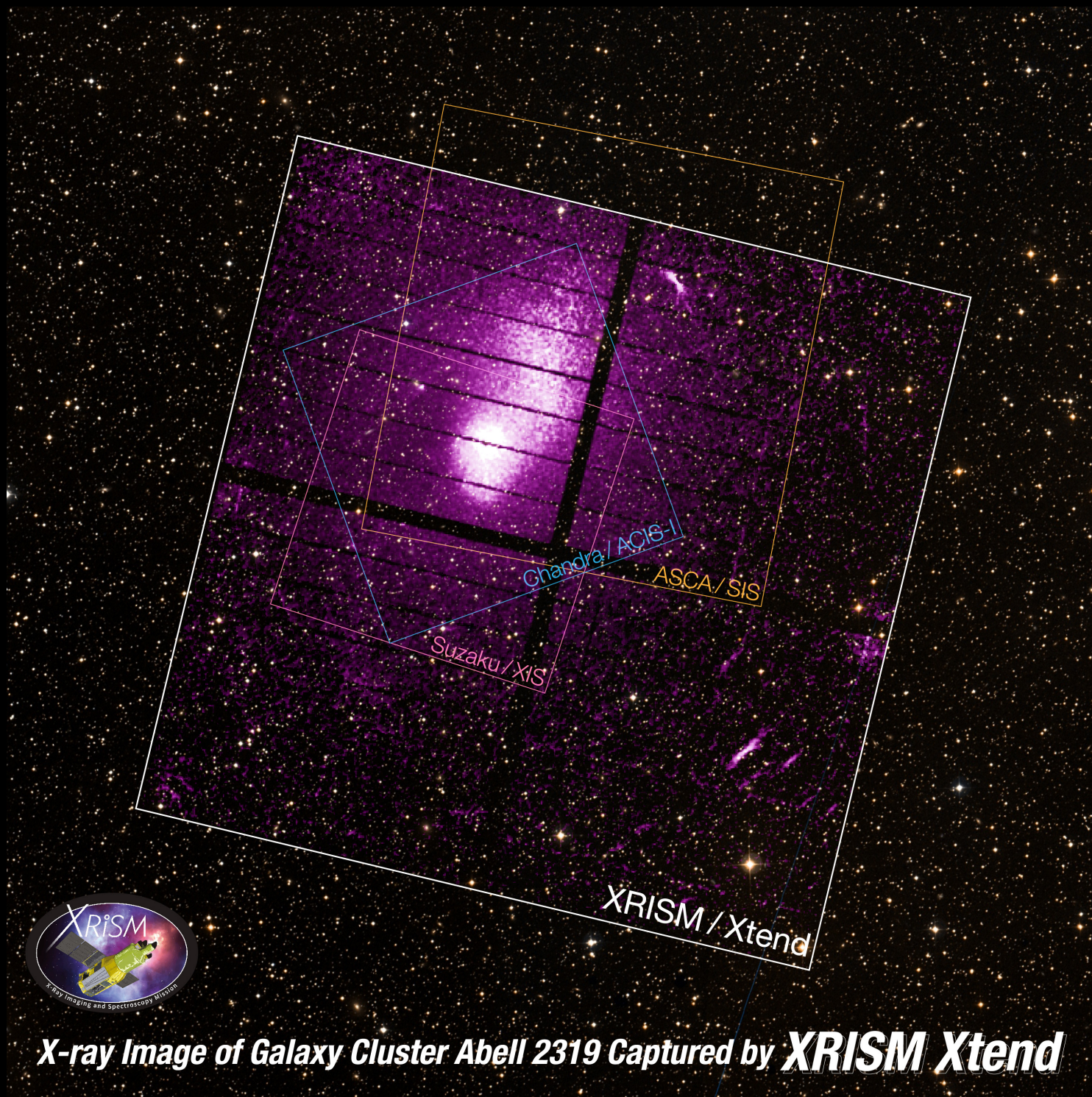
大質量X線連星 Cygnus X-3

(credit) JAXA, XRISM collaboration (2024)



- ☆ 伴星 (Wolf-Tayet) の星風による高階電離 Fe 輝線・吸収線を精密に分解
- ☆ BH 近傍のプラズマによる Fe XXV の軌道位相変化を捉えることに成功

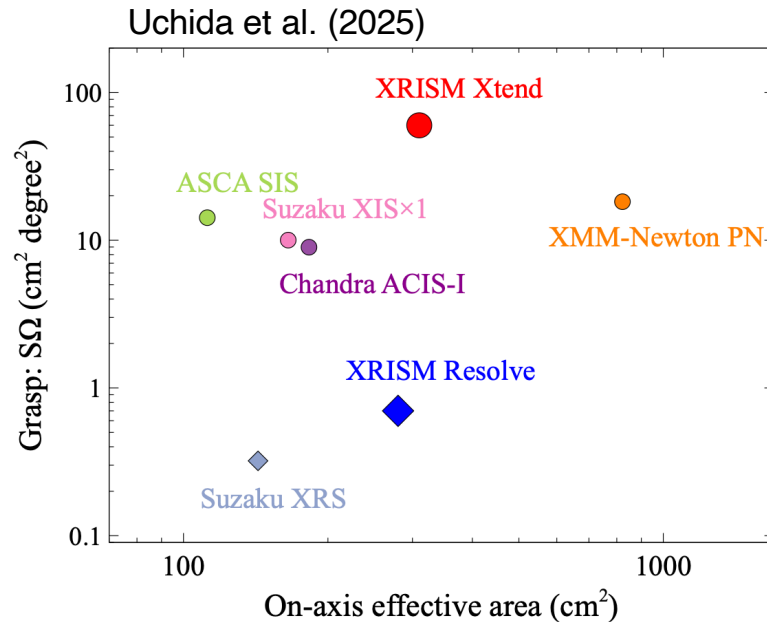
➔ 速度・密度変化から構造へ



(credit) JAXA

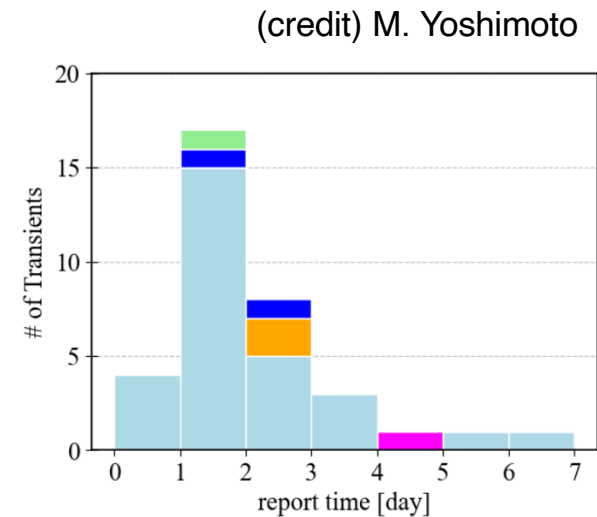
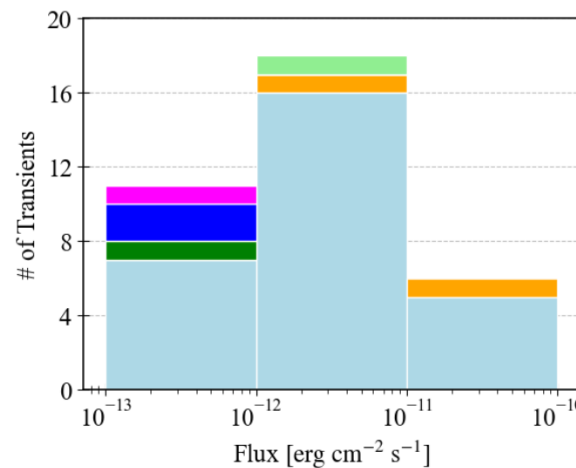
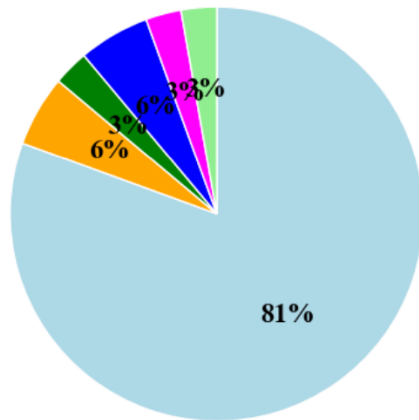
X-ray Image of Galaxy Cluster Abell 2319 Captured by XRISM Xtend

Xtend Transient Search (XTS)



- ☆ Xtend は大きな Grasp (= 有効面積 × FOV)。XTS チームが ATEL を出す体制を確立
- ☆ Xtend FOV で MAXI より ~3桁高い感度 (フレーム時間は 4秒。1回のポインティングは数日継続することが多い)

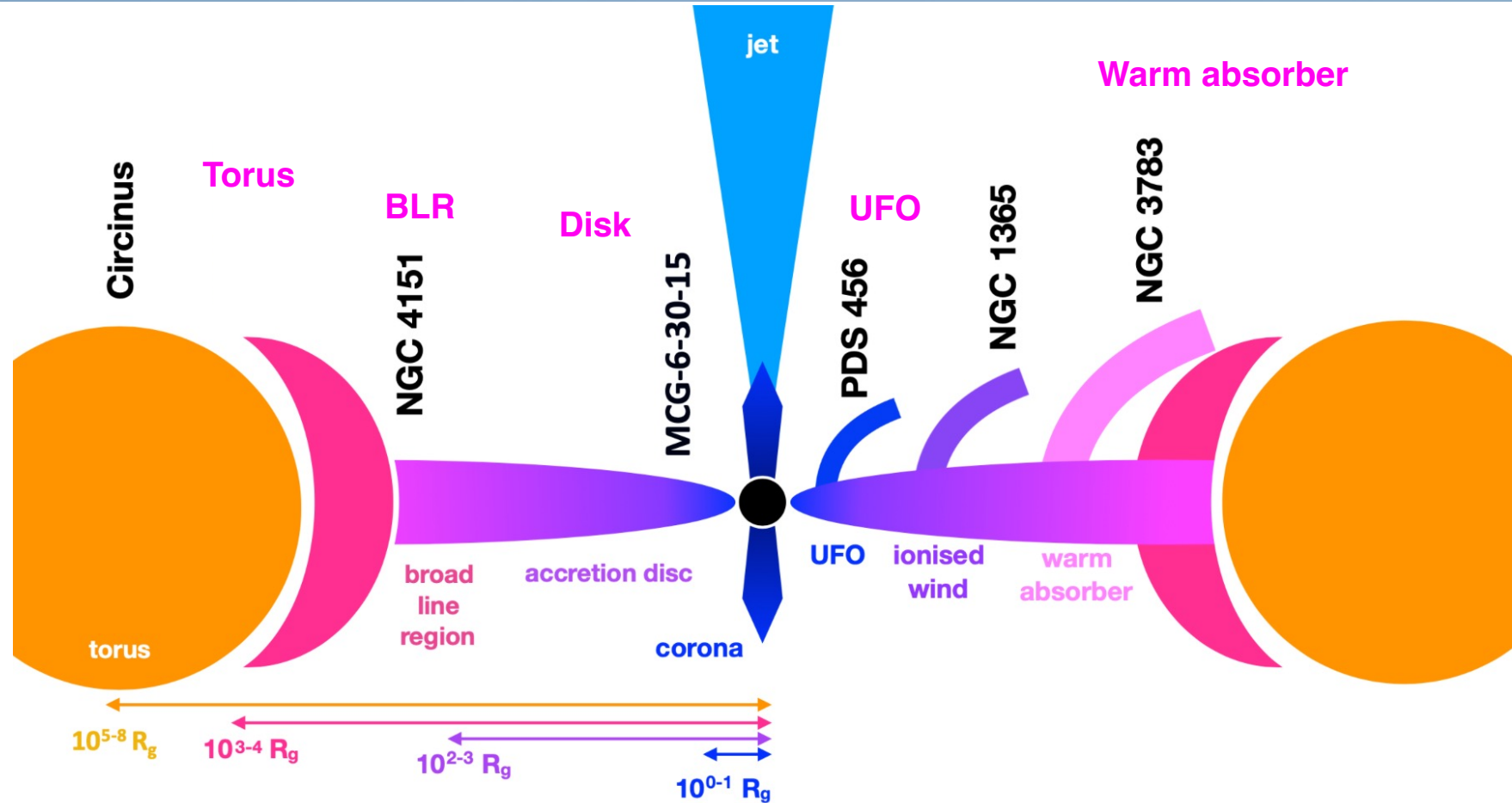
時間軸天文学に貢献したい



■ stellar or YSO flare ■ outburst ■ supernova (ToO) ■ AGN ■ unknown ■ GRB candidate

XRISM で探る巨大ブラックホール 降着流・噴出流

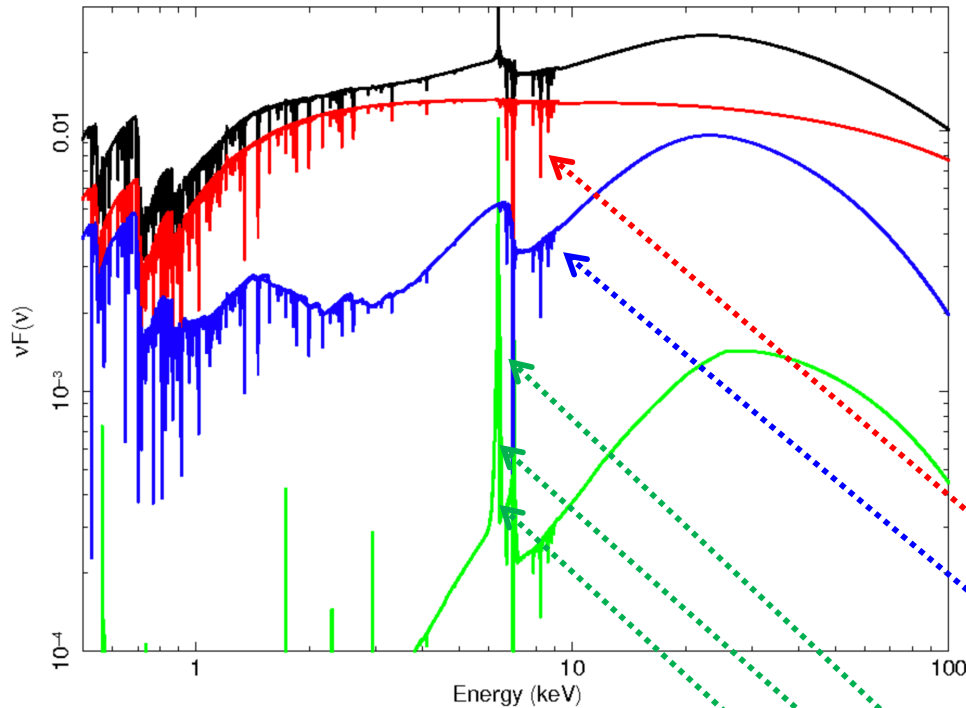
活動銀河核 (AGN) のX線観測に残る重要課題



1. 超高速アウトフロー (Ultra-Fast Outflow; UFO) の形成メカニズムは？これらが母銀河に与えるフィードバックは？
2. 活動銀河核の広輝線領域やダストトーラスはどう形成されるか？
3. 相対論的効果で広がった Fe-K α 輝線はリアルか？ BHスピンの測定は可能か？

X線スペクトルの構成成分

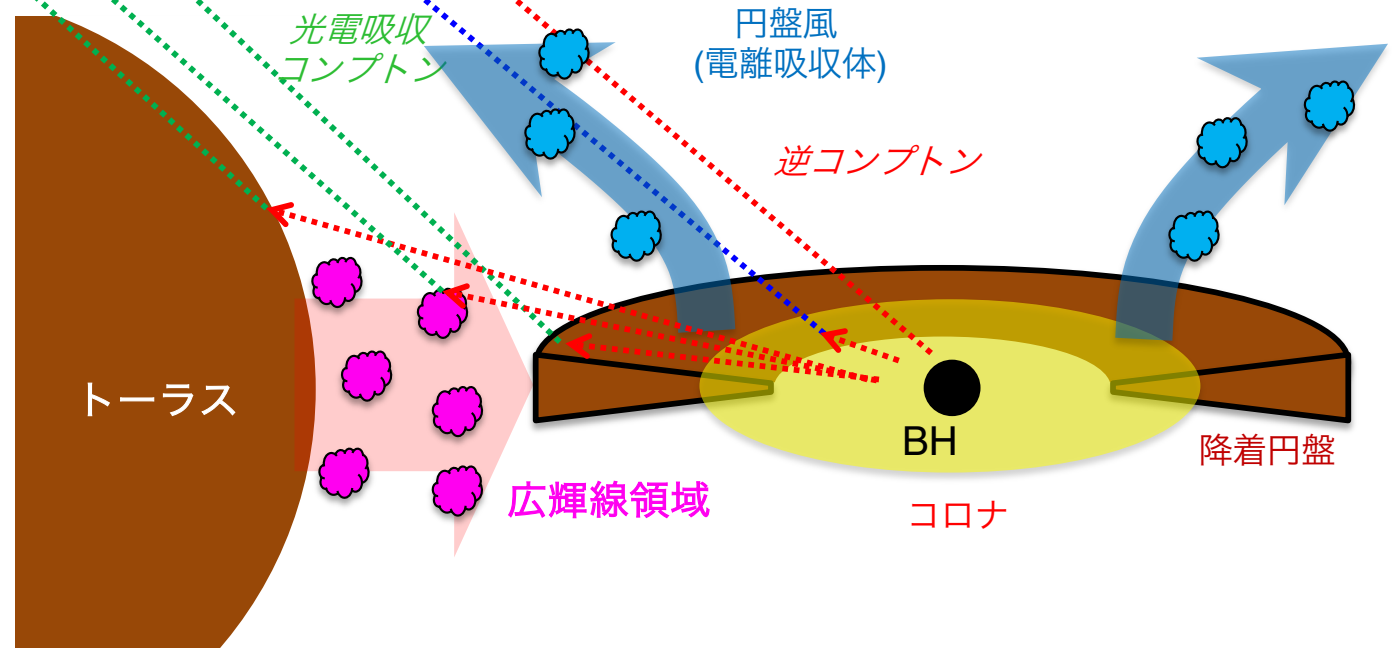
AGN の X線スペクトルの例 (Reynolds 2015)



- ☆ 連続X線はブラックホール (BH) 近傍のコロナによる逆コンプトン散乱過程で生じる
- ☆ 連続X線は周囲の降着円盤 (AGNならば広輝線領域、ダストトーラス) などの物質で光電吸収・コンプトン散乱

➔ 物理状態を反映した輝線・吸収線

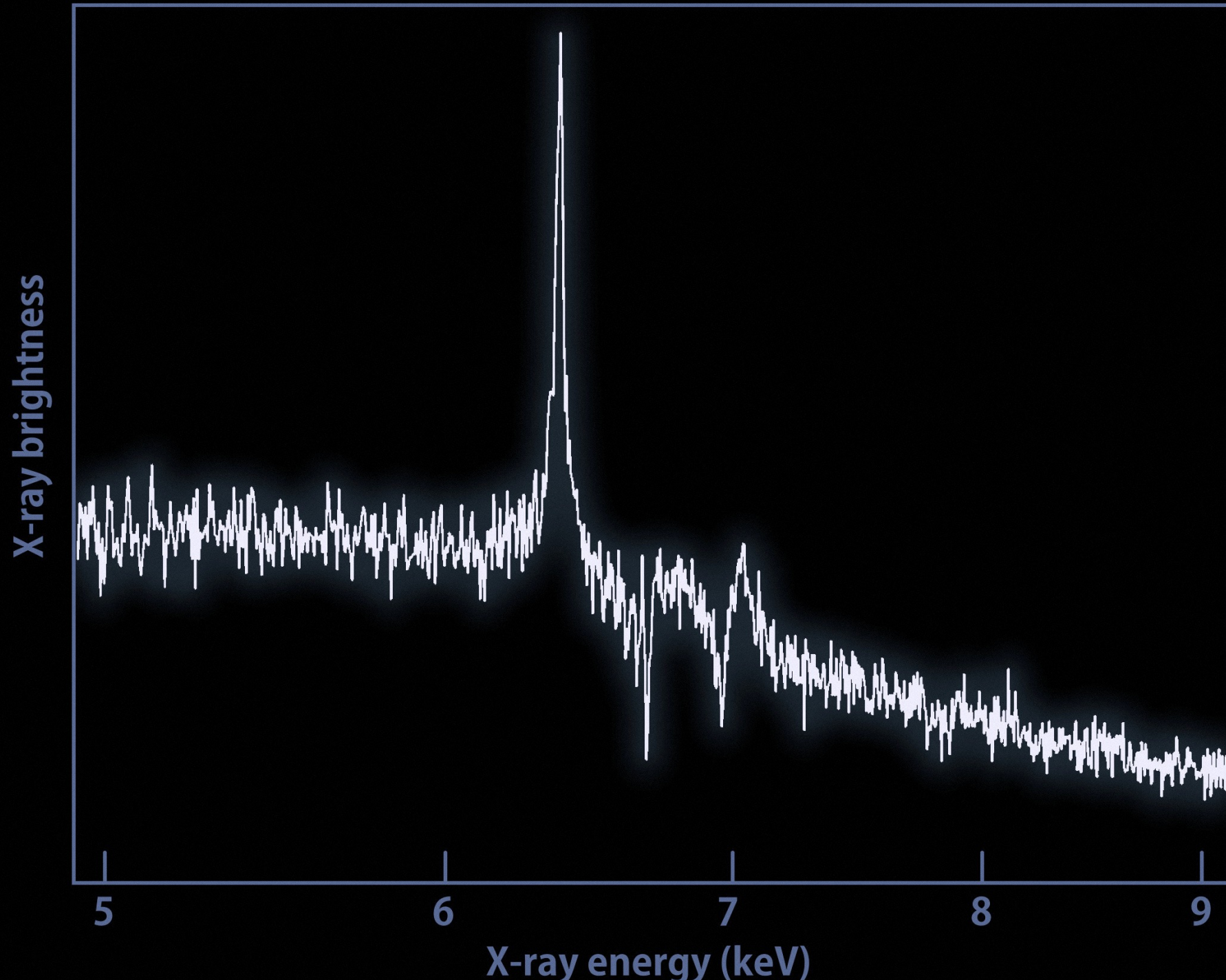
AGNにおけるBH近傍の描像



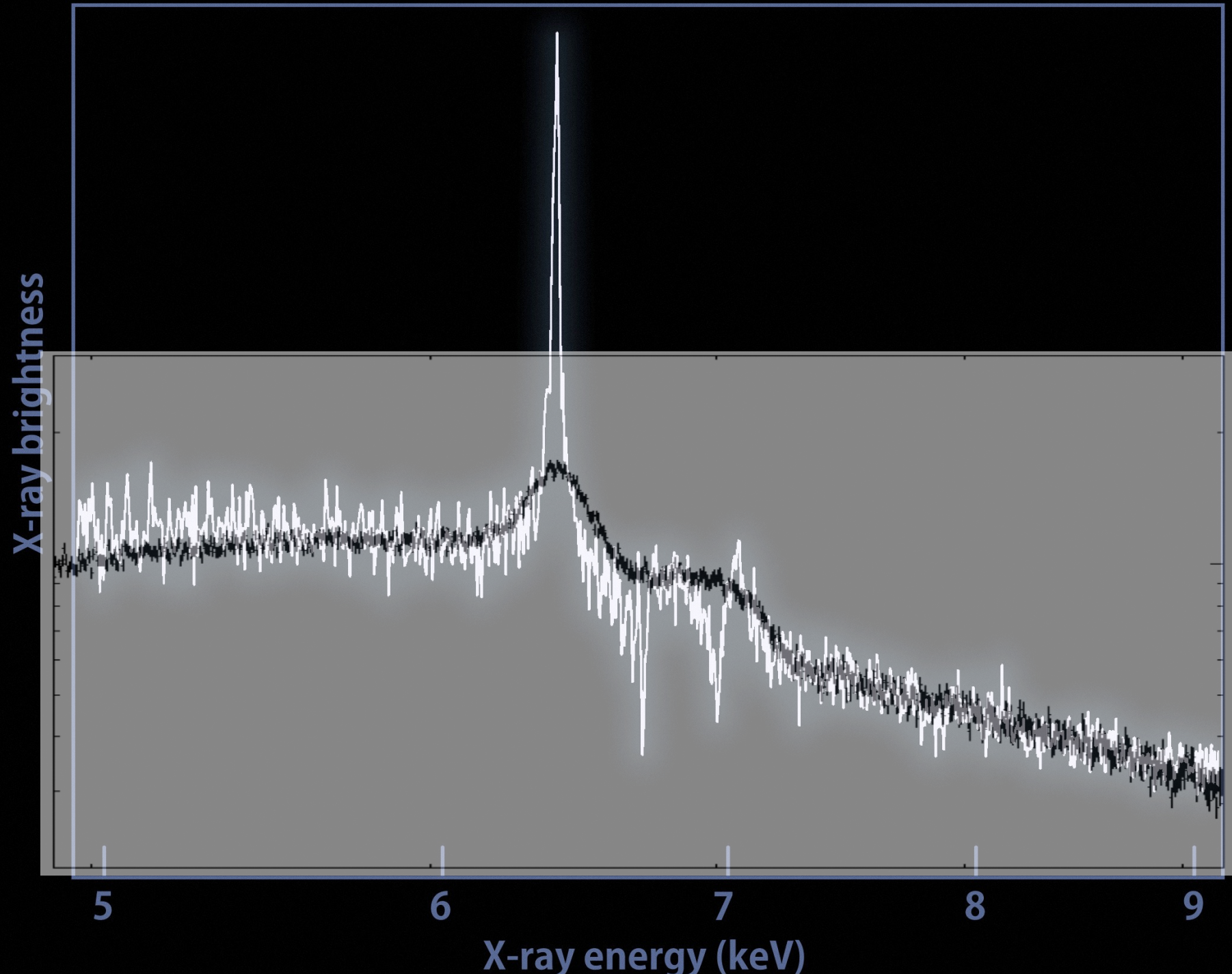
XRISMは 2 keV以上の
ラインの研究に最適

- 中性 (に近い) 物質
によるFe-K α 輝線
- 電離された物質に
よる Fe XXV/XXVI
輝線・吸収線

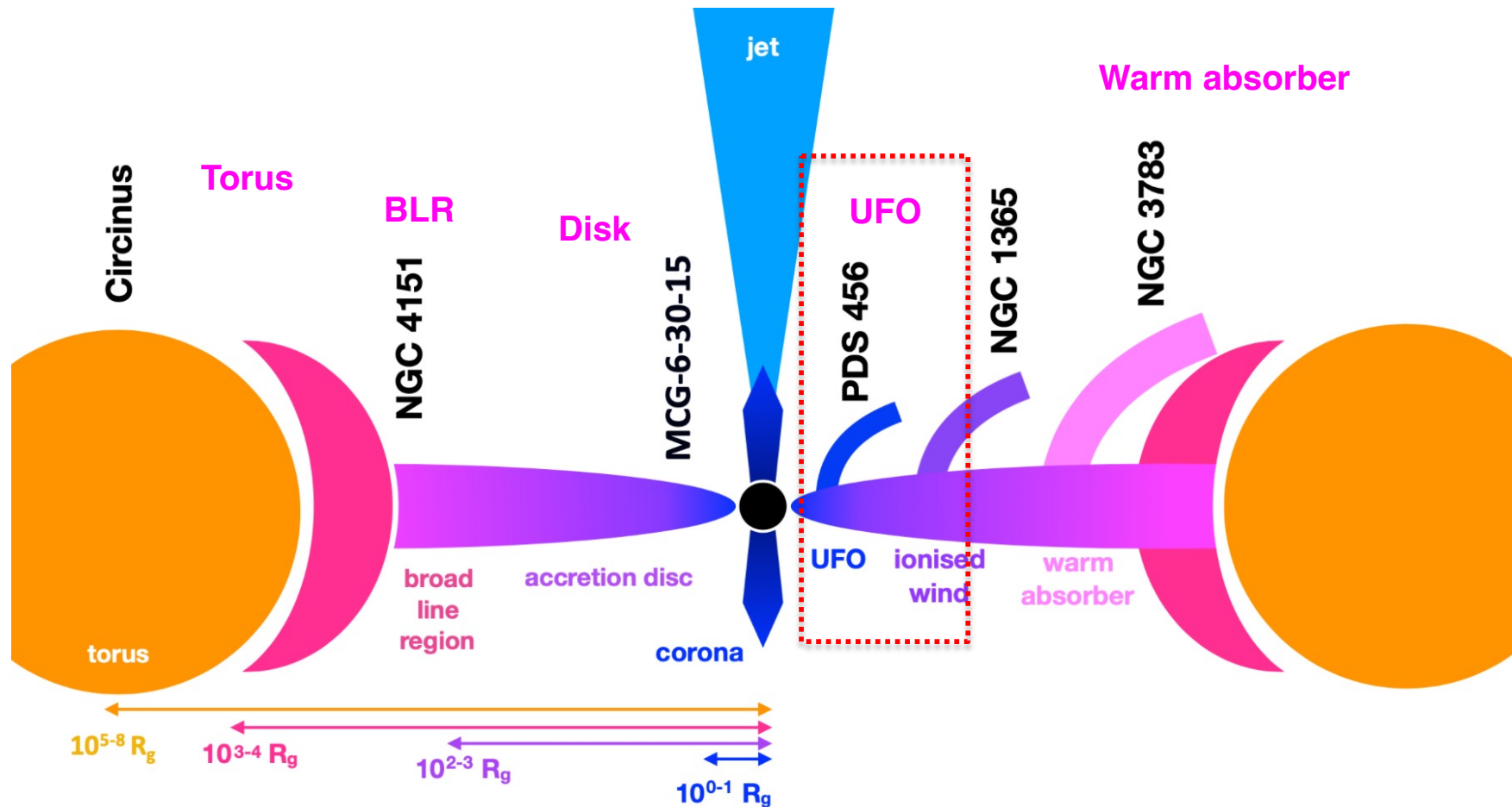
XRISM Resolve Spectrum of NGC 4151



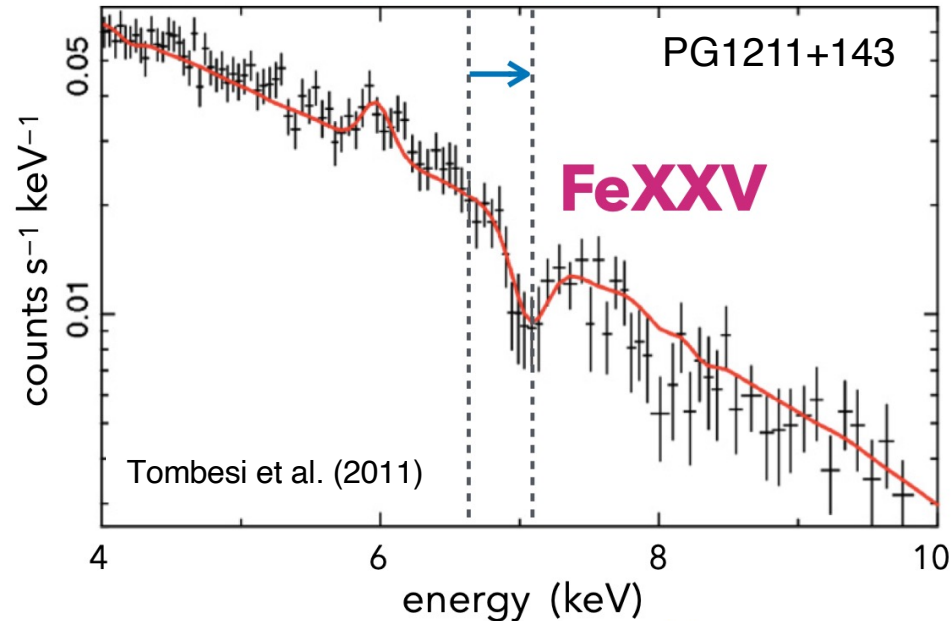
XRISM Resolve Spectrum of NGC 4151



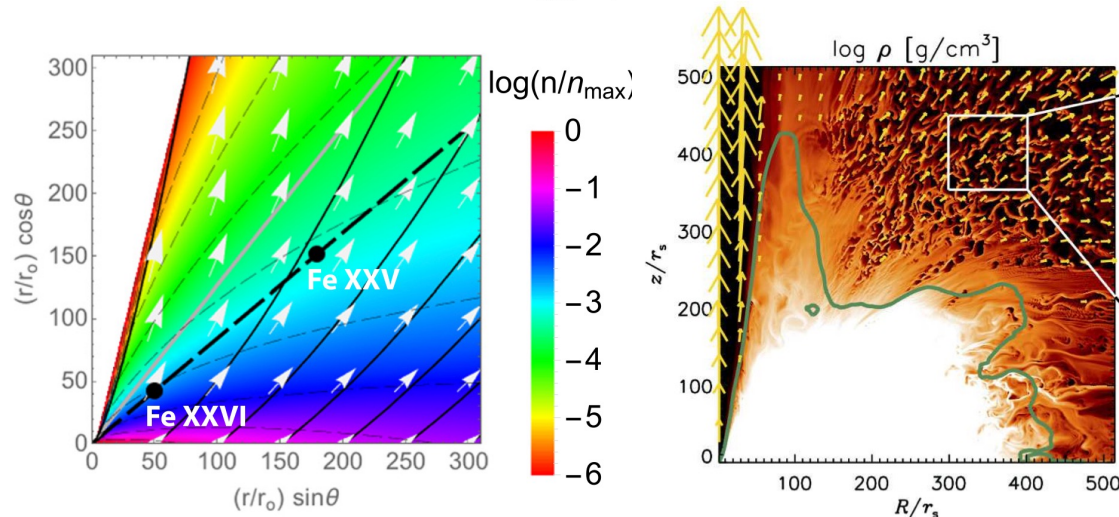
XRISM で探る超高速アウトフロー (UFO)



超高速アウトフロー (Ultra-Fast Outflow; UFO)



- ☆ Blueshift した Fe XXV/XXVI 吸収線
- ☆ アウトフロー速度 0.1–0.3c
- ☆ 近傍の AGN の 40% に存在する報告も (Tombesi et al. 2010; Gofford et al. 2013)
- ☆ 加速メカニズムの候補



MHD wind
(Fukumura et al. 2015)

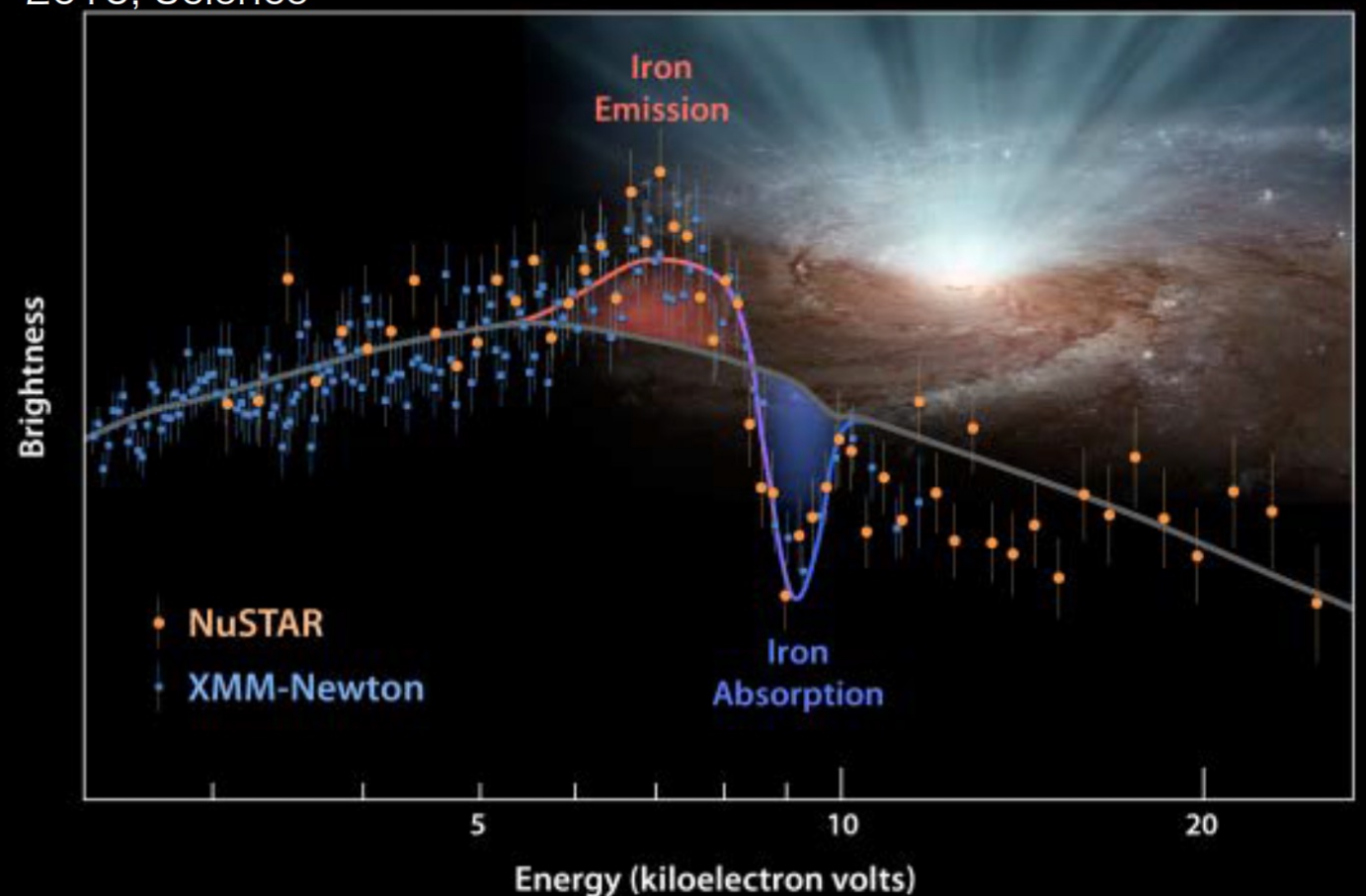
Radiation-driven wind
(Takeuchi et al. 2013)

- MHD 駆動
e.g, Fukumura et al. (2015)
- 輻射駆動
 - 連続放射駆動
e.g., Takeuchi et al. (2013)
 - ライン駆動
e.g., Nomura et al. (2020)

UFO を定常的に持つ PDS 456

E. Nardini et al.,
2015, Science

Iron Blowing in Quasar Winds



☆ 近傍クエーサー

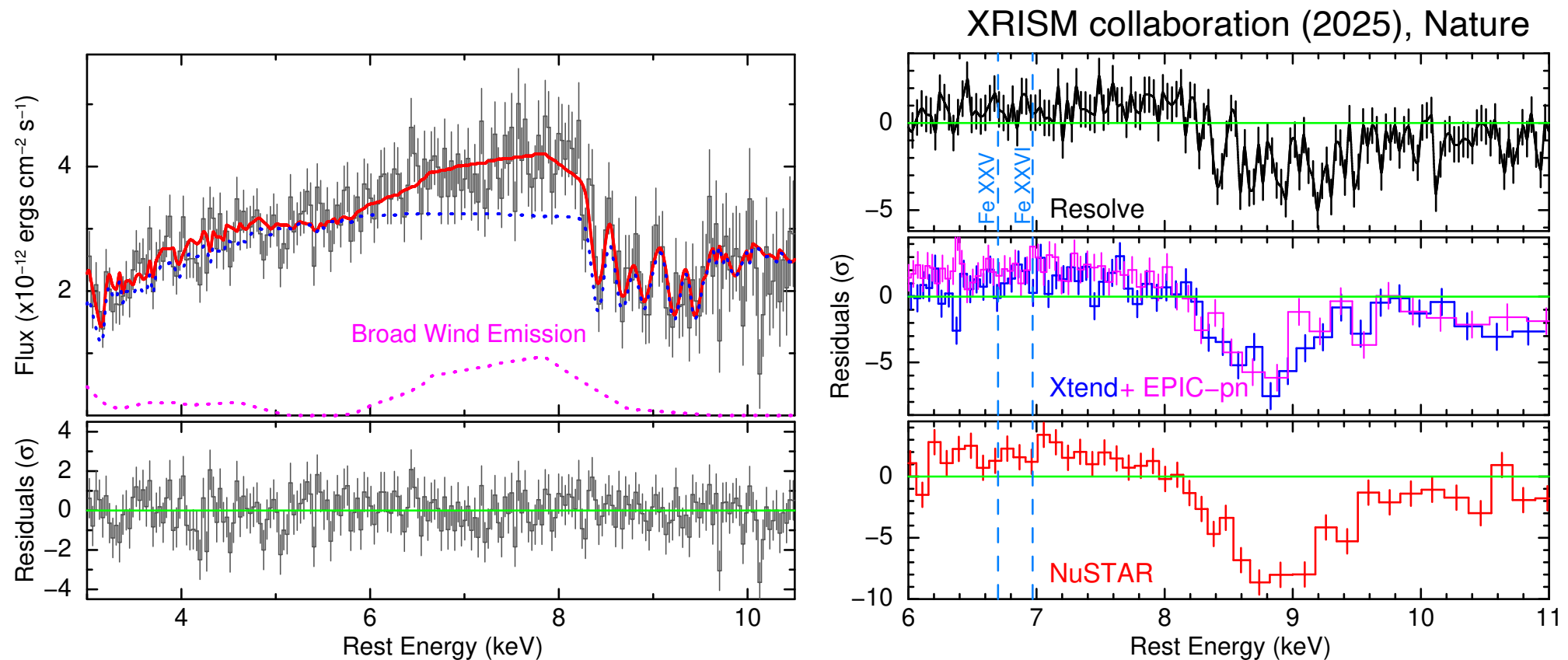
- $z = 0.184$
- $M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\odot}$
- $L \sim L_{\text{Edd}}$

☆ $v \sim 0.3c$ の UFO
が定常的に存在

☆ 従来のX線衛星に
より広い吸収線
& P cygni プロ
ファイルが観測

UFO 加速機構や UFO の母銀河への影響を調べるのに適した天体

X線マイクロカロリメータ (Resolve) による結果

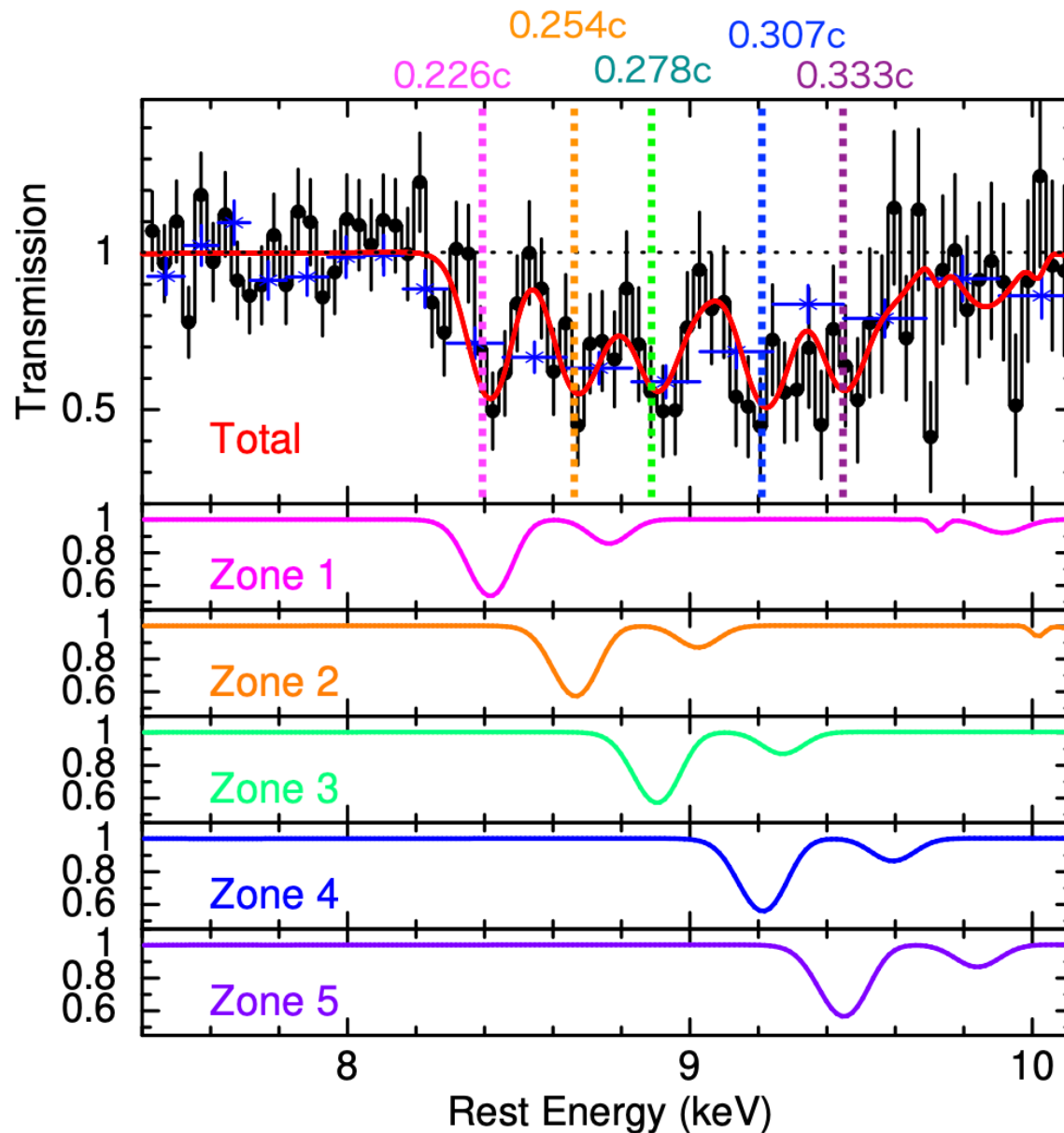


- ☆ 従来の観測では1本の広い吸収構造 → 多数の細い吸収線を分解
- ☆ 単一速度 + 複数の電離状態では解釈できない → Multi-velocity UFO
- ☆ 強い P Cygni emission line が共存 → UFO の立体角 $\Omega \sim 4\pi$

非一様で **clumpy** な **wind** 構造を確認

光電離モデルでのスペクトル解析

XRISM collaboration (2025), Nature



- ☆ 5つの異なる速度の吸収体
- ☆ 電離パラメータ ξ と速度分散 v_{turb} は5つの吸収体間で共通
 - $\log(\xi/\text{erg cm s}^{-1}) \sim 4.90$
 - $V_{\text{turb}} \sim 1900 \text{ km/s } (\sigma)$
- ☆ 柱密度 N_{H} とアウトフロー速度 v は吸収体ごとに独立
 - $N_{\text{H}} = (7.9\text{--}13.5) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$
 - $v \sim (0.226 - 0.333)c$

クエーサーへの各進化段階を XRISM 観測

IRAS 05189-2524

PDS 456, PG1211+143

(c) Interaction/"Merger"



- now within one halo, galaxies interact & lose angular momentum
- SFR starts to increase
- stellar winds dominate feedback
- rarely excite QSOs (only special orbits)

(b) "Small Group"



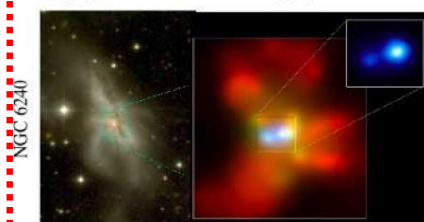
- halo accretes similar-mass companion(s)
- can occur over a wide mass range
- M_{halo} still similar to before: dynamical friction merges the subhalos efficiently

(a) Isolated Disk



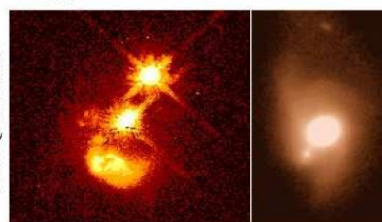
- halo & disk grow, most stars formed
- secular growth builds bars & pseudobulges
- "Seyfert" fueling (AGN with $M_{\text{BH}} > 23$)
- cannot redden to the red sequence

(d) Coalescence/(U)LIRG



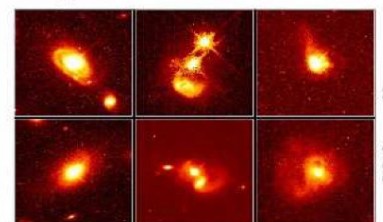
- galaxies coalesce: violent relaxation in core
- gas inflows to center: starburst & buried (X-ray) AGN
- starburst dominates luminosity/feedback, but, total stellar mass formed is small

(e) "Blowout"



- BH grows rapidly: briefly dominates luminosity/feedback
- remaining dust/gas expelled
- get reddened (but not Type II) QSO: recent/ongoing SF in host
- high Eddington ratios
- merger signatures still visible

(f) Quasar



- dust removed: now a "traditional" QSO
- host morphology difficult to observe: tidal features fade rapidly
- characteristically blue/young spheroid

(g) Decay/K+A

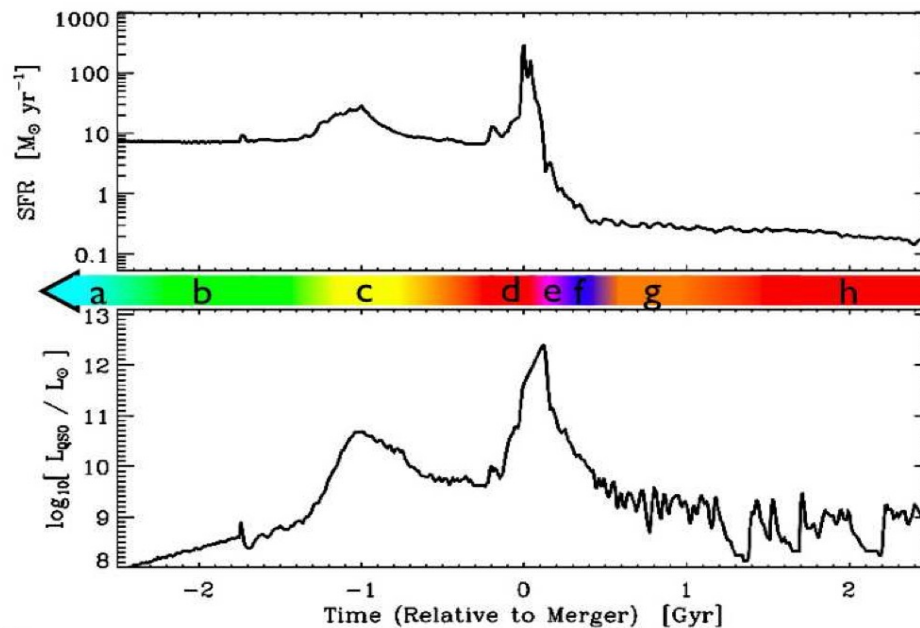


- QSO luminosity fades rapidly
- tidal features visible only with very deep observations
- remnant reddens rapidly (E+A/K+A)
- "hot halo" from feedback
- sets up quasi-static cooling

(h) "Dead" Elliptical



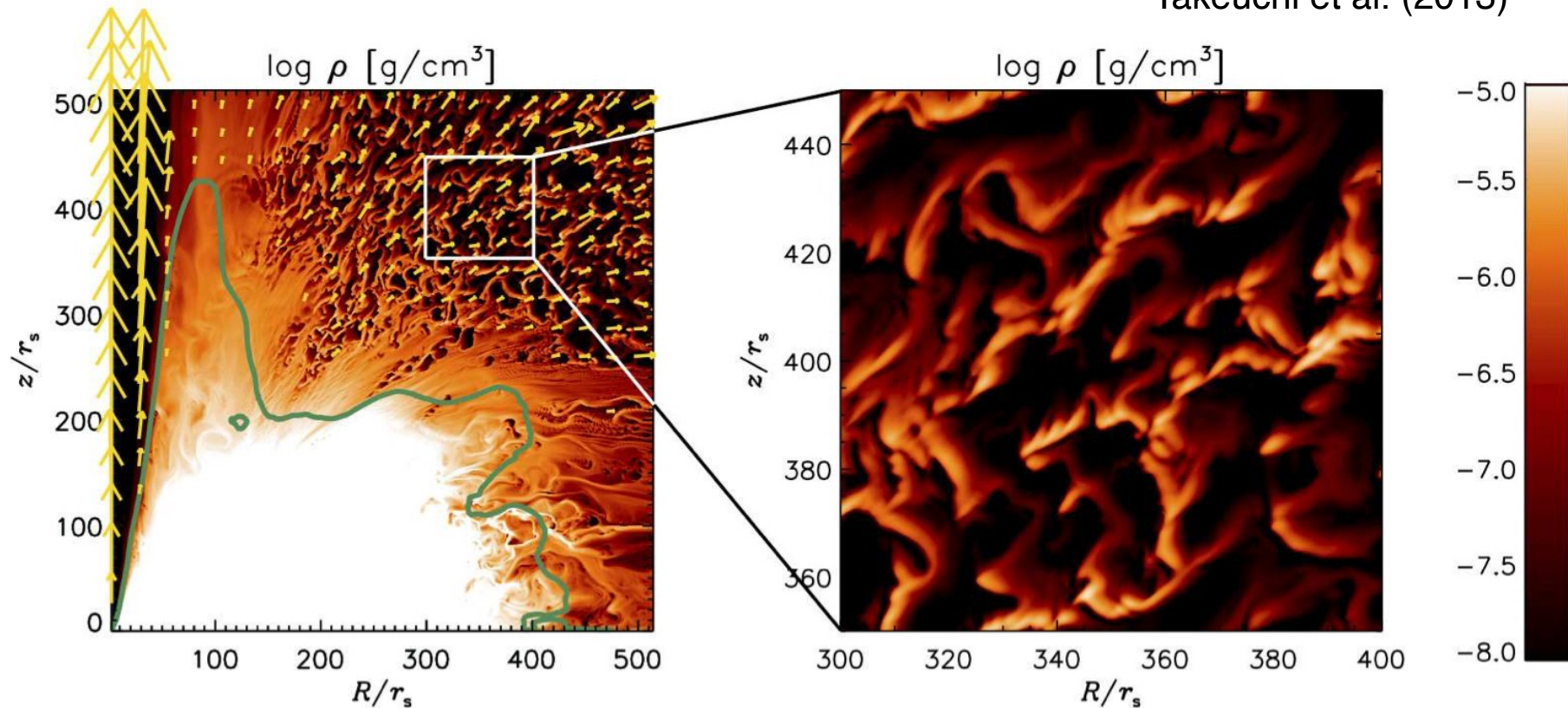
- star formation terminated
- large BH/spheroid - efficient feedback
- halo grows to "large group" scales: mergers become inefficient
- growth by "dry" mergers



Hopkins et al. (2008)

Multi-Velocity UFO の形成メカニズム

Takeuchi et al. (2013)

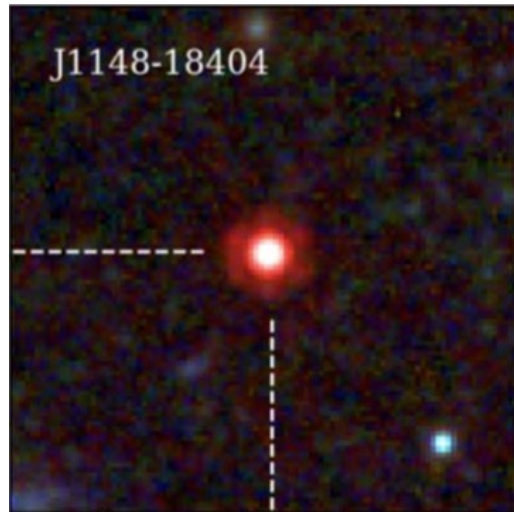


☆ 2D 輻射磁気流体シミュレーションでは、super Eddington で輻射駆動でクランピーな UFO が予想 (e.g., Takeuchi et al. 2013)

☆ 予想されるクランプサイズ & 場所が XRISM の観測に近い

➔ 輻射駆動と無矛盾。MHD 駆動の寄与がどの程度かは今後の課題

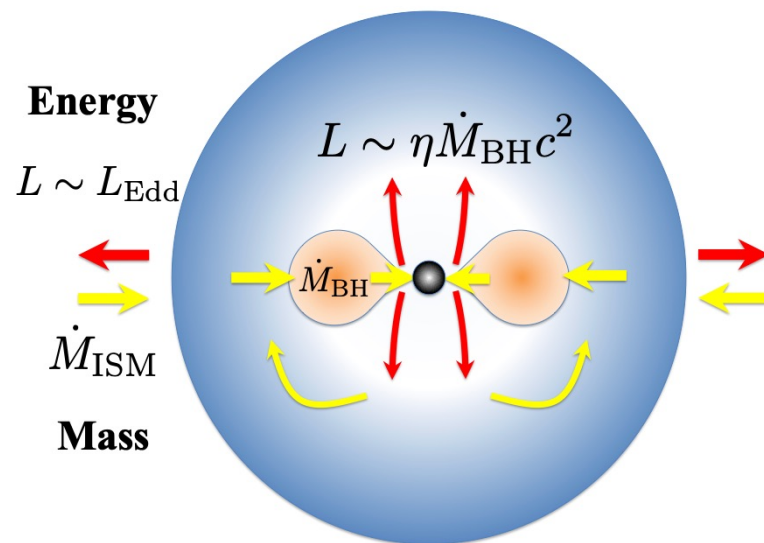
High-z との関連 ~Little Red Dots~



Matthee et al. (2024)

☆ JWST により多数の Little Red Dots 発見

- Redshift $z > 4$
- Compact size ~ 100 pc
- SED V-shape
- Broad lines $v \sim 1000$ km/s
- Very weak X-ray/radio
- Low variability

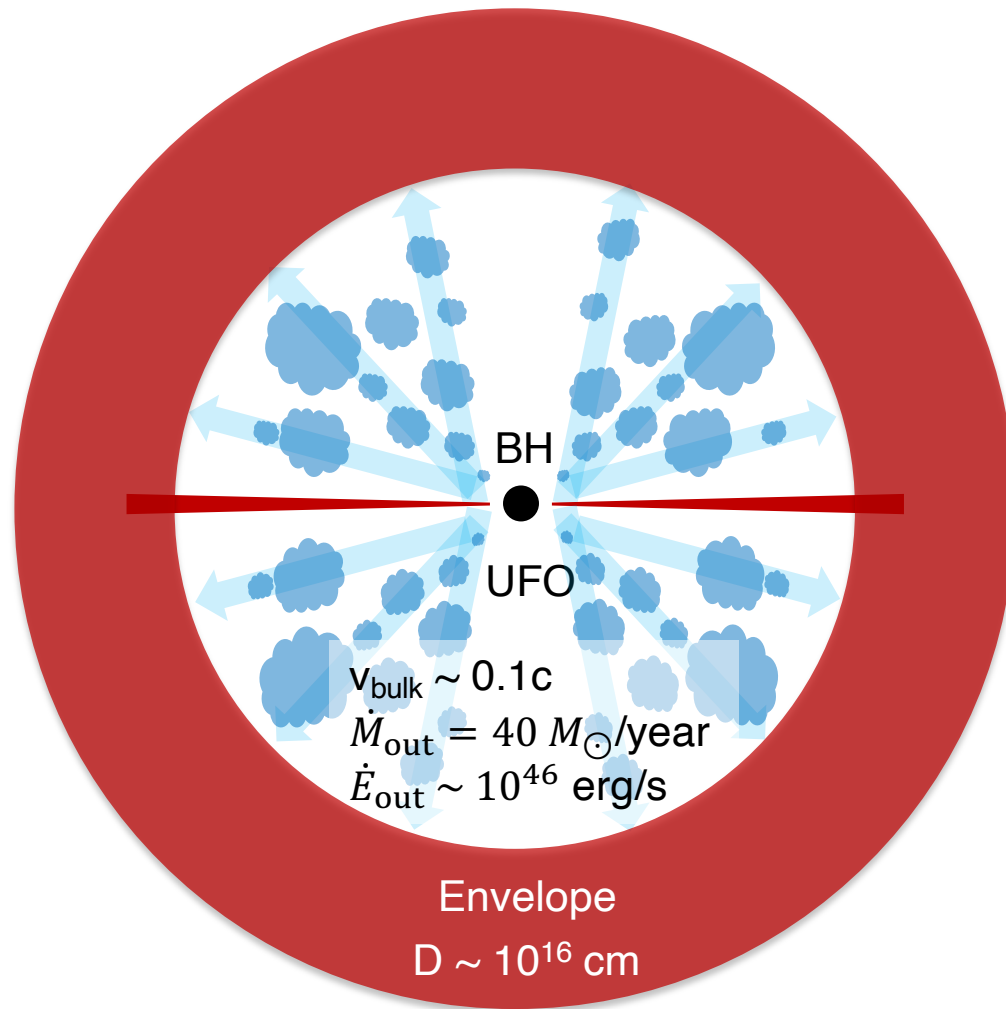


Kido et al. (2025)

☆ BH super-Eddington accretion を封じ込める光学的に厚い envelope (BH star) で説明 (Kido et al. 2025; Inayoshi 2025)

➡ 詳しくは稲吉さんトーク

XRISM で捉えた UFO は BH star と整合的か？



☆ PDS 456、IRAS 05189-2524 はともに、super-Eddington source

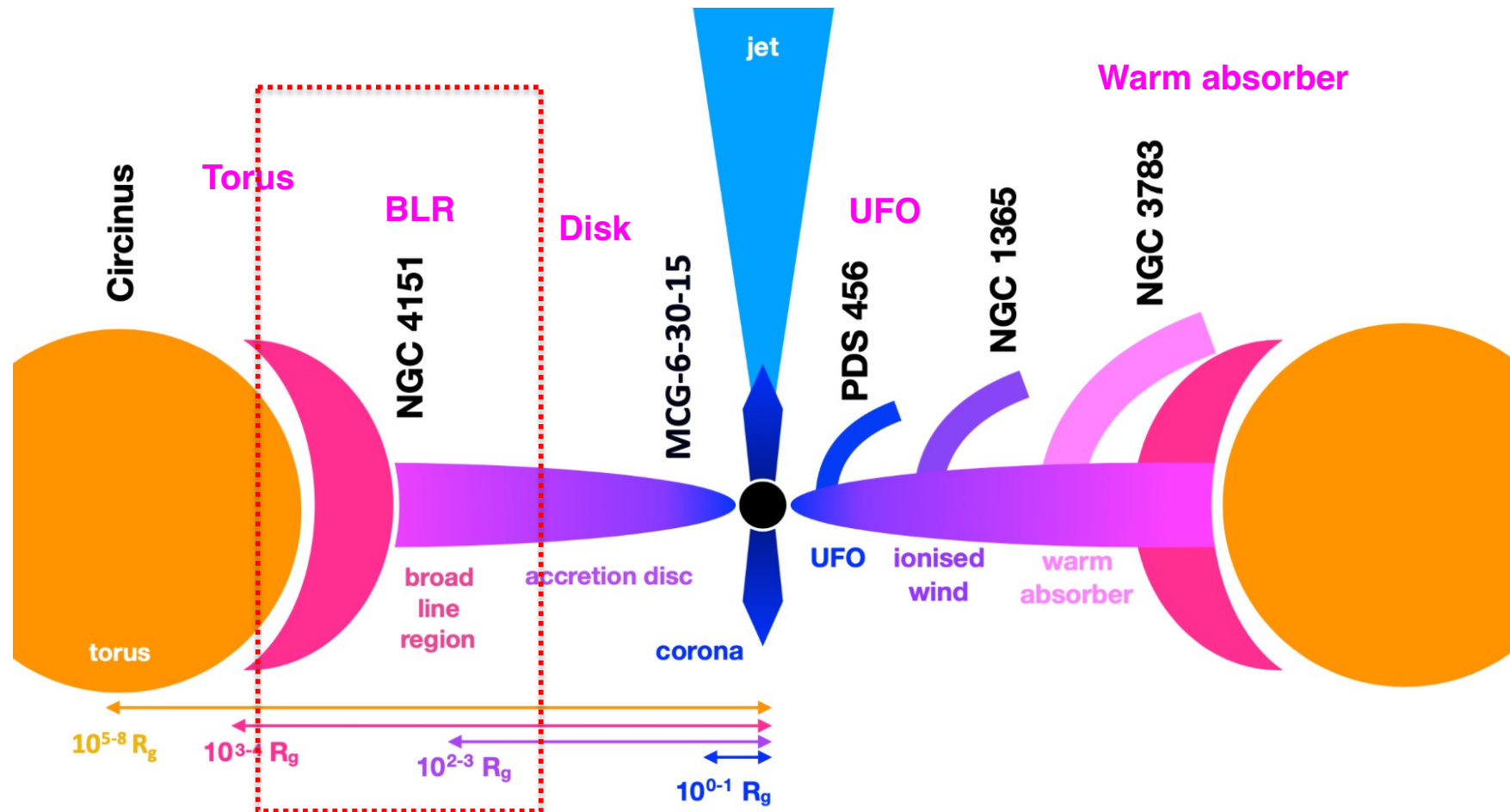
☆ XRISM 観測により、BH への super-Eddington accretion が起こると Multi-velocity UFO が形成されると判明

- $\Omega \sim 4\pi$
- $v_{\text{bulk}} \sim 0.1c$
- $\dot{E}_{\text{out}} \sim 10^{46} \text{ erg/s} (\sim 5 L_{\text{Edd}})$

☆ 内側からの強力な UFO に晒される状況で、BH star envelope を維持できるのか？

XRISM で探る降着流

~広輝線領域 & ダストトーラスの構造~



広輝線領域の形成メカニズム

BLR 形成メカニズムの候補 (Czerny 2019)

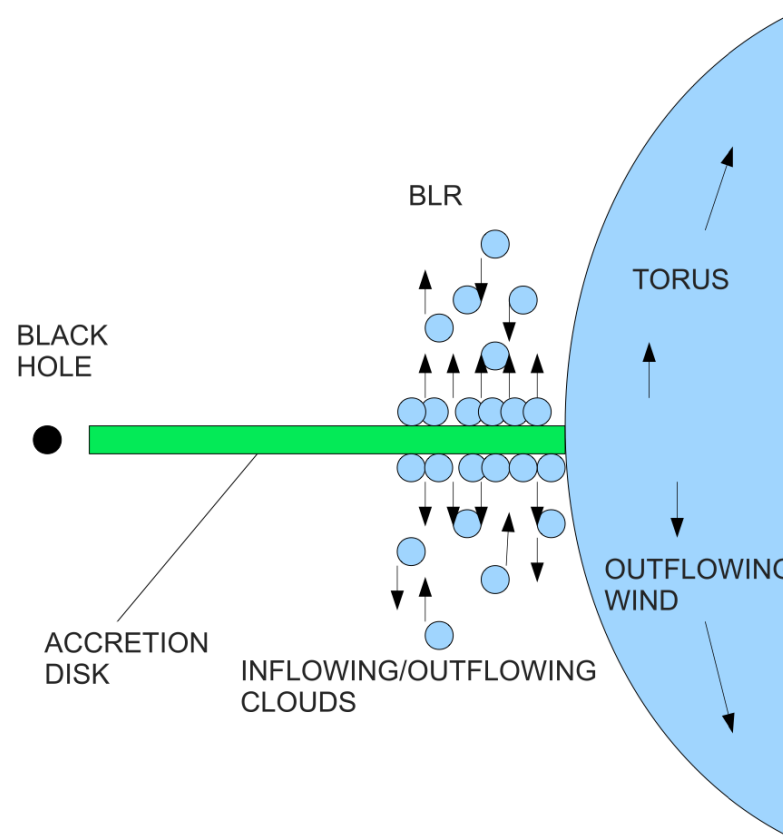
Czerny & Hryniewicz (2011)

インフロー的

- ① 円盤分裂 + 星形成・超新星爆発
(e.g., Wang et al. 2011)
- ② 外側の領域からのインフロー
(e.g., Hu et al. 2008)

アウトフロー的

- ③ 輻射圧による円盤大気上昇
(e.g., Baskin & Laor 2019)
- ④ 輻射圧による円盤風
(e.g., Czerny & Hryniewicz 2011)

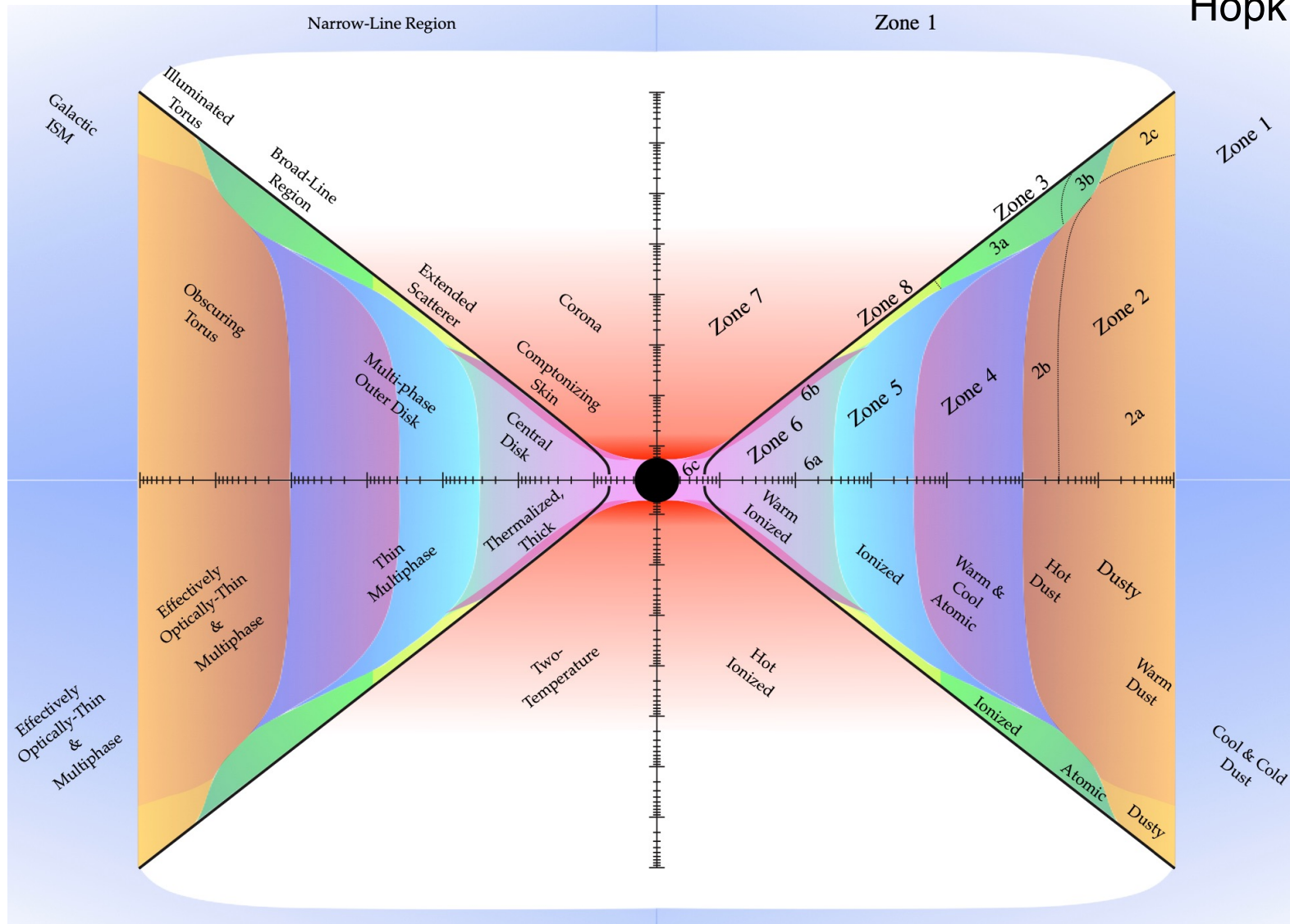


可視光・紫外線広輝線は、特定の電離度の物質に限られる...

広輝線を出す領域の内側/外側に物質分布があっても同定できない

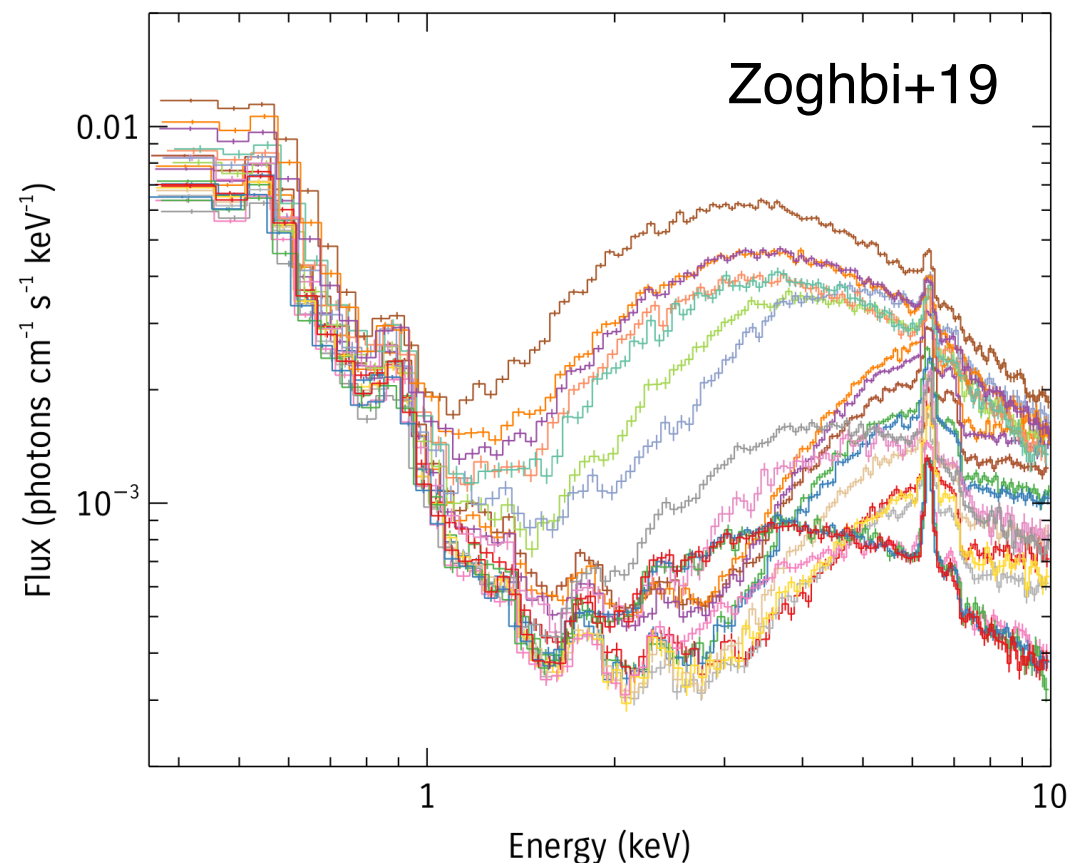
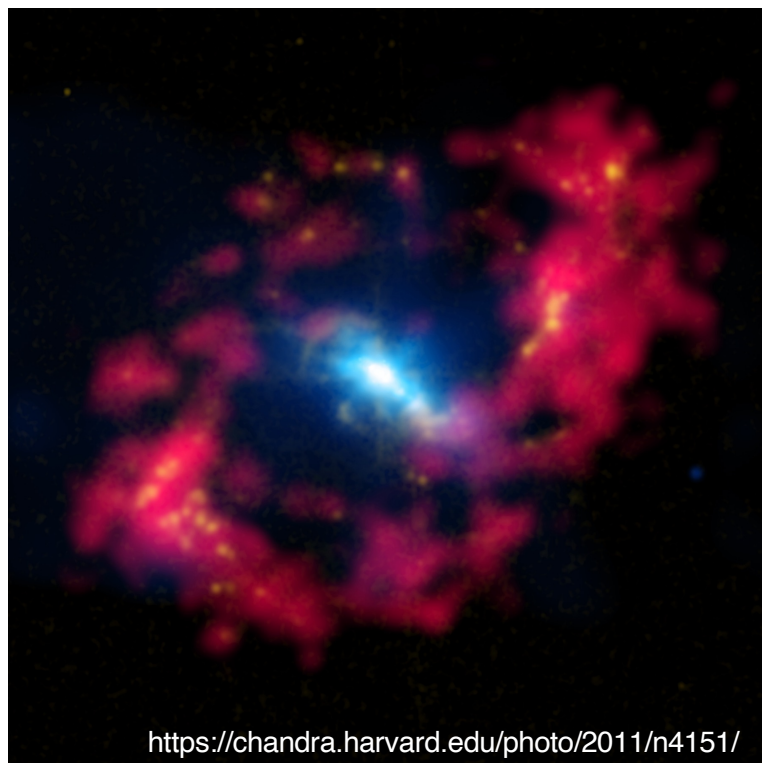
Hyper-Magnetize Accretion Disk モデル

Hopkins (2024)



最近は、銀河から BH まで連続的に物質が分布するモデルも

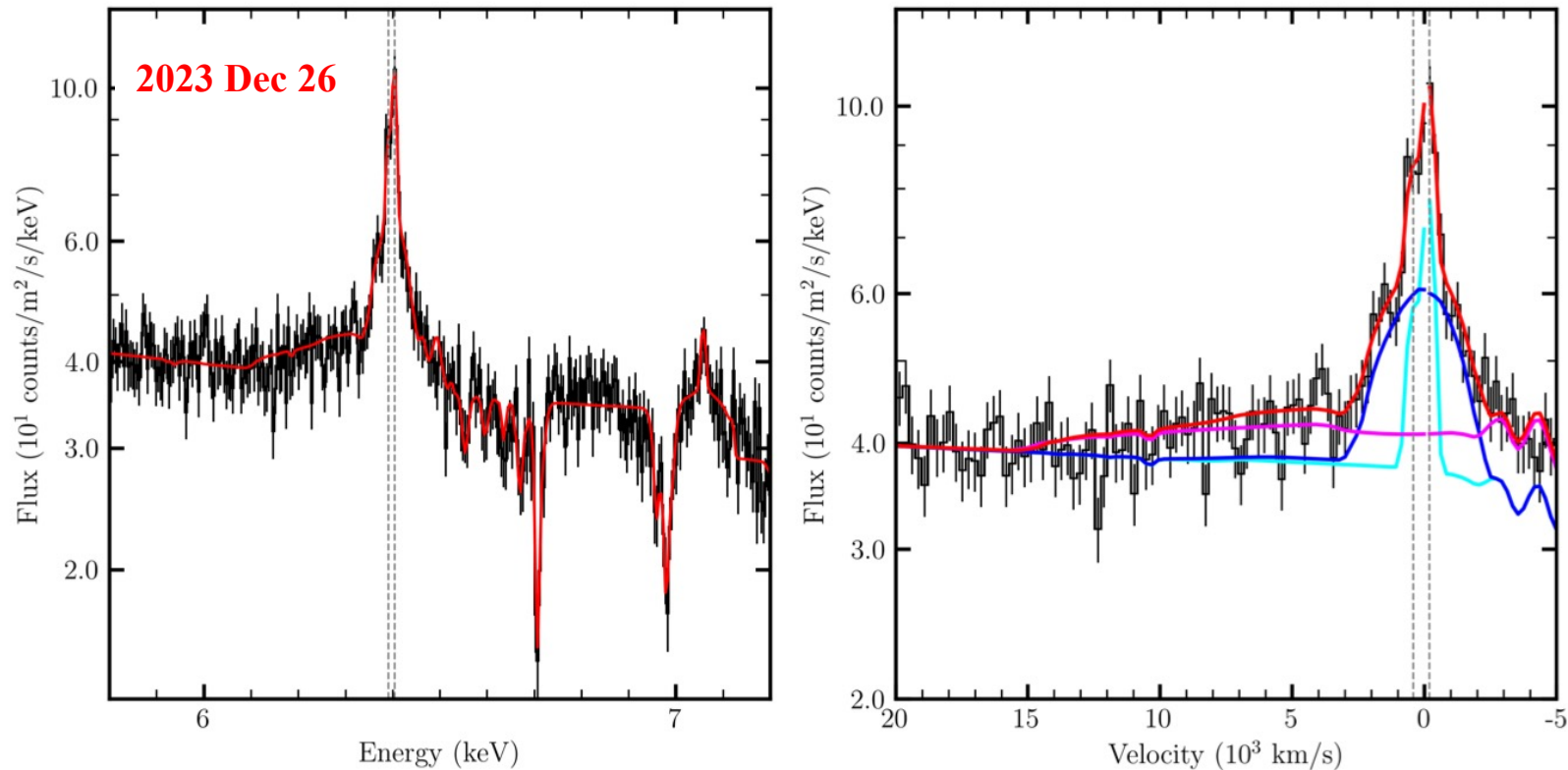
明るいAGN NGC 4151



- ☆ 近傍の1.5型セイファート ($D = 15.8 \text{ Mpc}$, $z = 0.0033$)
- ☆ ブラックホール質量 $M_{\text{BH}} \sim 3.3 \times 10^7 M_{\odot}$ (Bentz+15)
- ☆ X線で明るく軟X線で高い変動性、6.4 keV の Fe-K α 輝線も強い

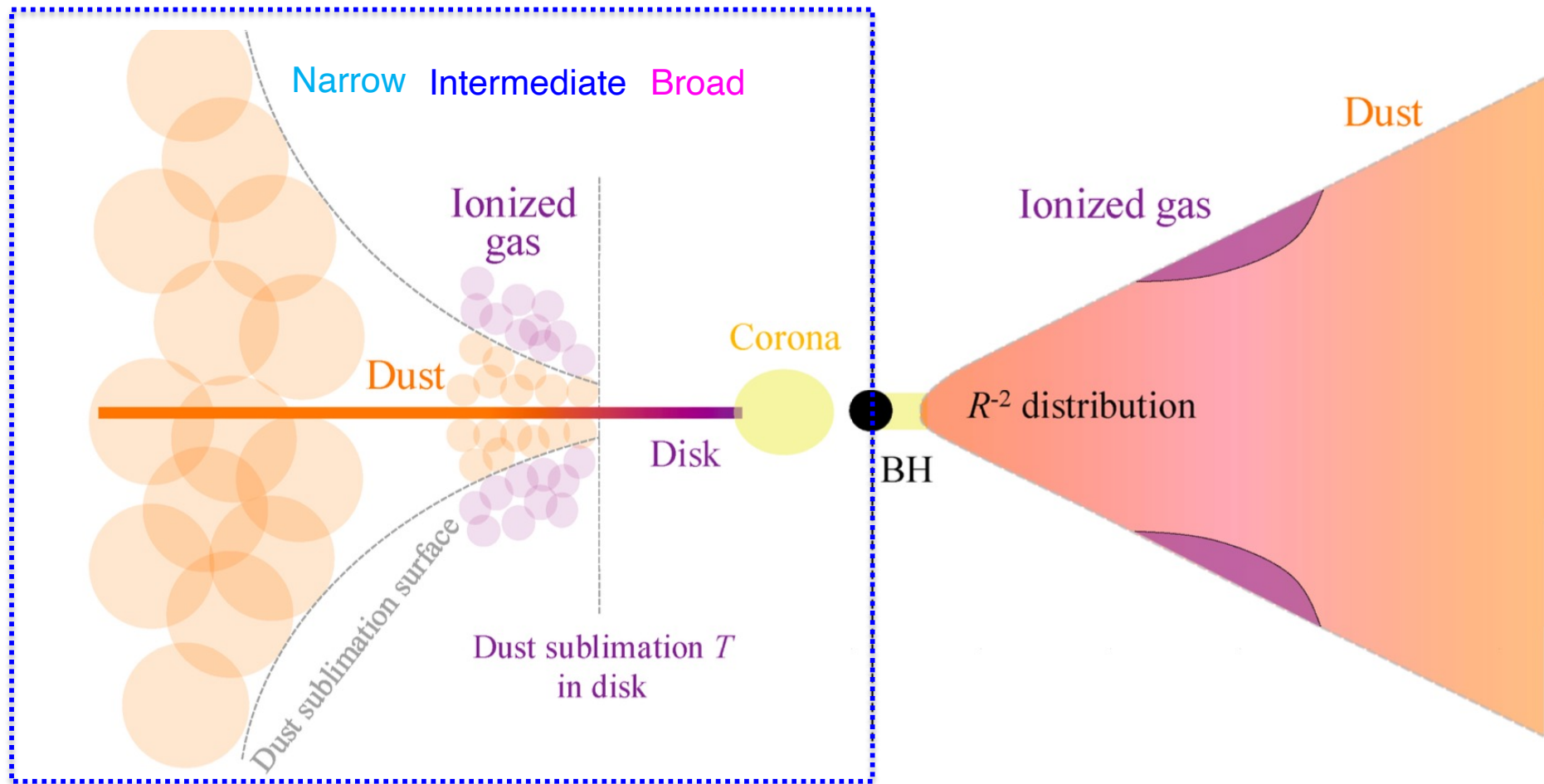
Resolveスペクトル解析の結果

XRISM Collaboration 24



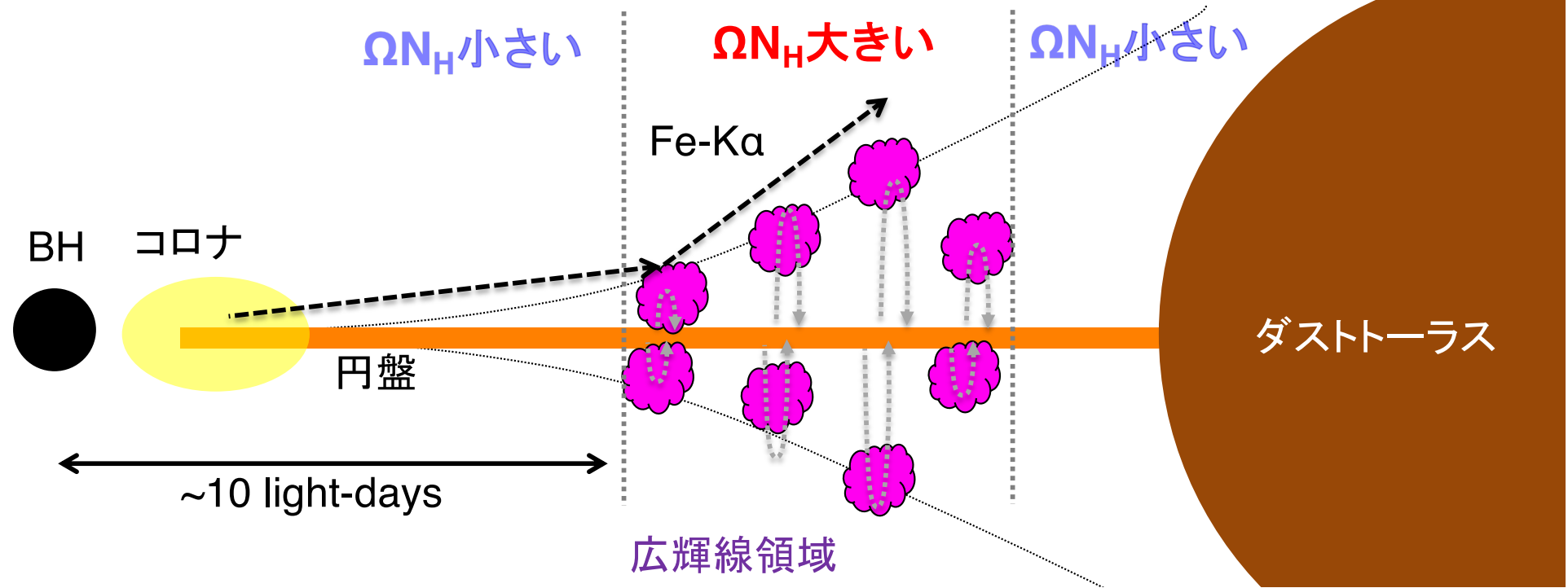
- ☆ 細い Fe-K α , K β 輝線や Fe XXV/XXVI 吸収線を有意に検出
- ☆ 細い Fe-K α は初めて、少なくとも3成分から構成されることが判明
 - Broad $\rightarrow$ 降着円盤? (~ 100 R_g)
 - Intermediate $\rightarrow$ 広輝線領域 (~ 3000 R_g)
 - narrow $\rightarrow$ ダストトールス (~ 10000 R_g)

連続的な物質分布では説明不可



トーラスから BH 近傍まで連続的に物質が分布し、電離状態が変化すると解釈するモデルは Fe-K α が成分に分かれることと不整合

広輝線領域の分布と形成メカニズム



☆ Fe-Kα より、広輝線領域の内縁 & 外縁が存在 → 何が境界を決める？

☆ 内縁部は Fe-Kα 速度幅 ~ 5000 km/s (FWHM) → $R \sim 1 \times 10^{16}$ cm

$$\begin{array}{cc} \text{円盤温度} & \text{光度} \\ \sigma T^4 = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi R^3} & \& L = \frac{GM\dot{M}}{2R_{\text{in}}} \end{array} \rightarrow T = \left(\frac{3LR_{\text{in}}}{4\pi R^3 \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \sim 1500 \text{ K } (\sim T_{\text{dust}})$$

☆ 広輝線領域の内縁半径は、円盤におけるダスト昇華半径に対応

→ 広輝線領域は dusty disk wind 起源? (Czerny & Hryniewicz 2011)

まとめ

- ☆ 2023年9月7日にX線天文衛星 XRISM の打ち上げに成功。
- ☆ X線マイクロカロリメータにより精密X線分光を軌道上で実現。X線CCD カメラで Transient Search を実施中。
- ☆ 巨大ブラックホール降着流・噴出流で様々な新しい知見。
 - 超高速アウトフロー (Ultra-Fast Outflow; UFO) の形成メカニズムは？母銀河へのフィードバックは？
 - ➔ High Eddington AGN で強力な multi-velocity UFO
 - AGN の広輝線領域やトーラスはどう形成されるか？
 - ➔ 広輝線領域 + トーラスからの Fe-K α 成分を分解
 - 相対論的効果で広がった Fe-K α 輝線はリアルか？
 - ➔ 相対論的に広げられた Fe-K α を確認