

Tomo-e GozenとXRISM同時観測による SS 433ジェットの時間変動解析

酒井優輔（D3, 立教大/AIST）

木曽シュミットシンポジウム2026 (2026/06/02-03)

Tomo-e Gozen・多波長関係者による同時観測に感謝いたします。

立教大学の屋上 ～池袋の星空～

池袋でも星は取れるが…

<望遠鏡のスペック>

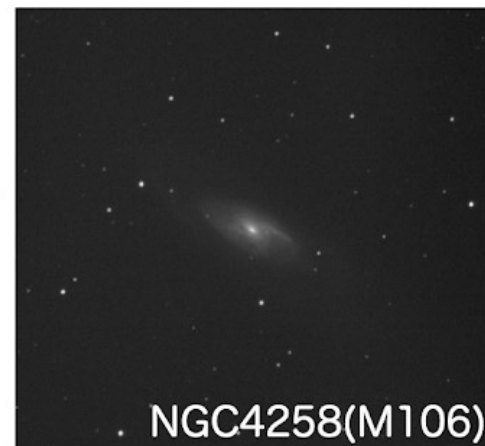
- ・口径：200 mm
- ・焦点距離：760 mm
- ・F値：3.8
- ・視野：86.8 × 59.1 arcmin



露光時間：18分



6分



4分



8分



12分

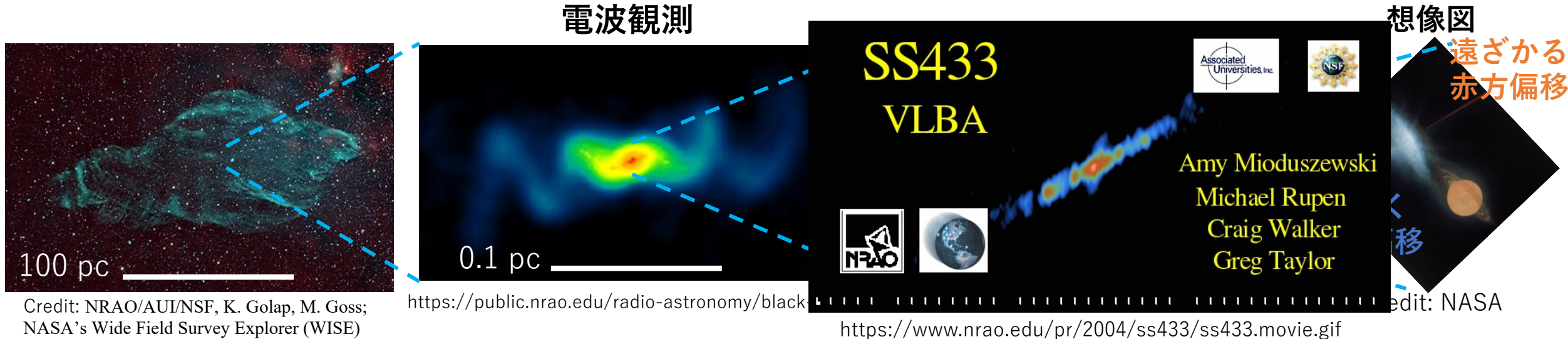


36分

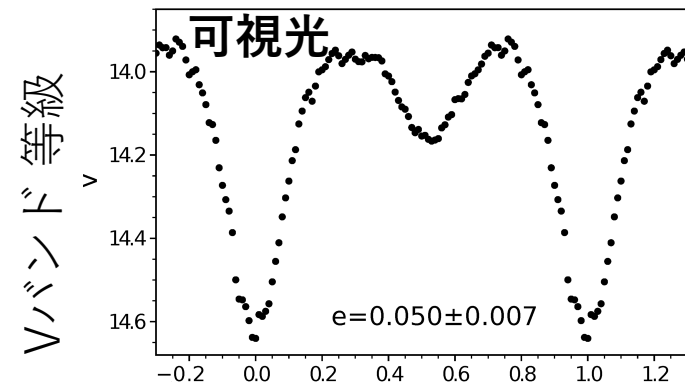
2024/01/07 立教大学池袋キャンパス屋上からの星空（可視撮像観測）

1. SS 433のX線の秒角スケールの空間構造
2. X線と可視光同時観測による成果

先行研究 - W50/SS433とは



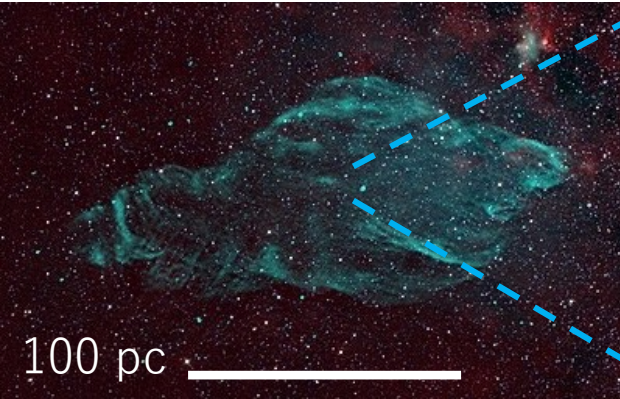
- ・ 電波星雲 W50 の中心部にマイクロクエーサーSS433
- ・ SS433はコンパクト星（**ブラックホール or 中性子星**）とA型超巨星の連星系
- ・ 距離：約5.5 kpc（18,000光年）
- ・ 伴星の公転周期：13.082日
- ・ ジェットは傾斜角 80° であり、赤方偏移、青方偏移した $H\alpha$ 輝線を観測 (Margon+1979) Cherepashchuk+2021
- ・ 歳差運動（ ~ 160 日周期）、光速の26%の速度でジェットを放出 (Margon+1979)



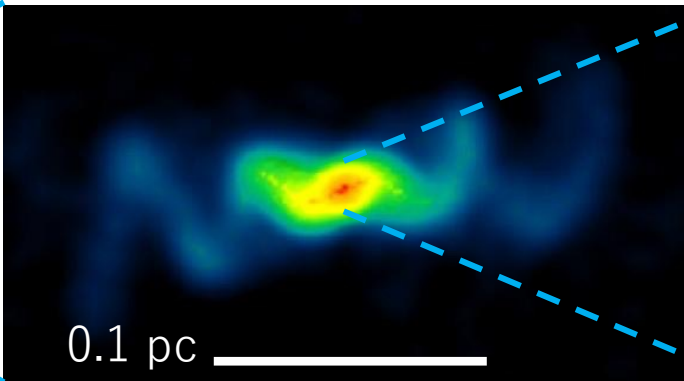
近傍かつ安定したバリオンジェットを持つため、空間構造と時間変動を詳細に研究できる貴重な天体である

先行研究 - W50/SS433とは

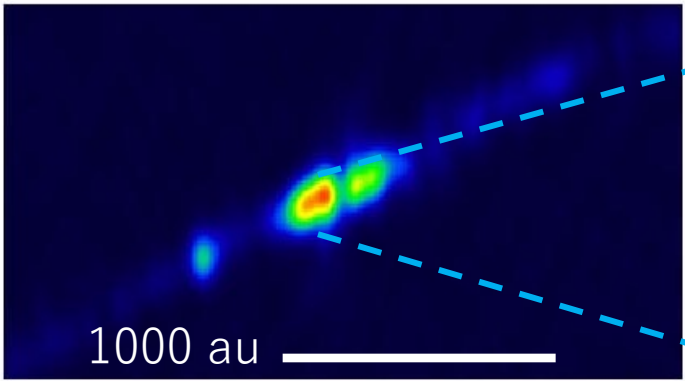
電波観測



Credit: NRAO/AUI/NSF, K. Golap, M. Goss;

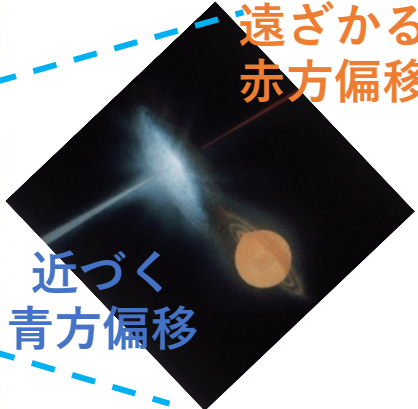


<https://public.nrao.edu/radio-astronomy/black-holes/>



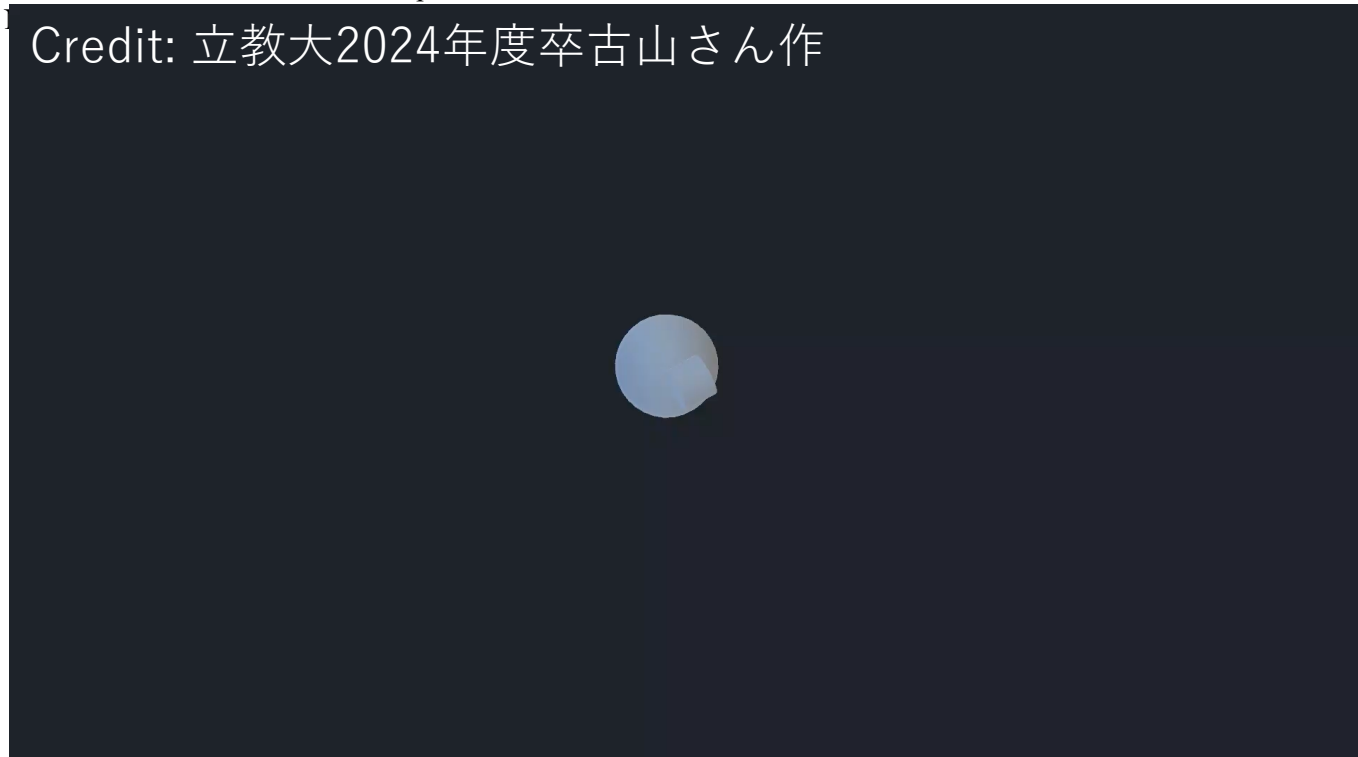
Credit: Mioduszewski et al., NRAO/AUI/NSF

想像図

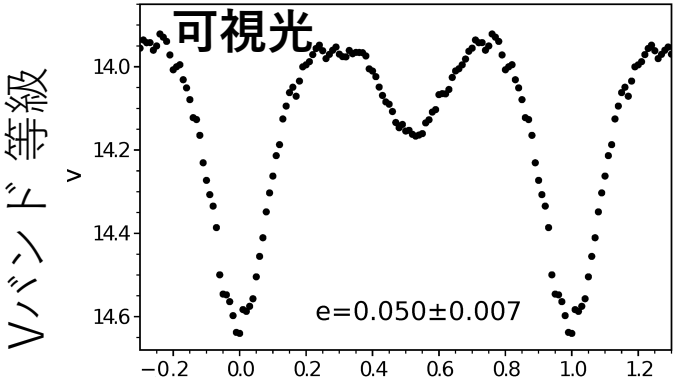


Credit: NASA

Credit: 立教大2024年度卒古山さん作



超巨星の連星系

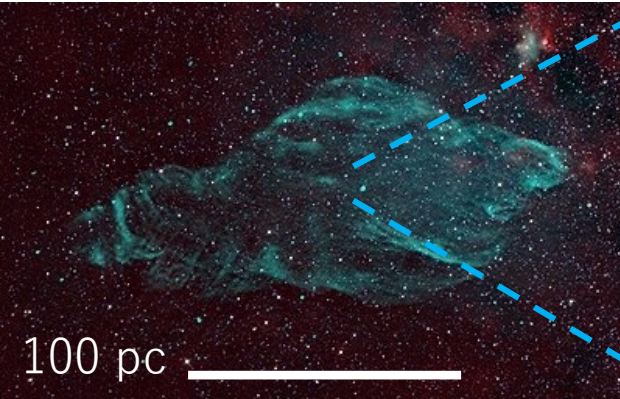


輝線を観測 (Margon+1979) Cherepashchuk+2021
出 (Margon+1979)

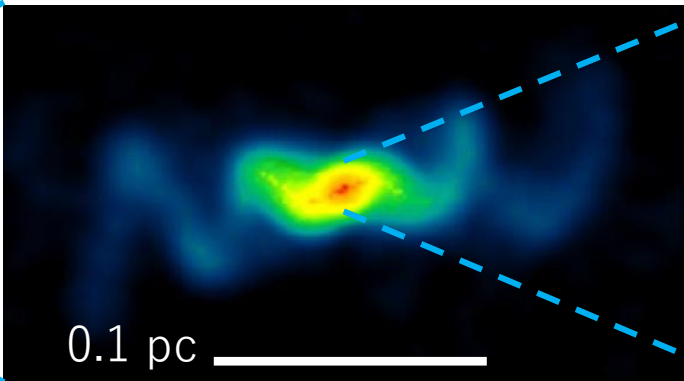
時間変動を詳細に研究できる貴重な天体である

先行研究 - W50/SS433 電波観測とX線観測の比較

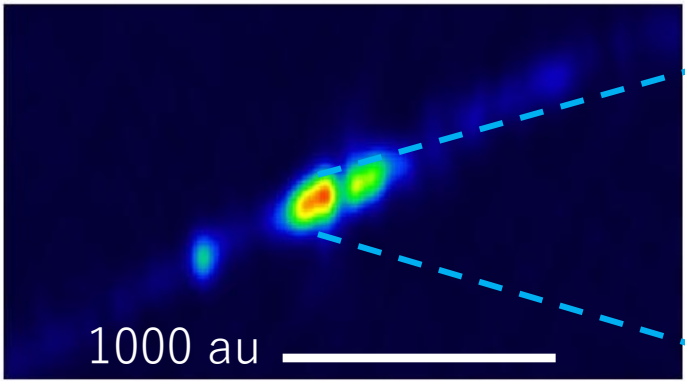
電波観測



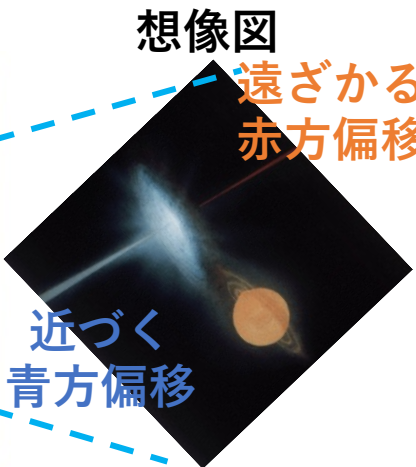
Credit: NRAO/AUI/NSF, K. Golap, M. Goss;
NASA's Wide Field Survey Explorer (WISE)



<https://public.nrao.edu/radio-astronomy/black-holes/>

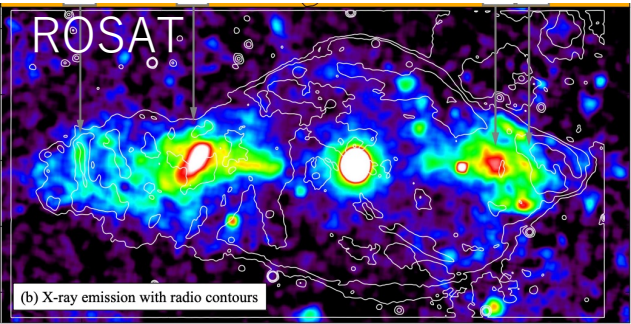


Credit: Mioduszewski et al., NRAO/AUI/NSF

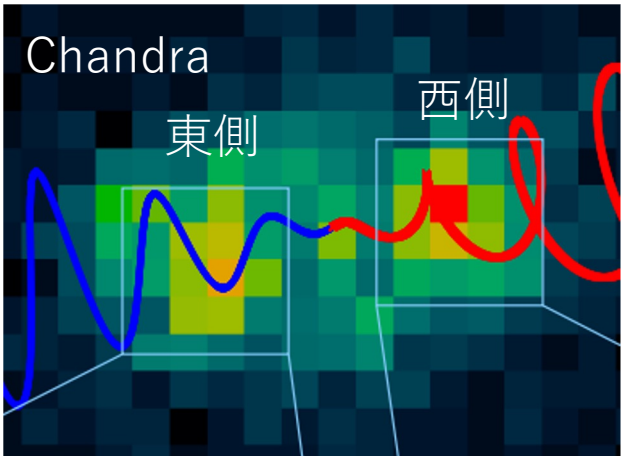


Credit: NASA

X線観測

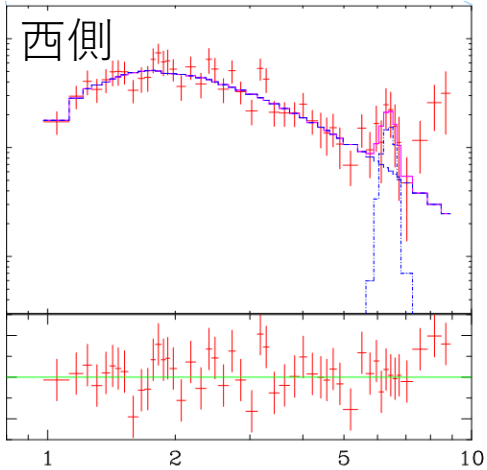
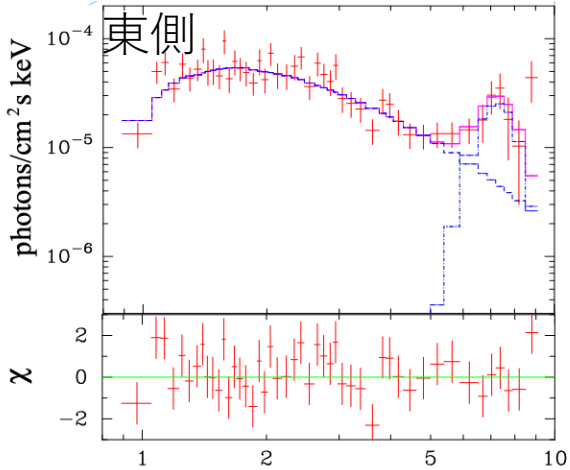


Goodall et al. 2011; Brinkmann et al. 1996



X線 (Migliari+2002)

中心部はパイルアップしている

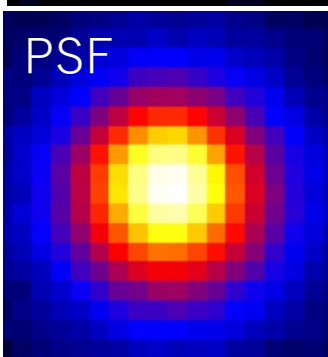
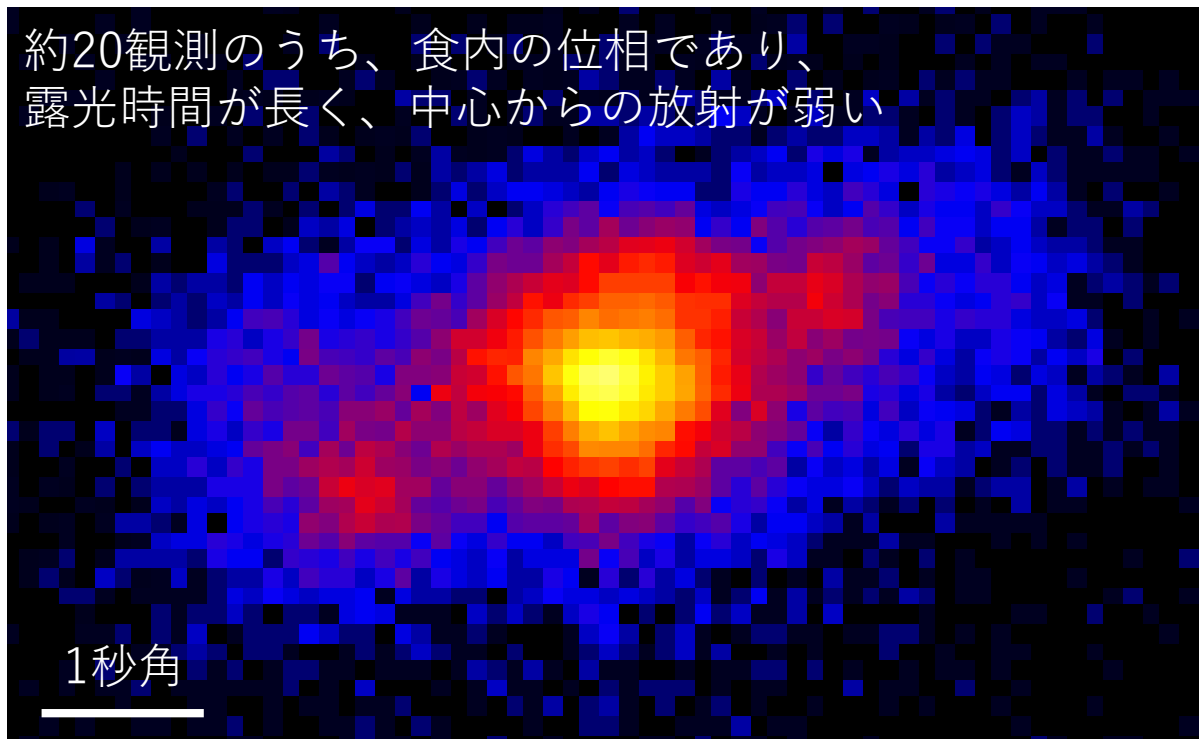


熱的放射であると考えられている (Migliari+2002)

画像デコンボリューションでジェットの詳細な構造を鮮明化

Chandra衛星の観測画像 (0.5-8 keV, 2014年, ~140 ks)

約20観測のうち、食内の位相であり、
露光時間が長く、中心からの放射が弱い

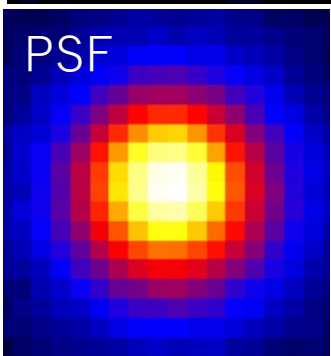
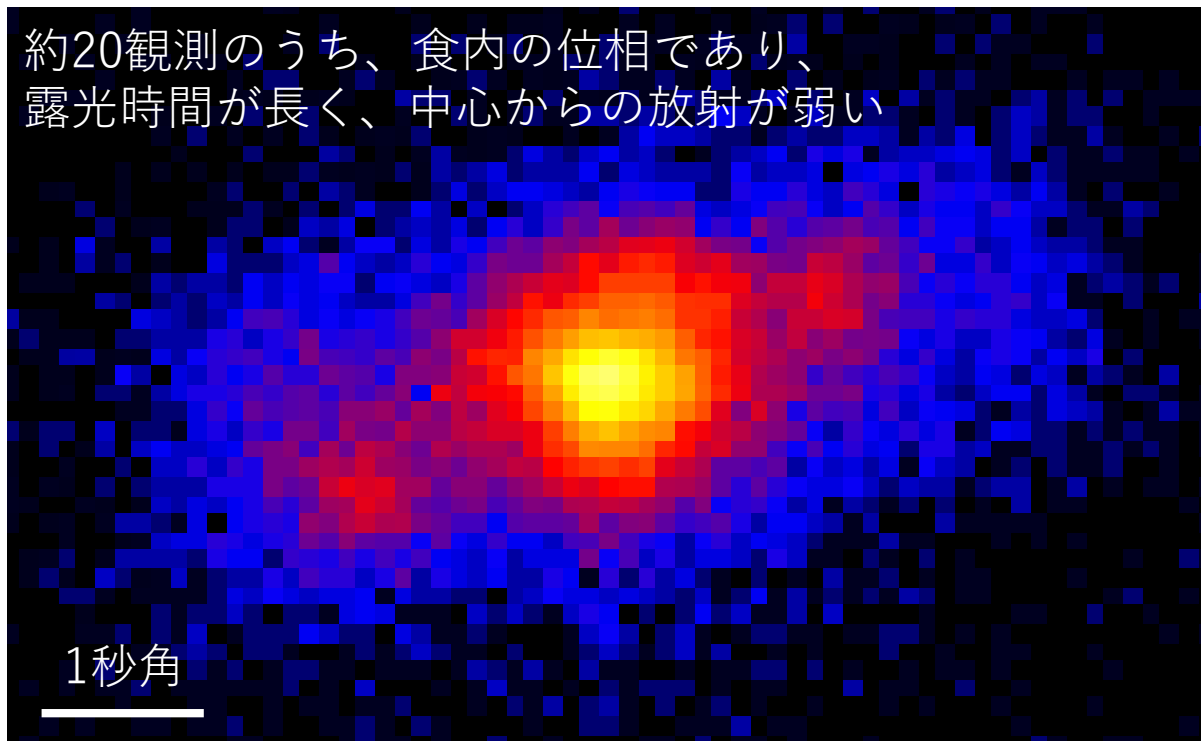


中心部のパイルアップは非常に小さい

画像デコンボリューションでジェットの構造を鮮明化

Chandra衛星の観測画像
(0.5-8 keV, 2014年, ~140 ks)

約20観測のうち、食内の位相であり、
露光時間が長く、中心からの放射が弱い

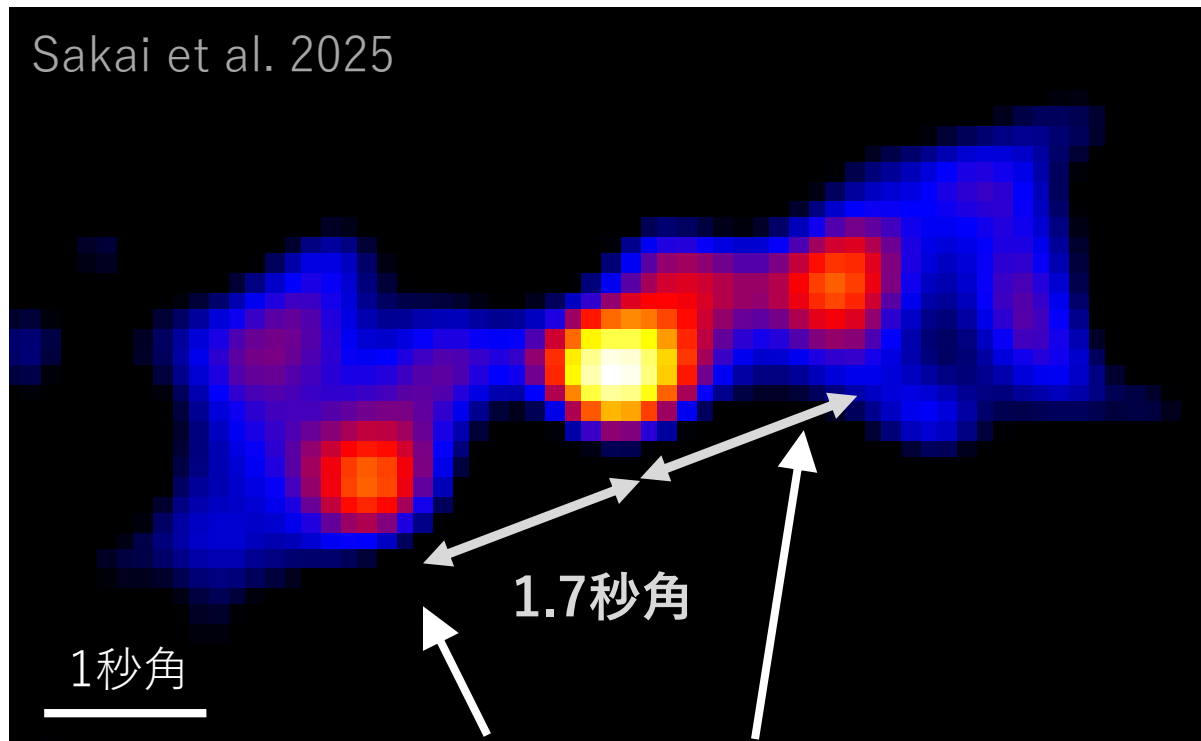


中心部のパイルアップは非常に小さい

デコンボリューション法

Richardson-Lucy法 (Richardson '72, Lucy '74)

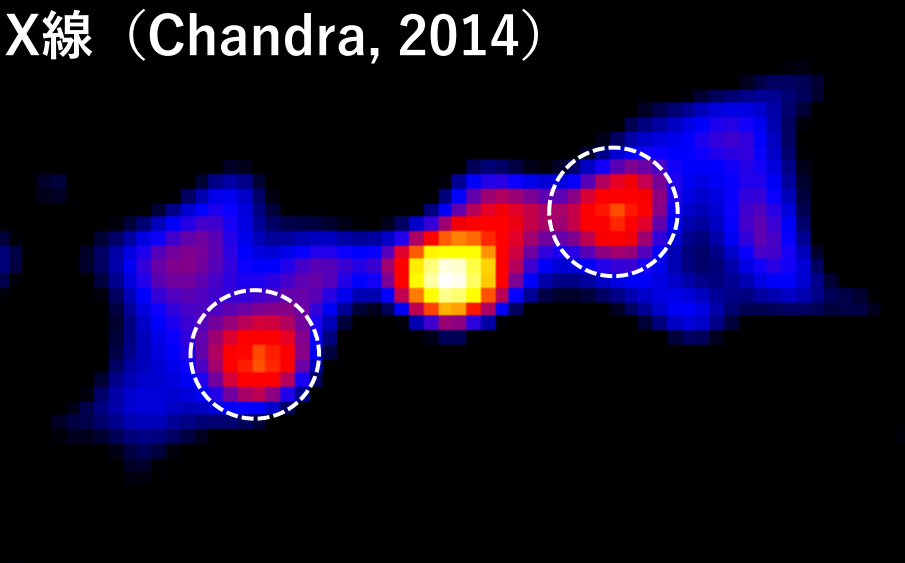
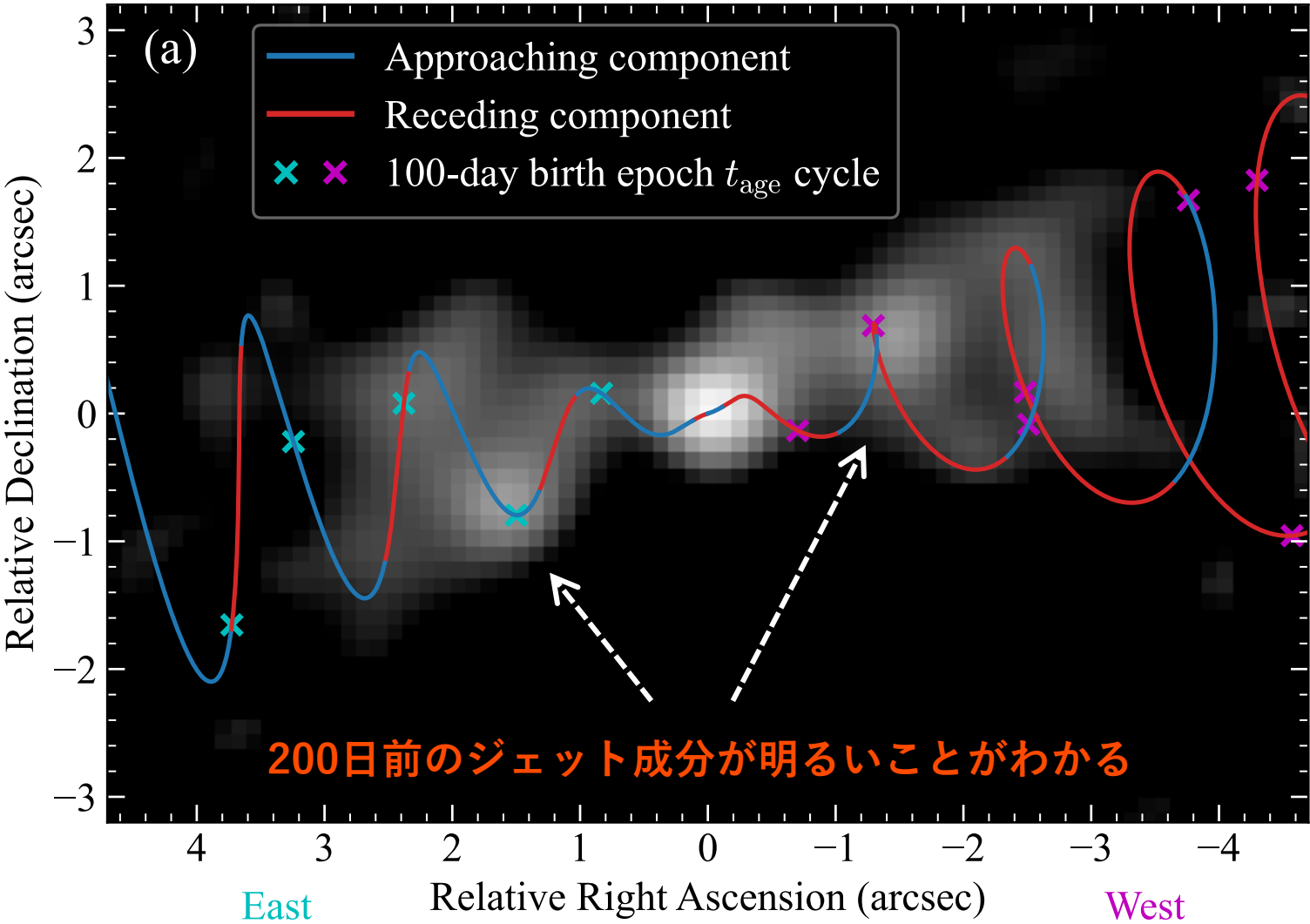
Sakai et al. 2025



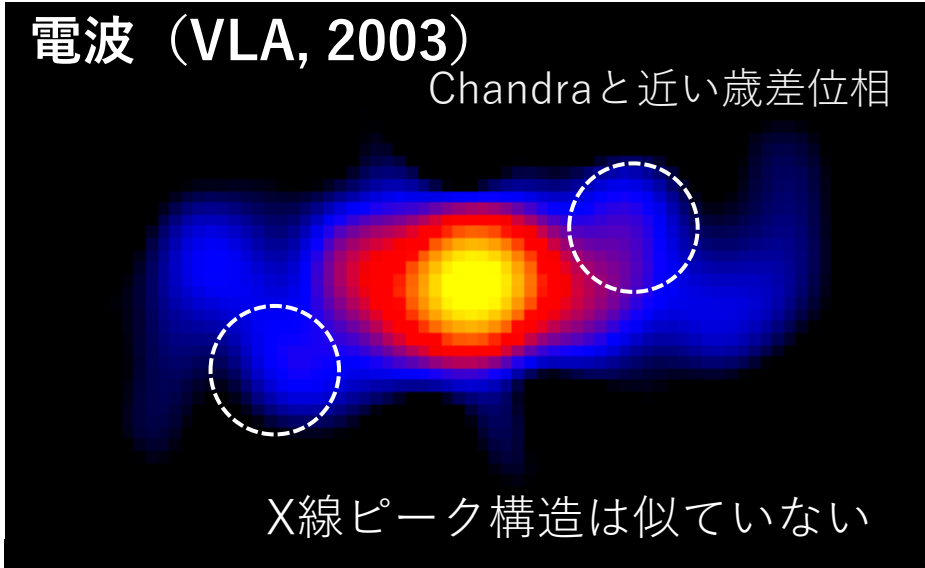
中心から1.7 秒角= 10^{17} cm @ 5.5 kpcに
2つのノット構造を確認

X線画像を電波や歳差ジェットモデルと比較

Chandra画像と歳差ジェットモデルの比較

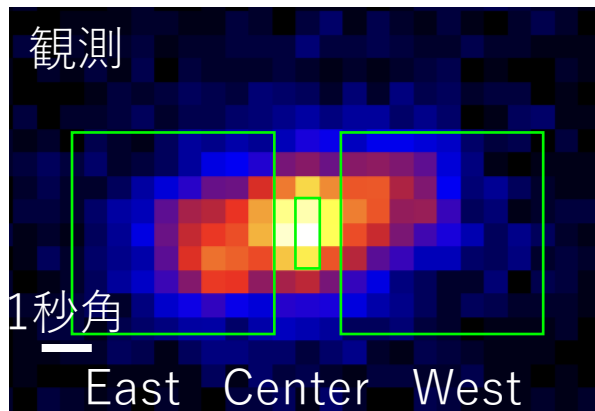
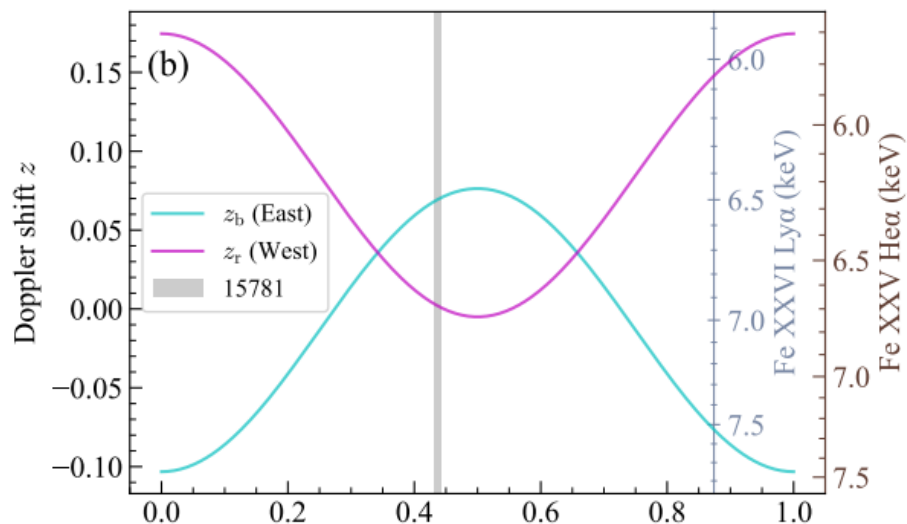


↕ 空間構造が両バンドで類似



中心と外側でスペクトルの形状が異なる

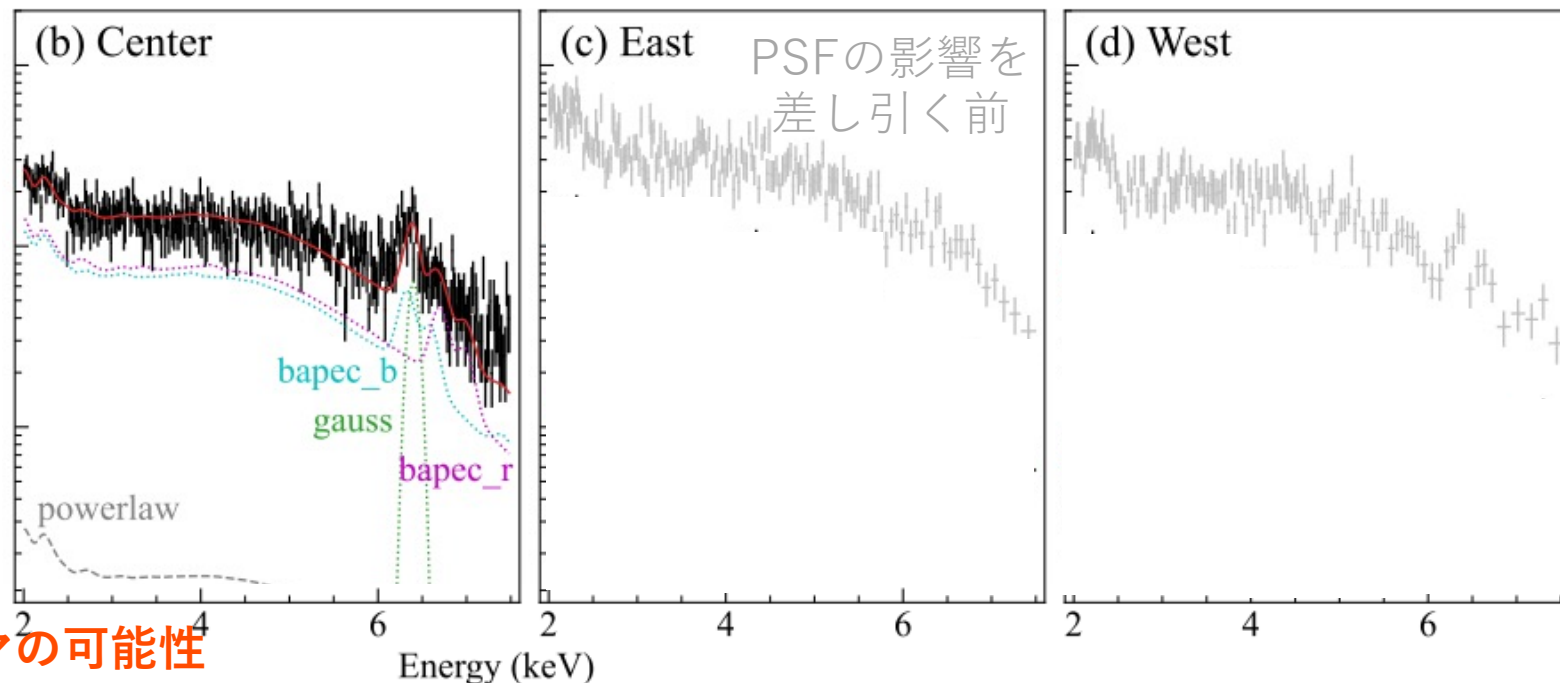
観測の歳差位相



モデル: $\text{tbabs} * (\text{bapec}_b + \text{bapec}_r + \text{gauss} + \text{powerlaw})$

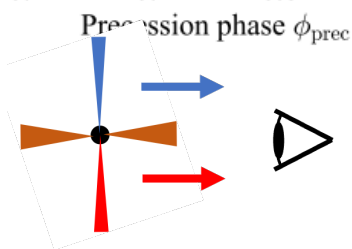
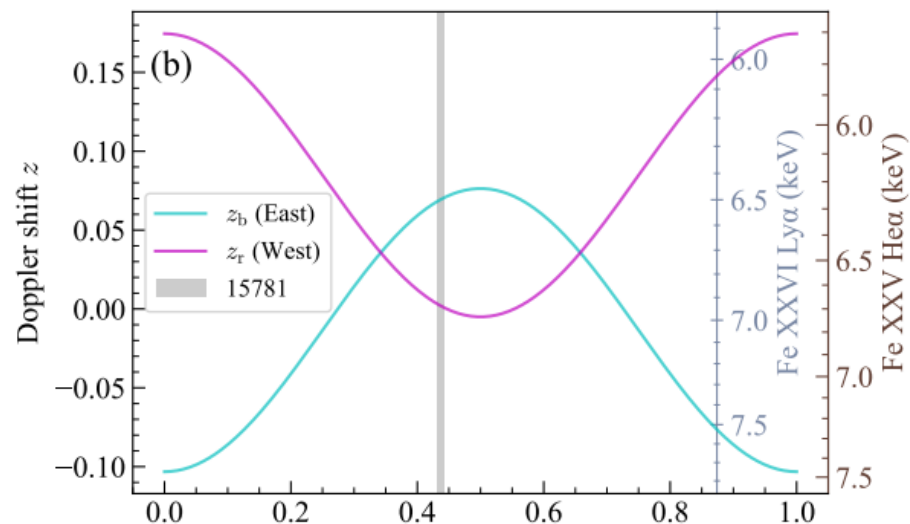
根本のジェットの向きは視線垂直方向
→その歳差位相に対応するdoppler shift
で、中心領域のスペクトルを説明可能

外側は中心からの漏れ込みを考慮すると
輝線成分は誤差の範囲で見られない
→外側は非熱的放射 or 低温/高温プラズマの可能性



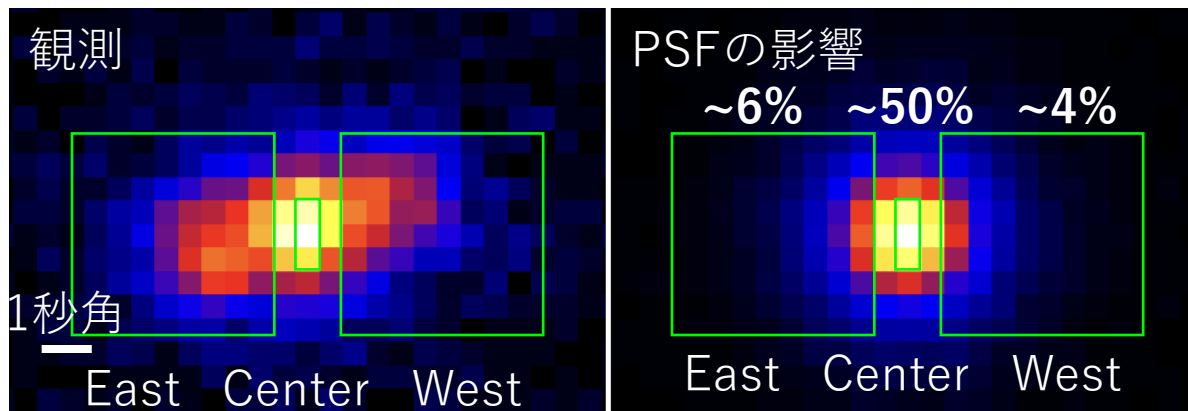
中心と外側でスペクトルの形状が異なる

観測の歳差位相

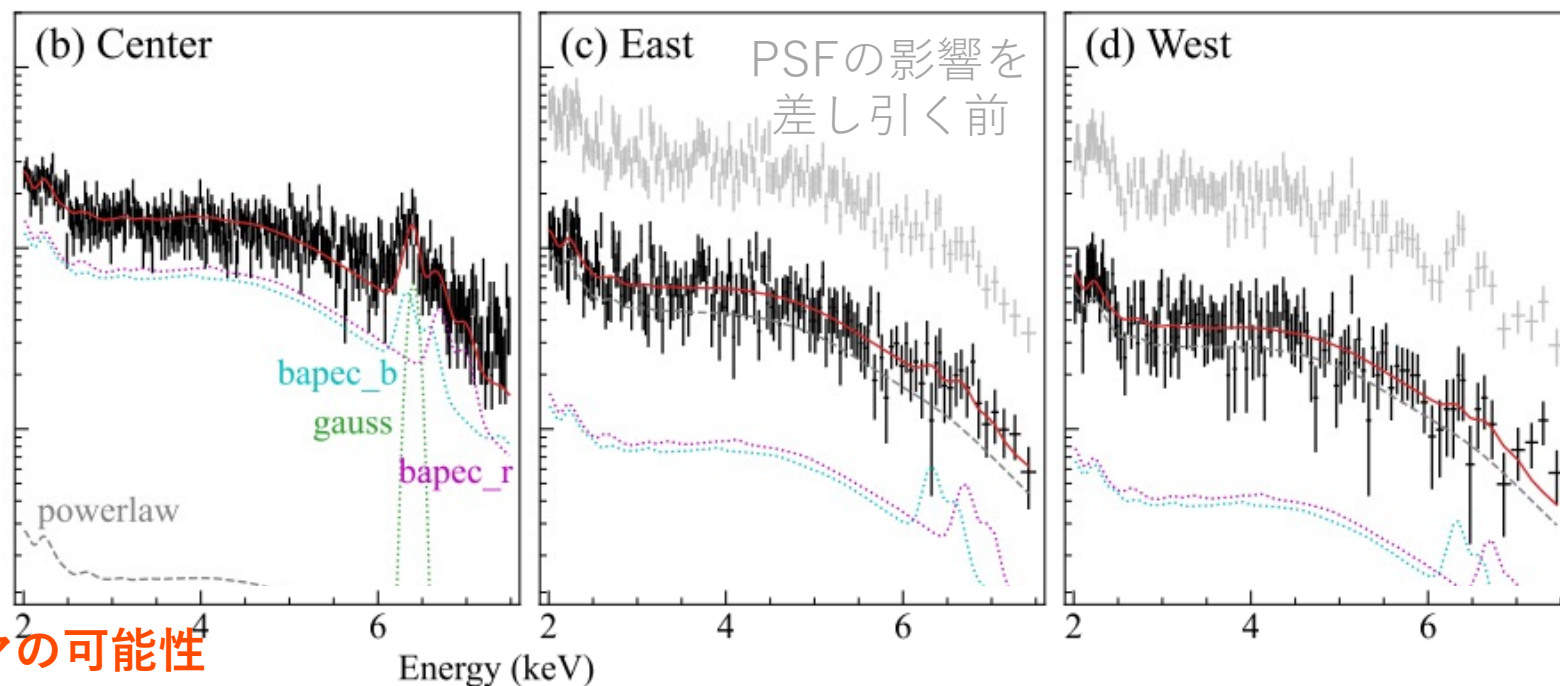


根本のジェットの向きは視線垂直方向
→その歳差位相に対応するdoppler shift
で、中心領域のスペクトルを説明可能

外側は中心からの漏れ込みを考慮すると
輝線成分は誤差の範囲で見られない
→外側は非熱的放射 or 低温/高温プラズマの可能性

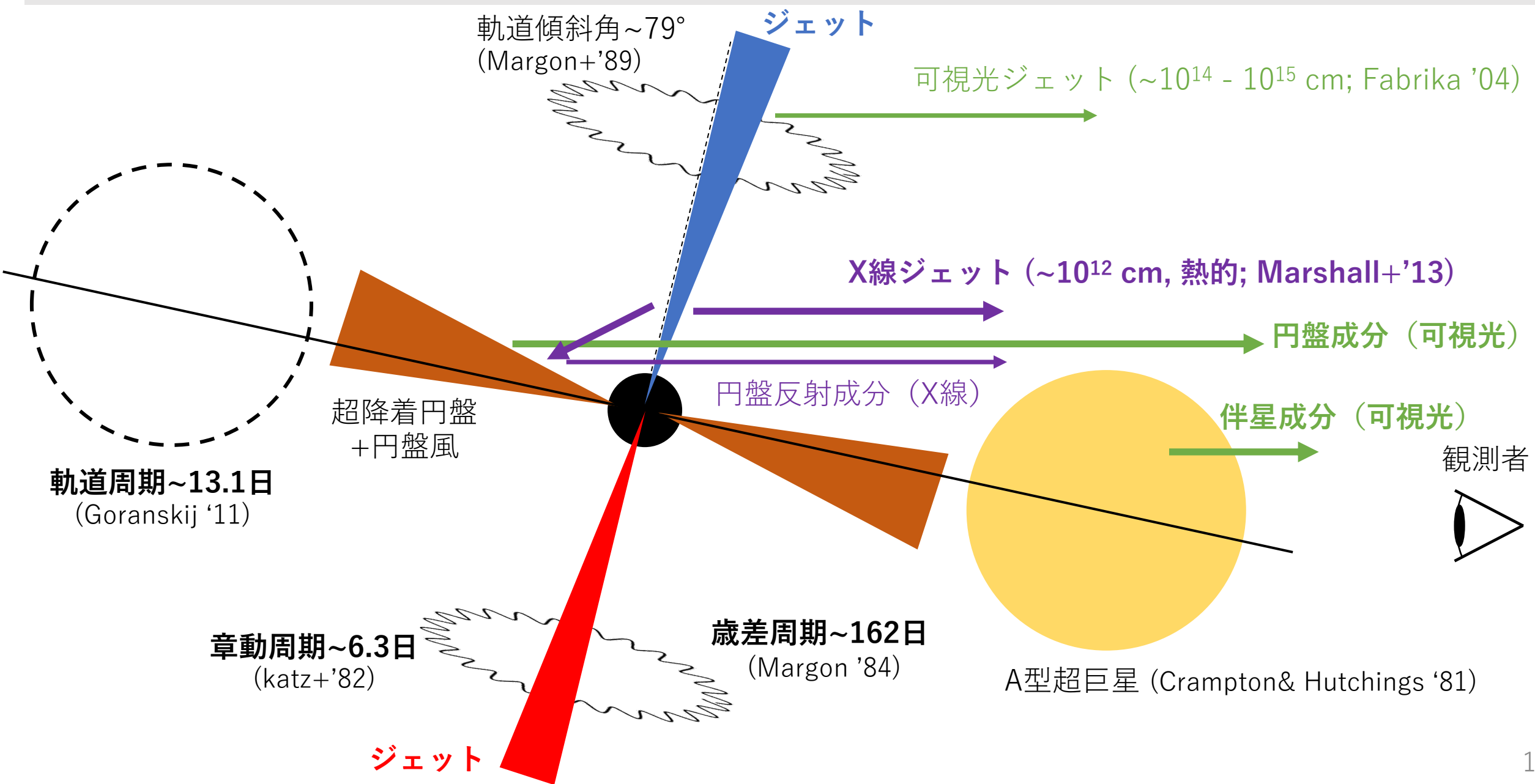


モデル： $\text{tbabs}^*(\text{bapec}+\text{bapec}+\text{gauss}+\text{powerlaw})$

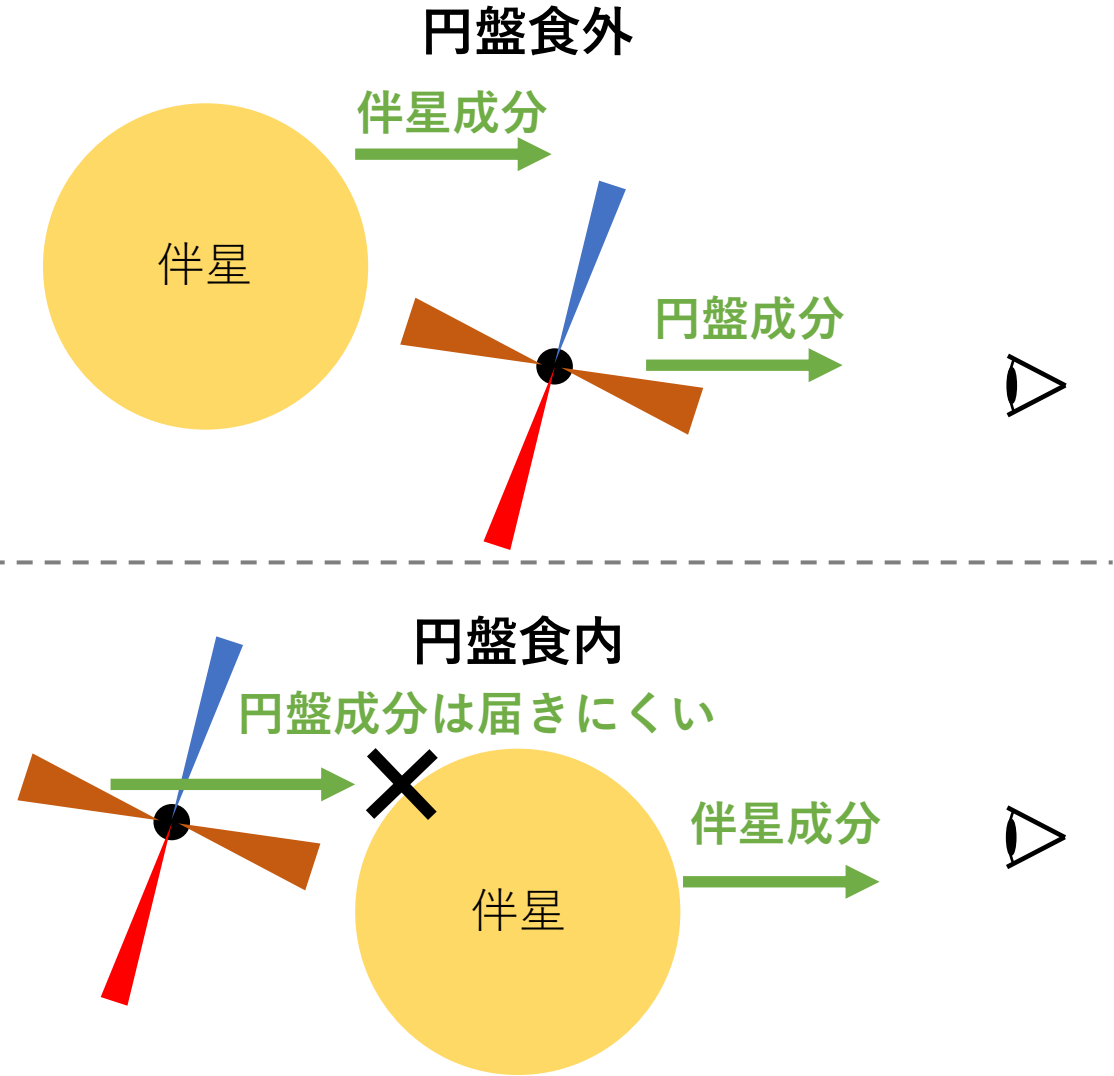
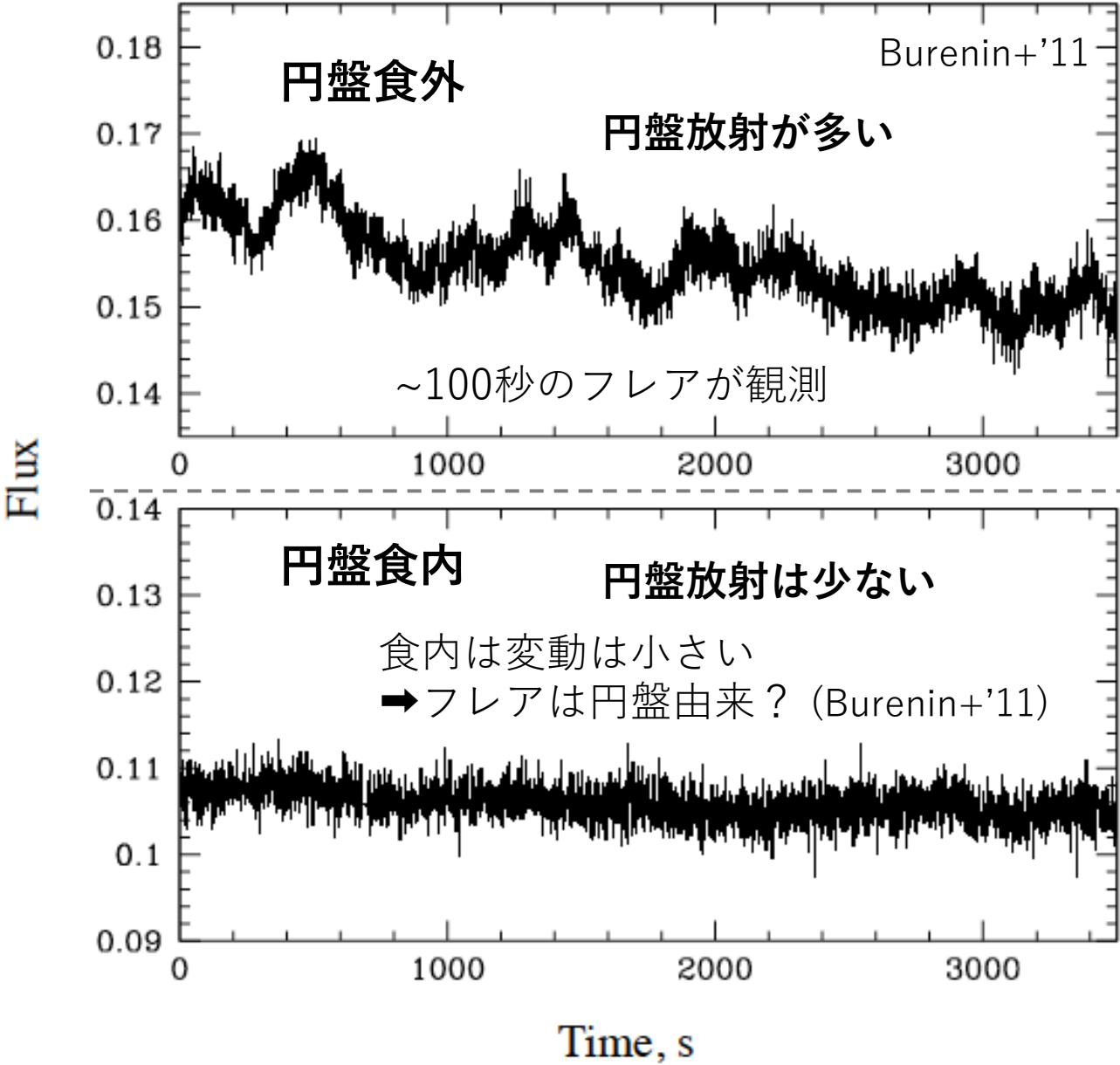


X線と可視光同時観測

研究背景 – SS 433のX線と可視光の放射領域

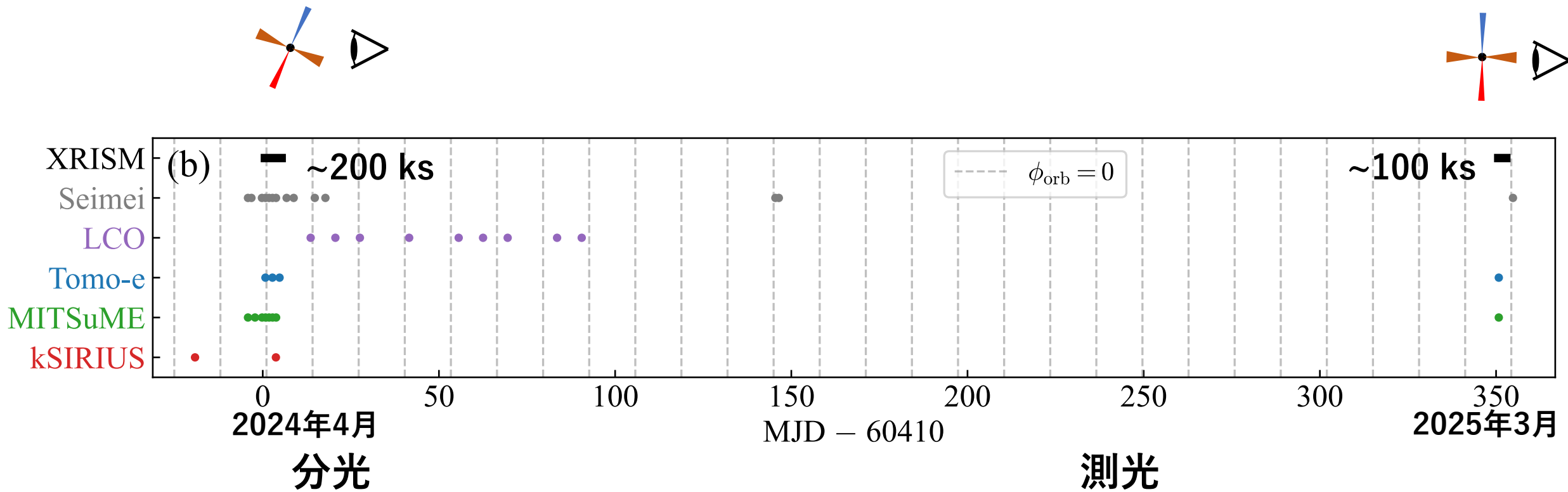


研究背景 – 可視光フレアの起源は？



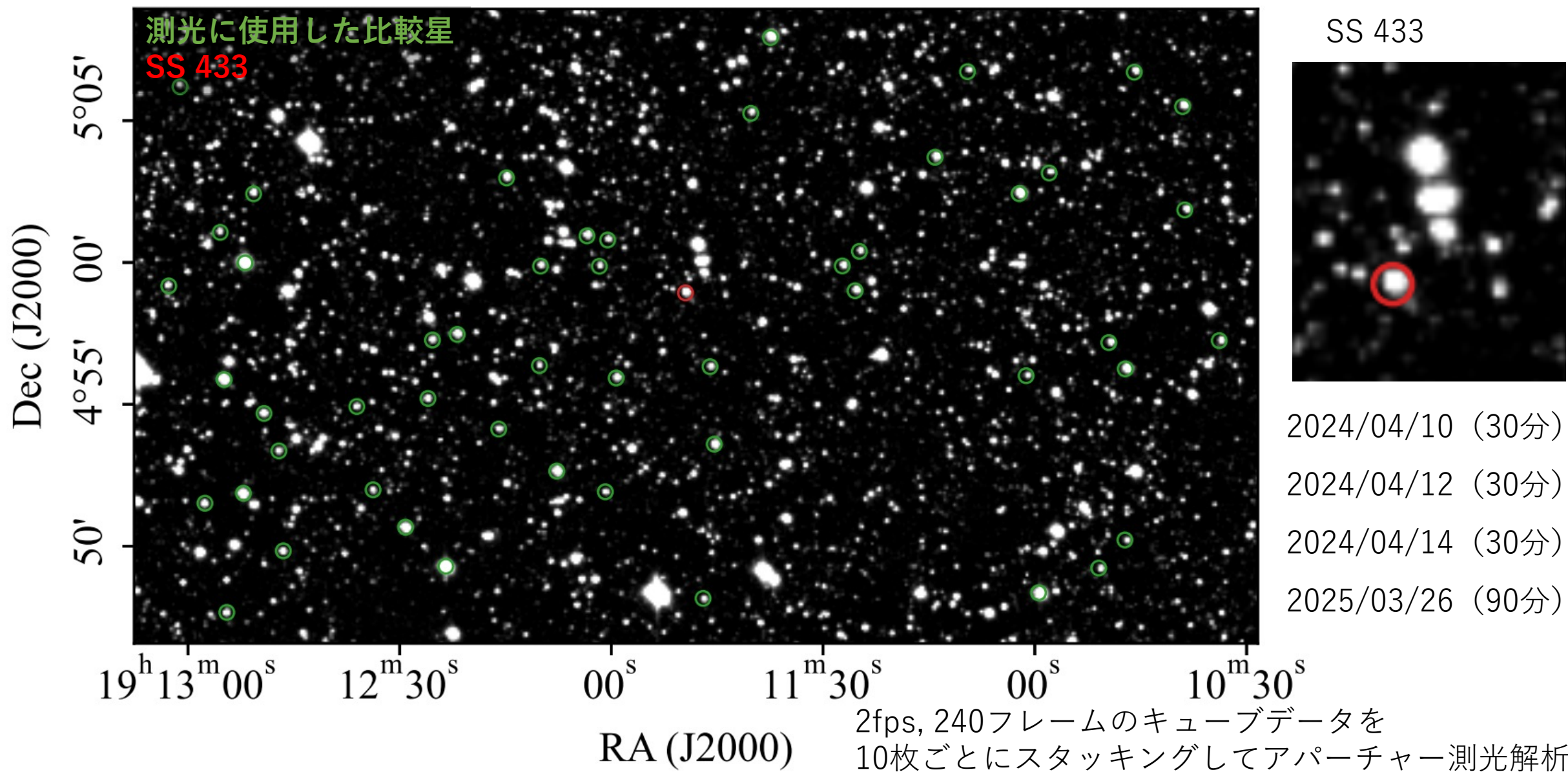
可視光フレアの物理起源がよくわかっていない
→X線・可視光の同時観測で制限

多波長観測キャンペーンを実施させていただいた

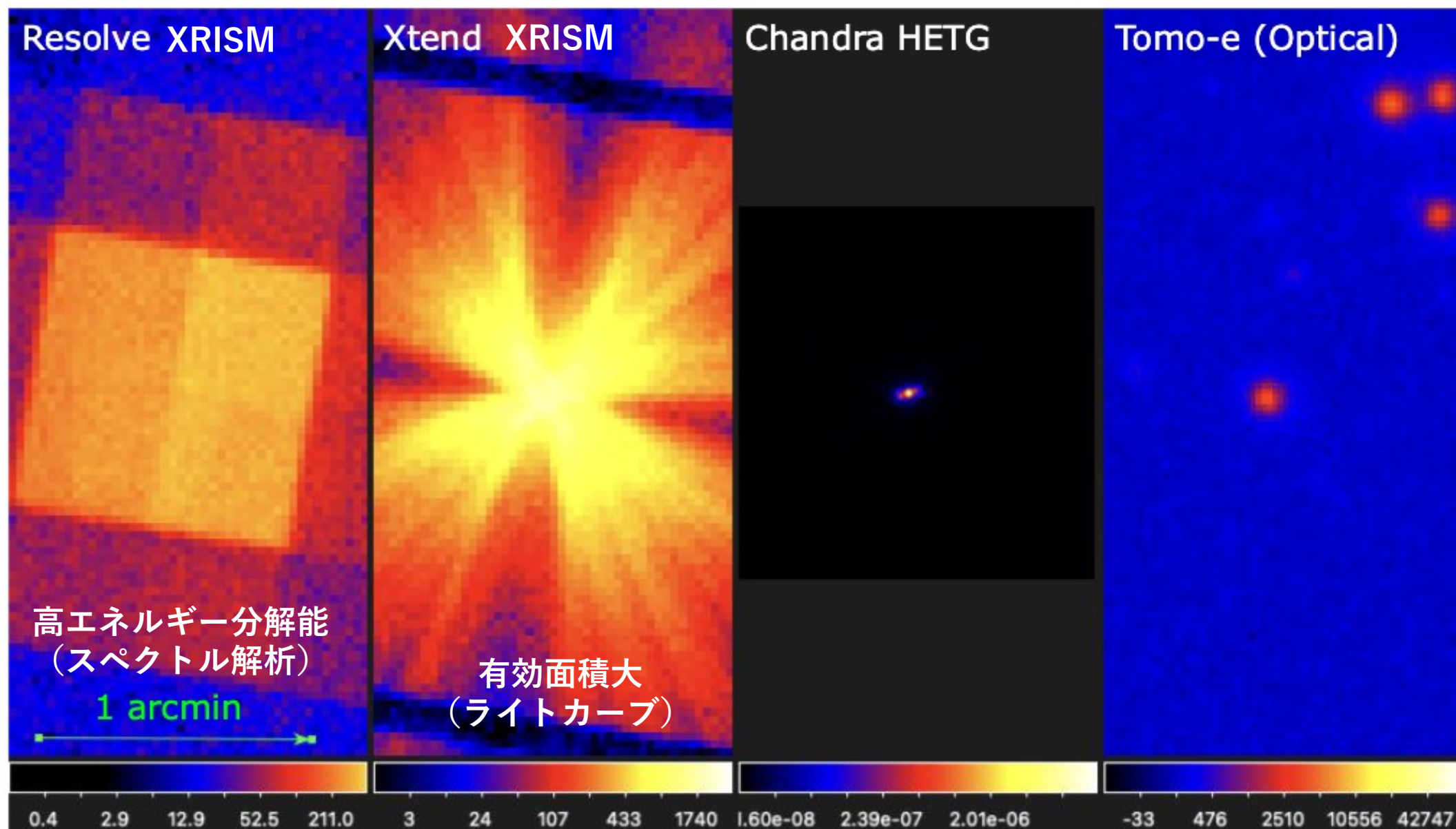


- ・ X線ジェットの輝線 (XRISM/Resolve)
- ・ 可視光ジェットのH α 線 (Seimei & LCO)
- ・ X線ジェットの明るさ (XRISM/Xtend)
- ・ 円盤放射 (可視光: Tomo-e Gozen & MITSuME, 近赤外: kSIRIUS)

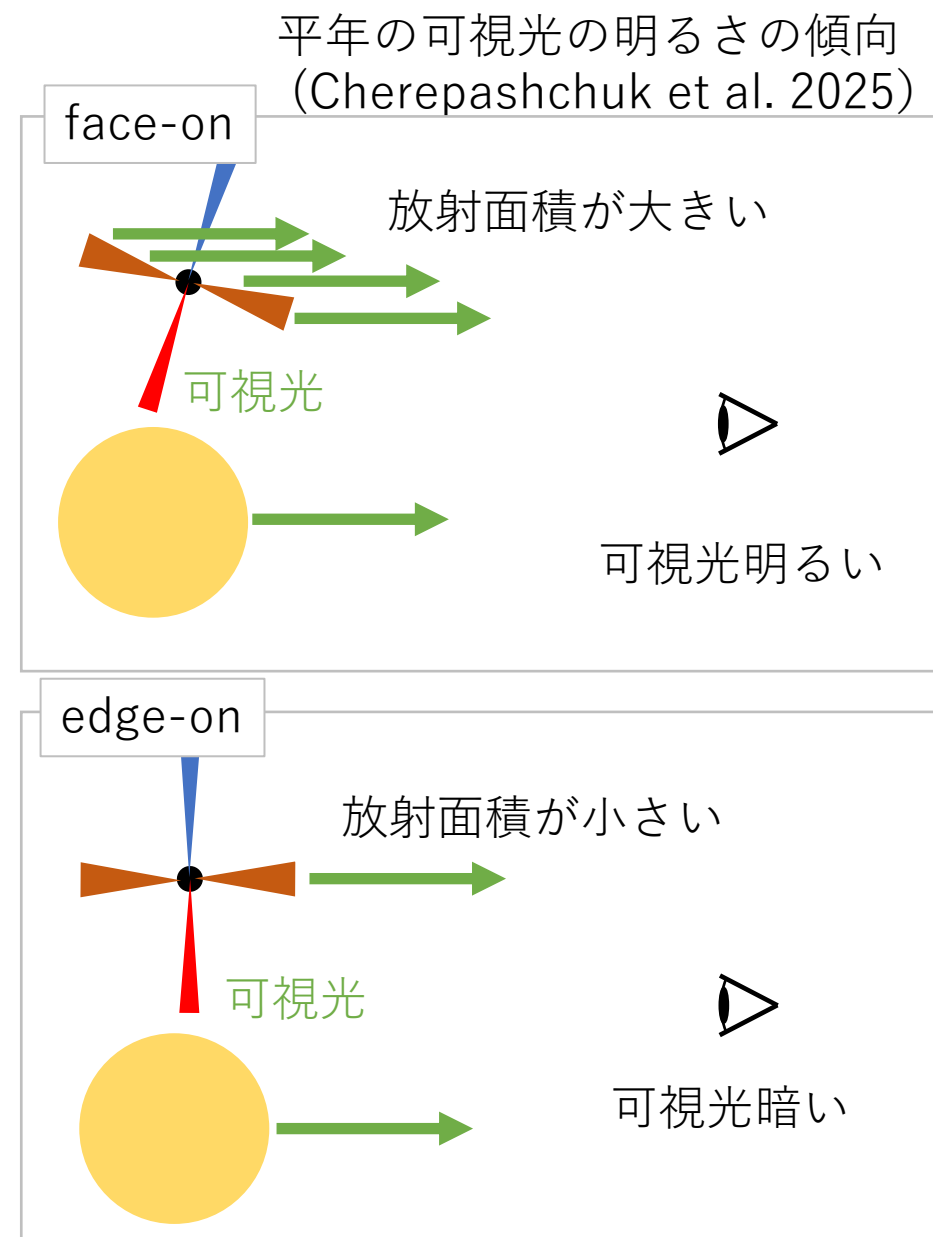
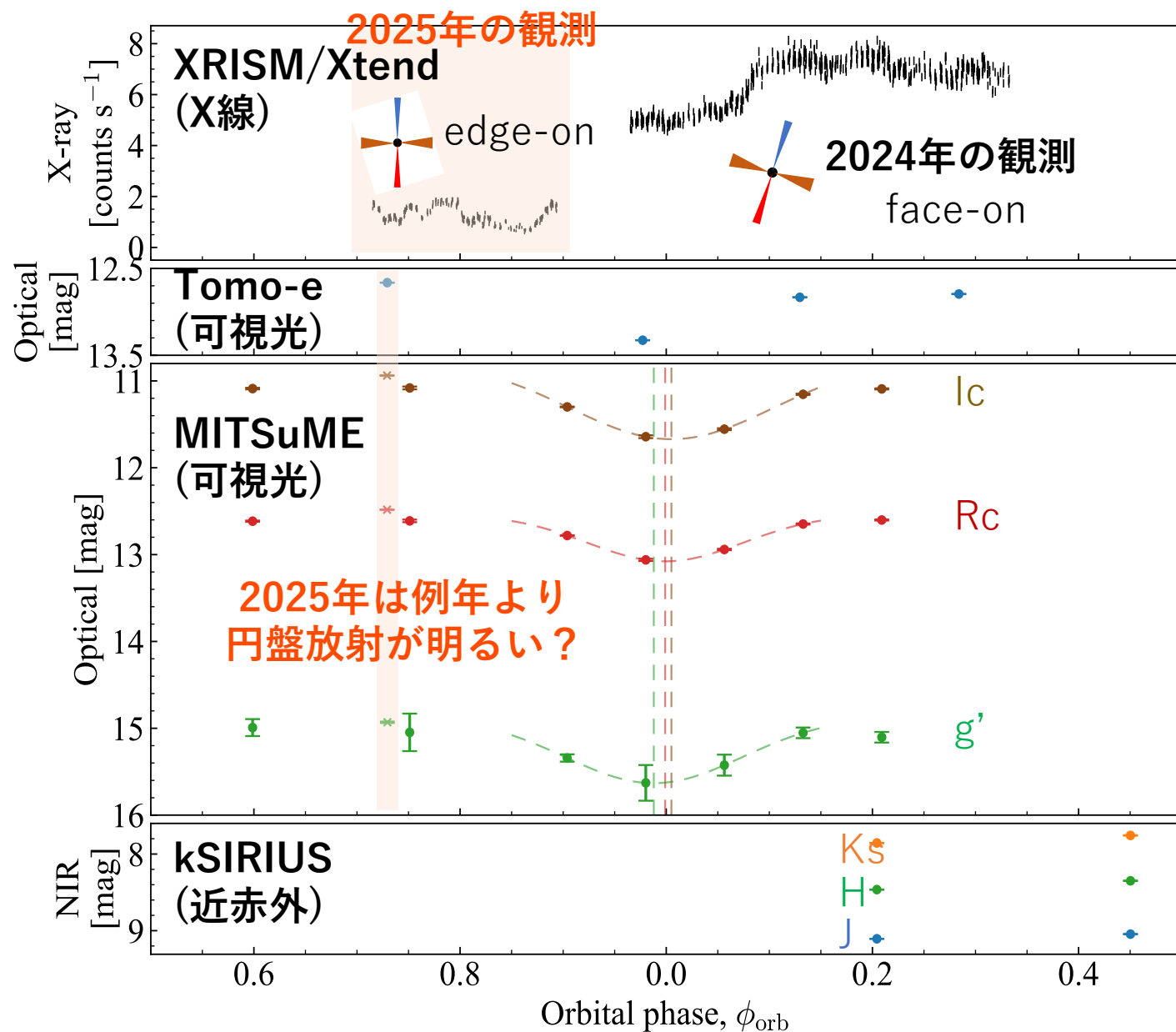
Tomo-e GozenのFOV



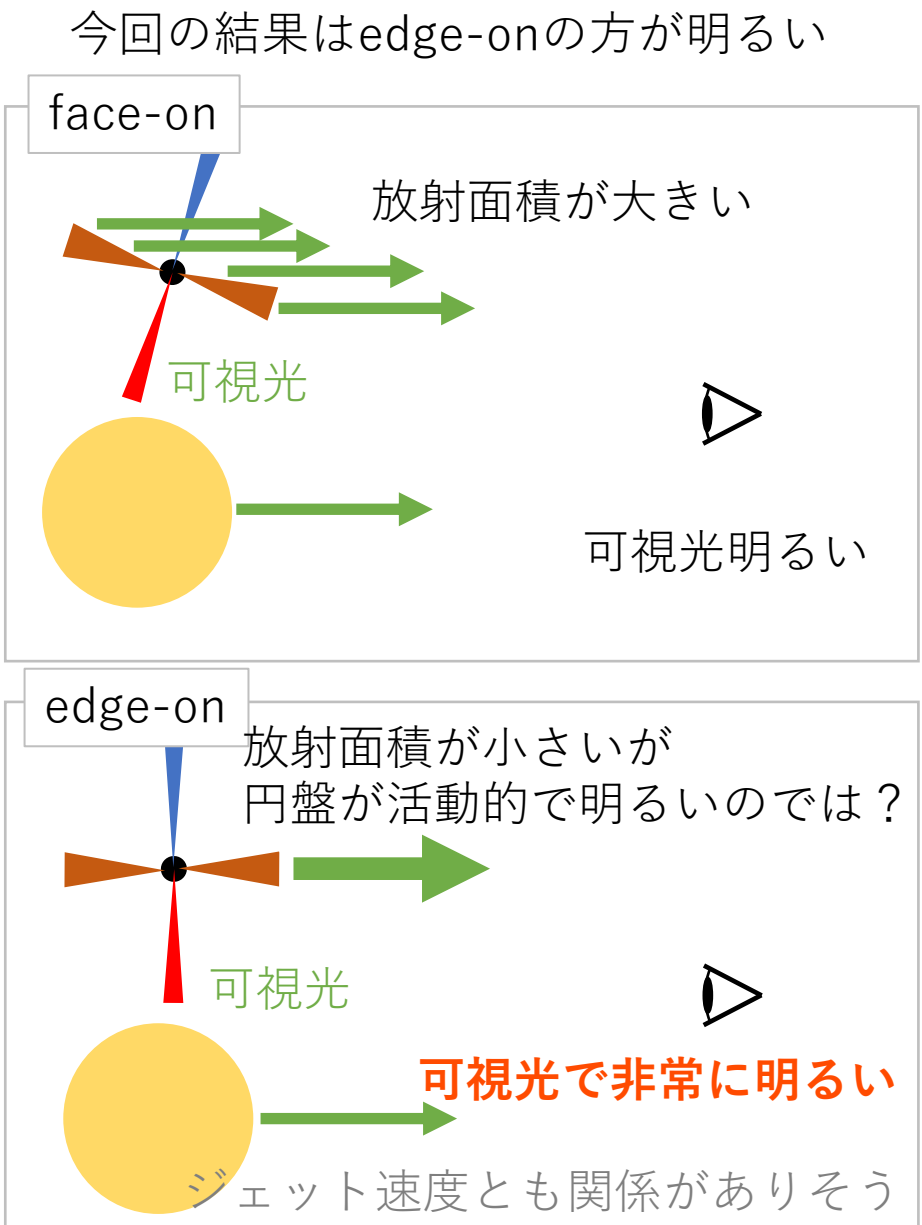
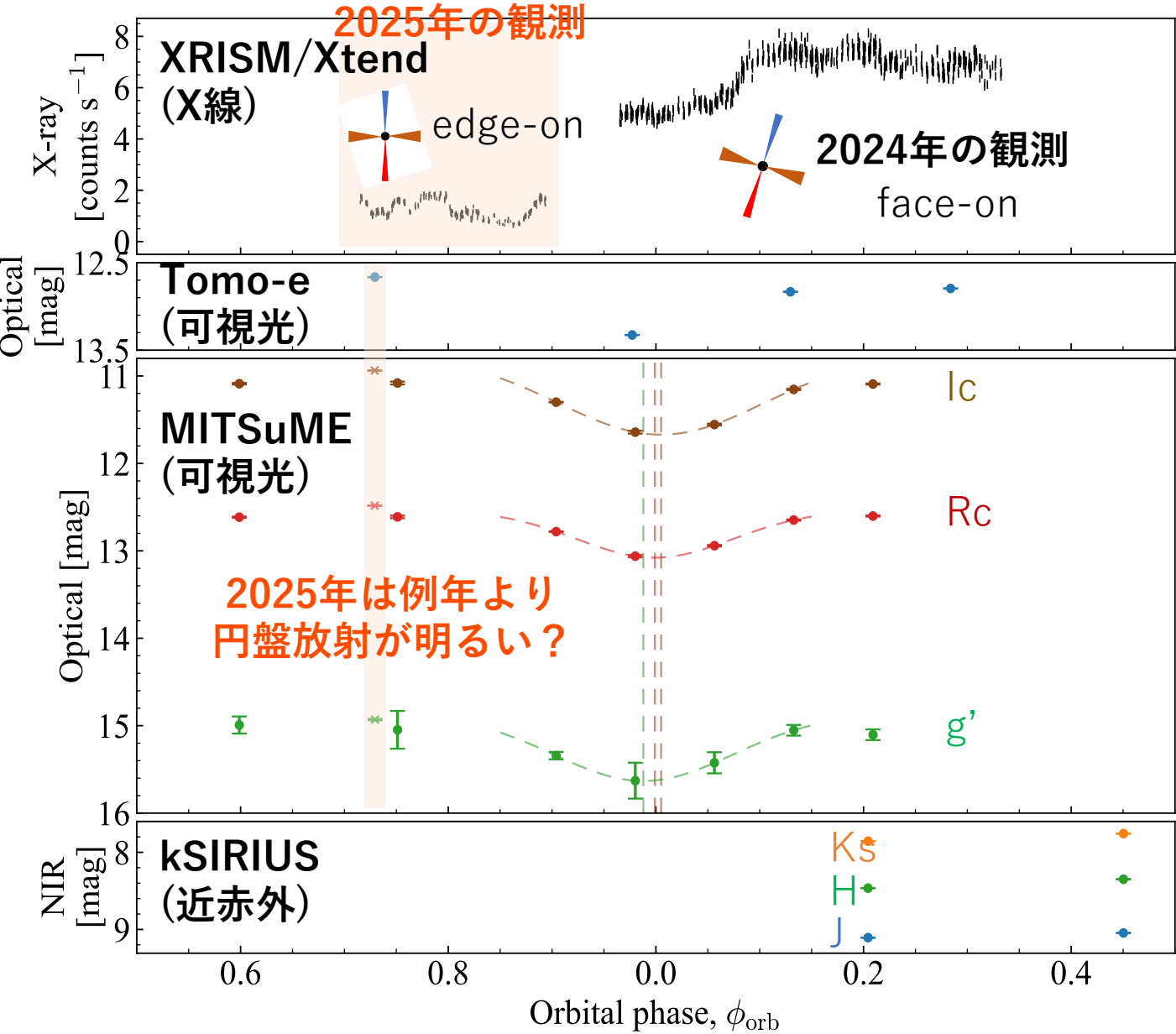
観測ごとのFoVの比較



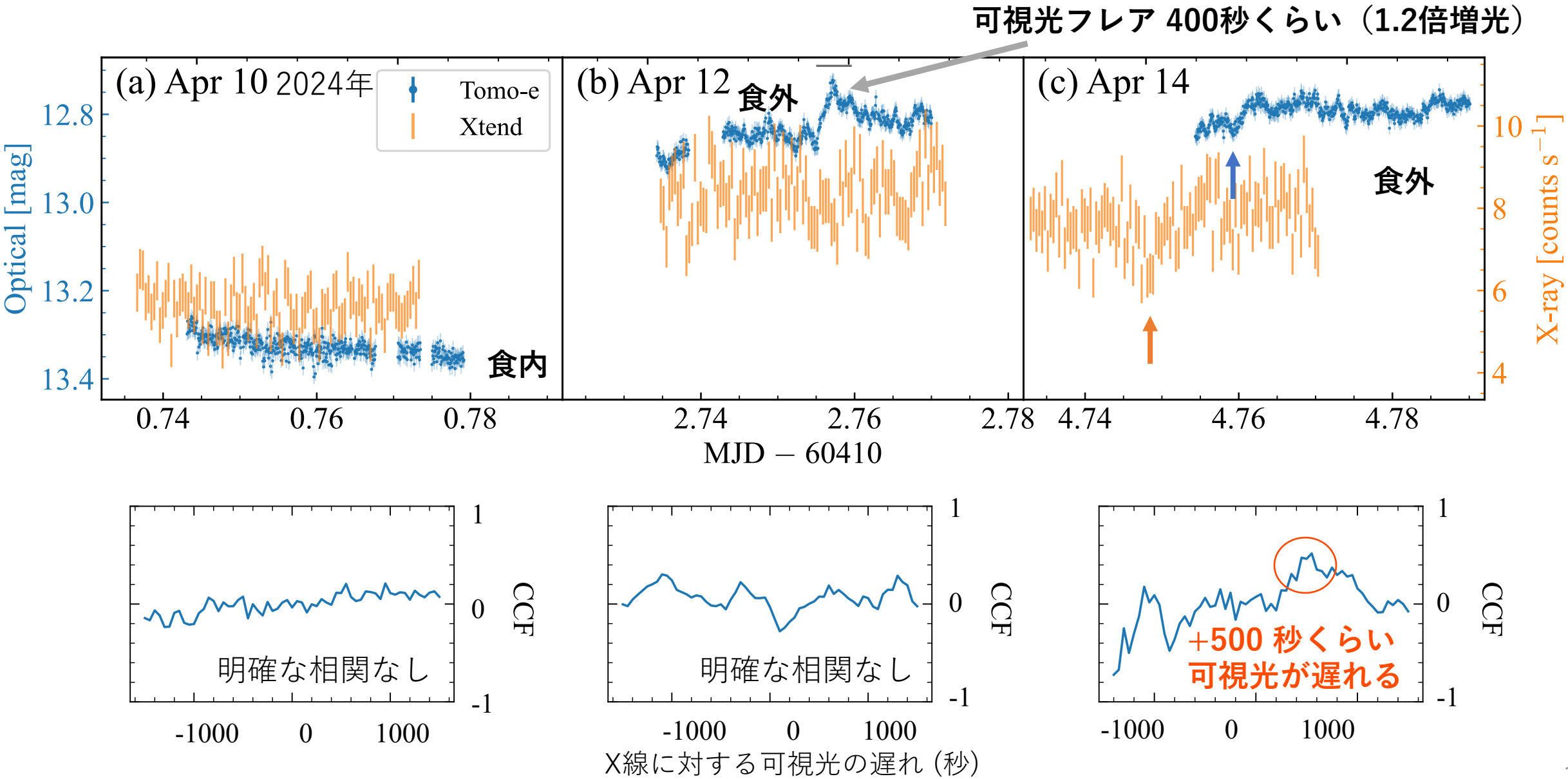
多波長の同時観測ライトカーブの結果



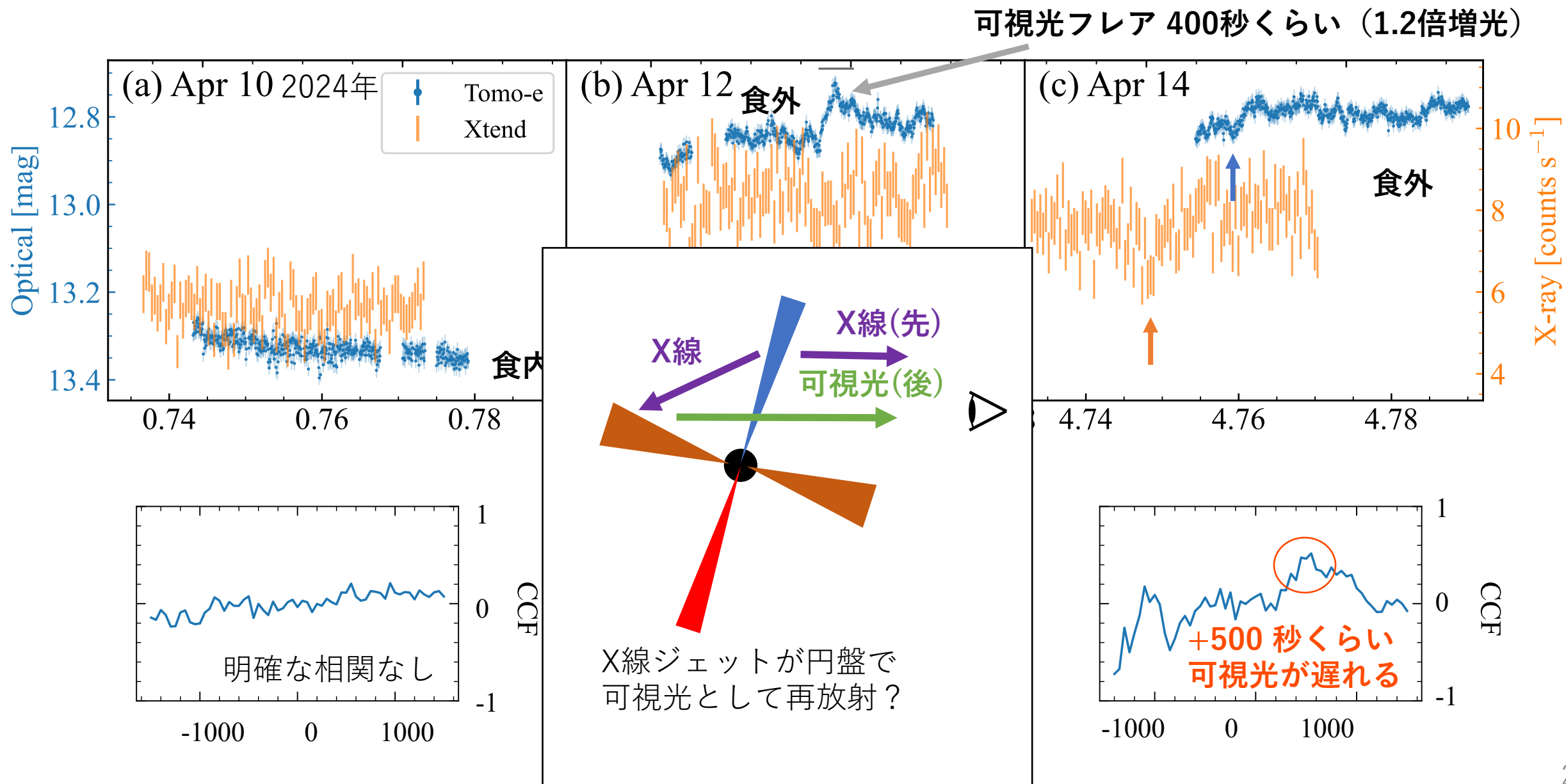
多波長の同時観測ライトカーブの結果



X線 vs. Tomo-e Gozenライトカーブ

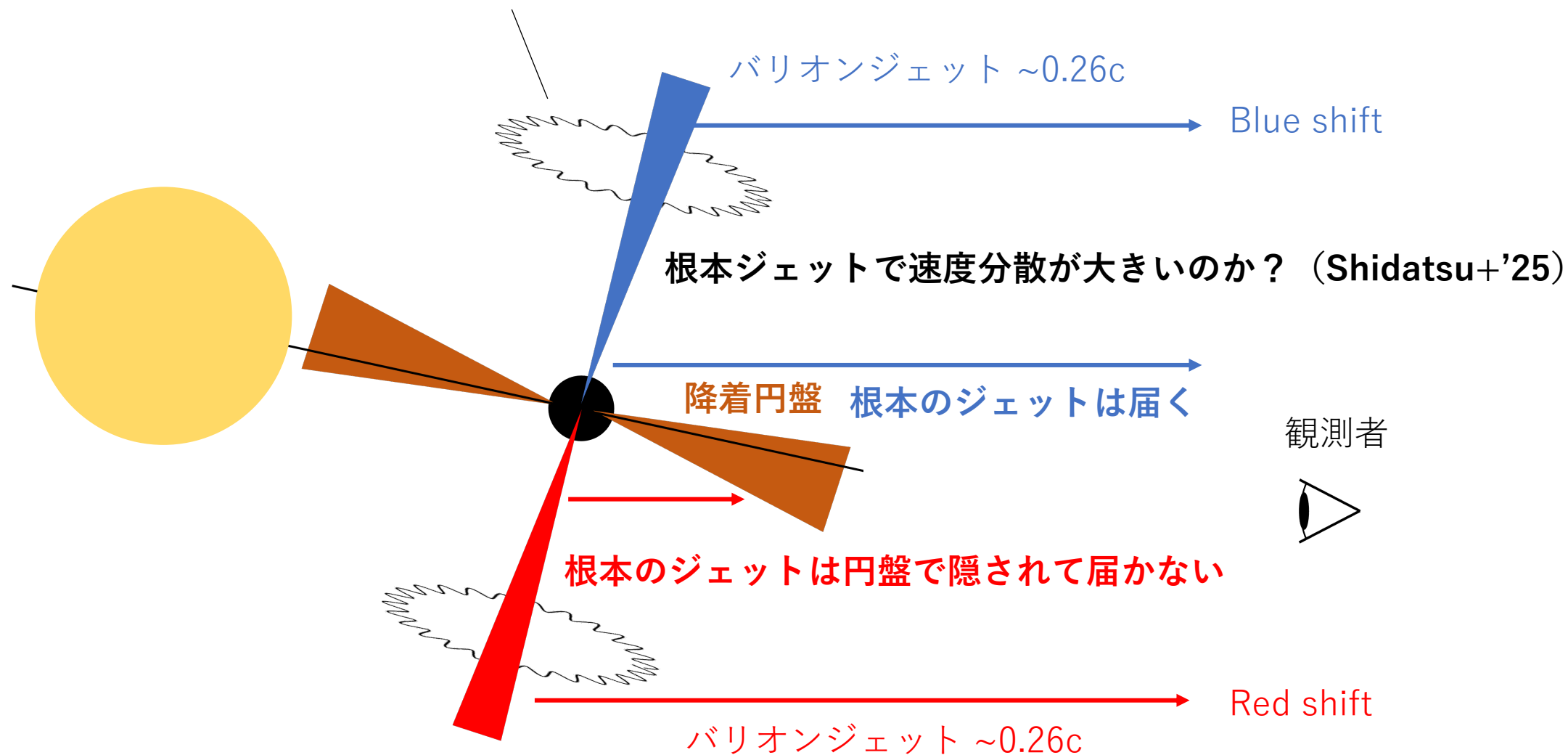


X線 vs. Tomo-e Gozen ライトカーブ



SS 433 XRISM観測

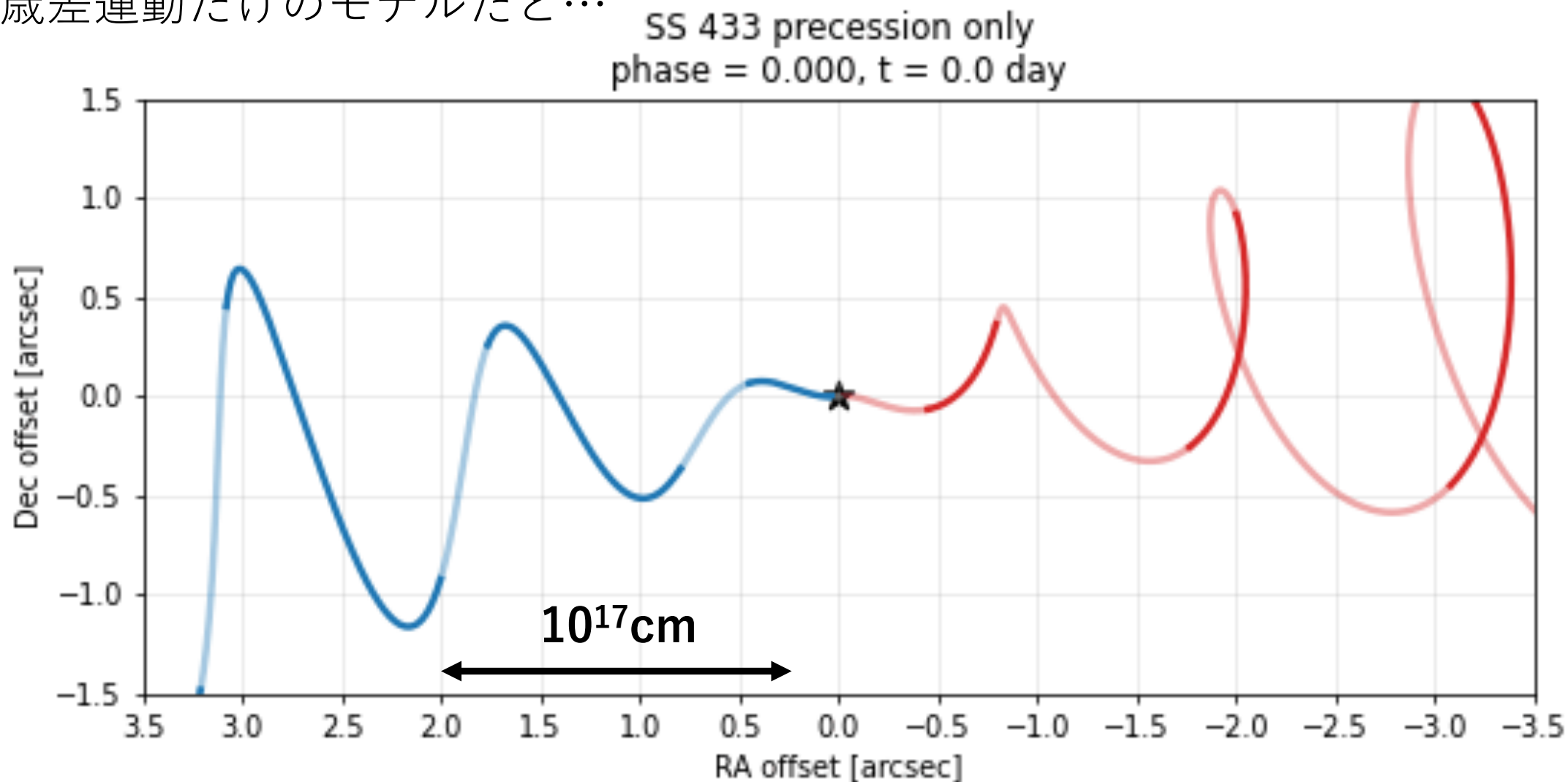
ジェットの軌道（歳差運動~162日; 章動~6日）



X線ジェット速度は時間変動しているか？ (Sakai+'26)

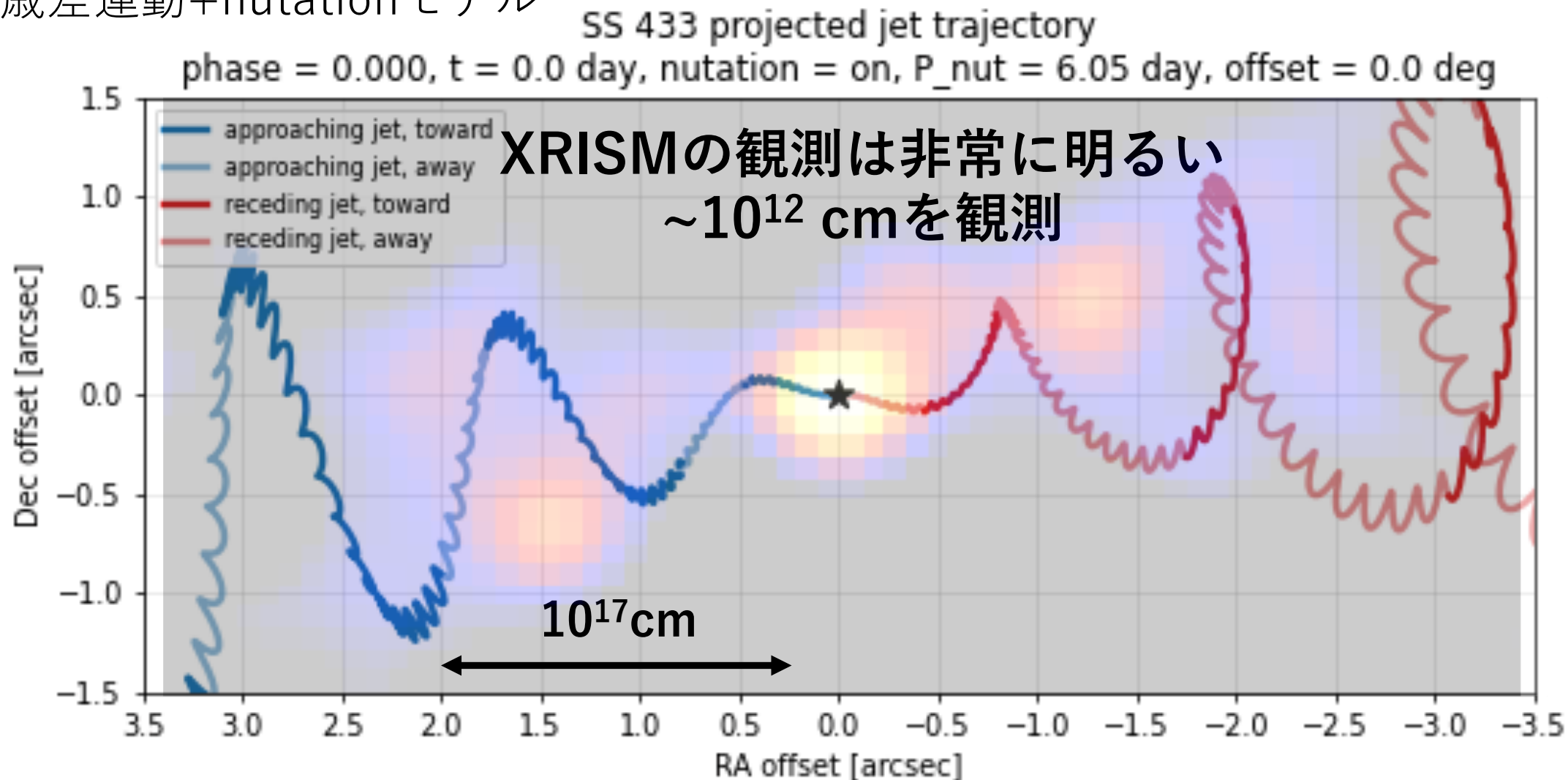
SS 433のnutation運動が非常に複雑

歳差運動だけのモデルだと...



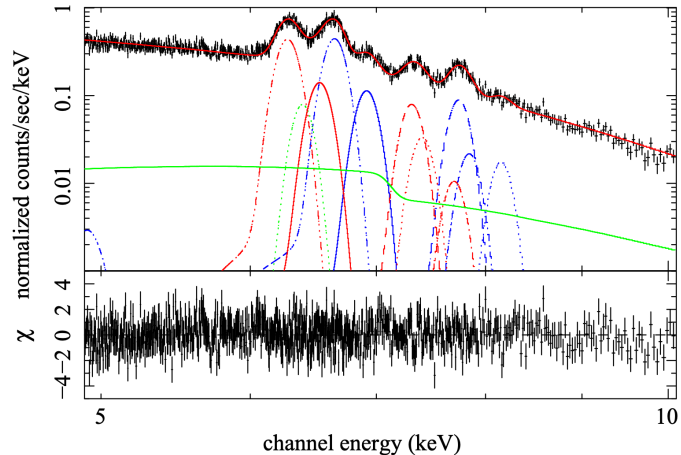
SS 433のnutration運動が非常に複雑

歳差運動+nutrationモデル

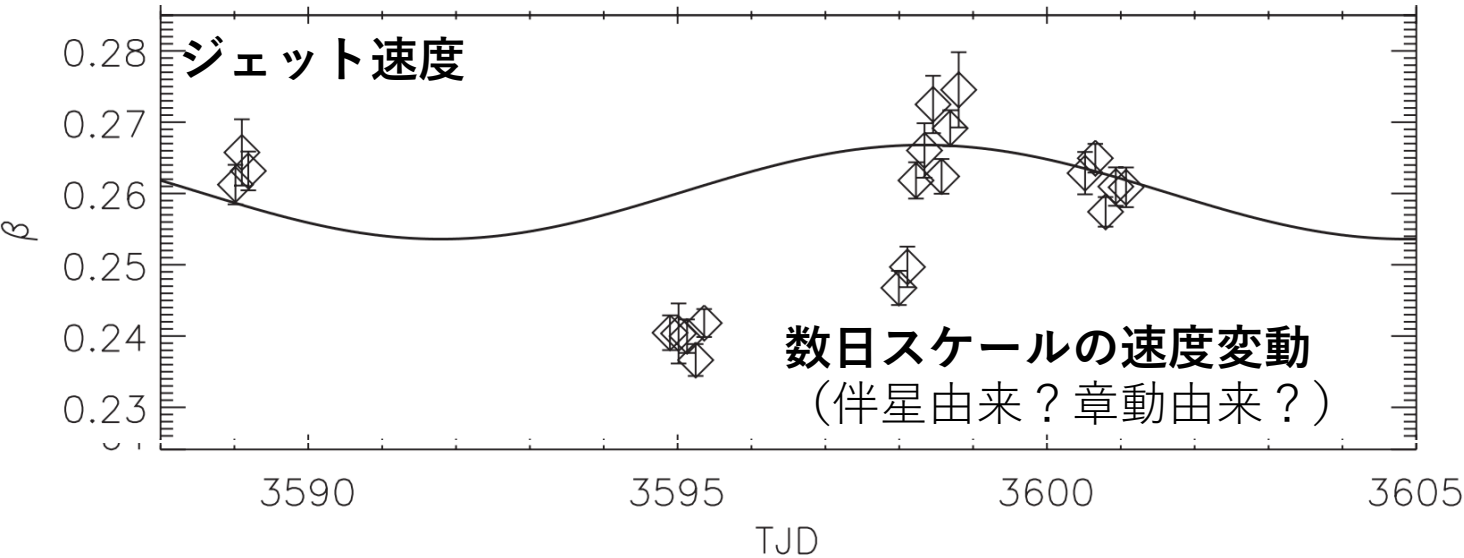
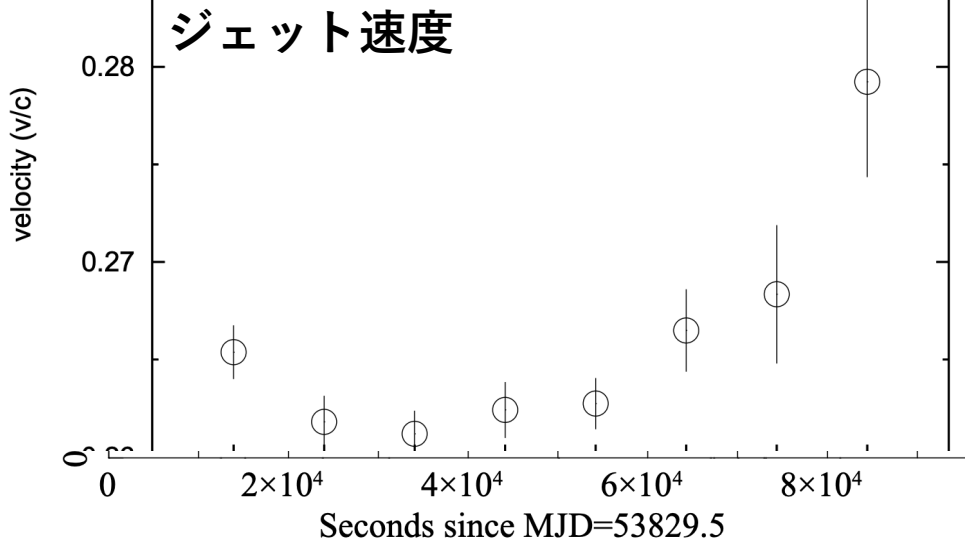
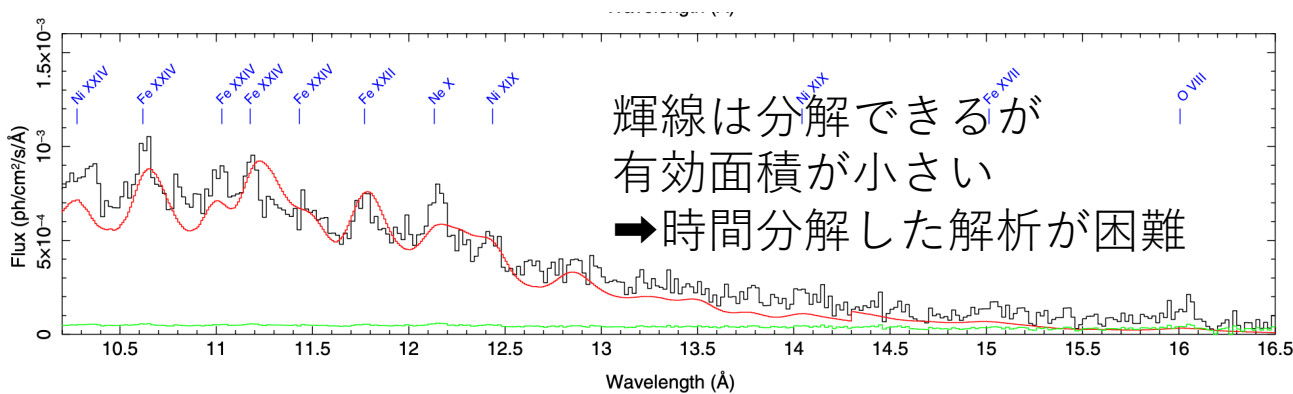


研究背景 – ジェット速度変動

Suzaku: 分解能~百eV (Kubota+'10)



Chandra/HETG グレーティング観測
分解能~数eV (Marshall+'13)



高分解能&高感度のXRISM衛星を活用して ジェット速度変動の実態を明らかにしたい

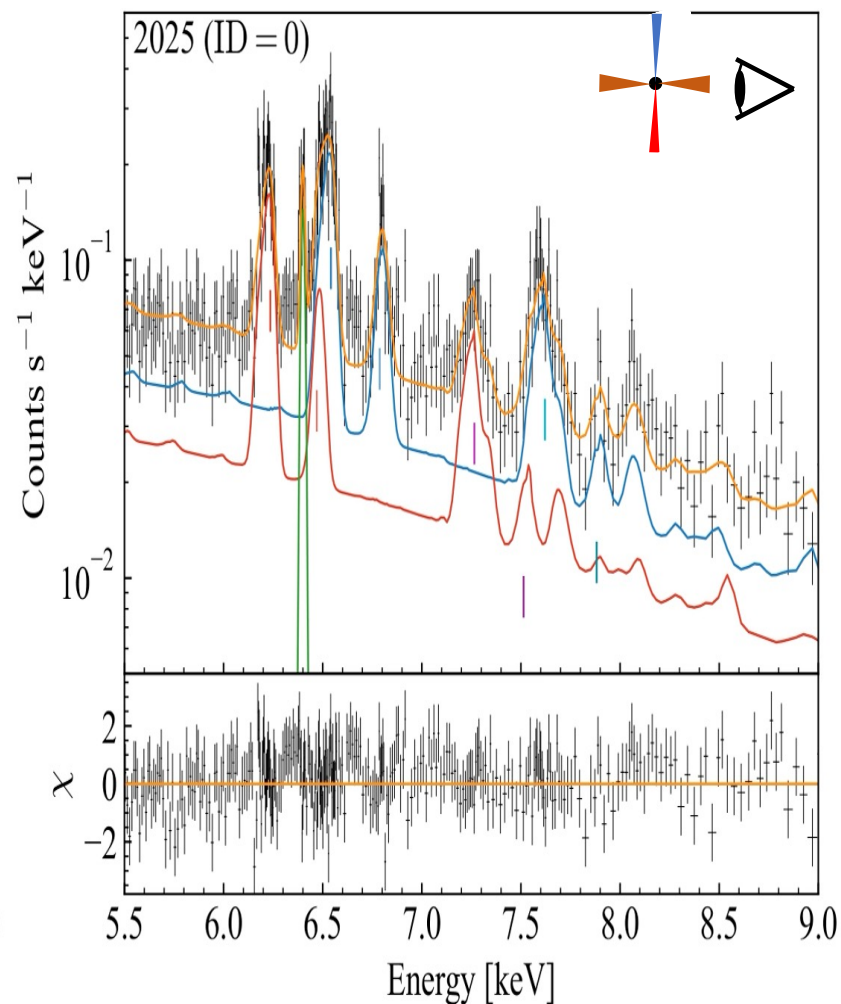
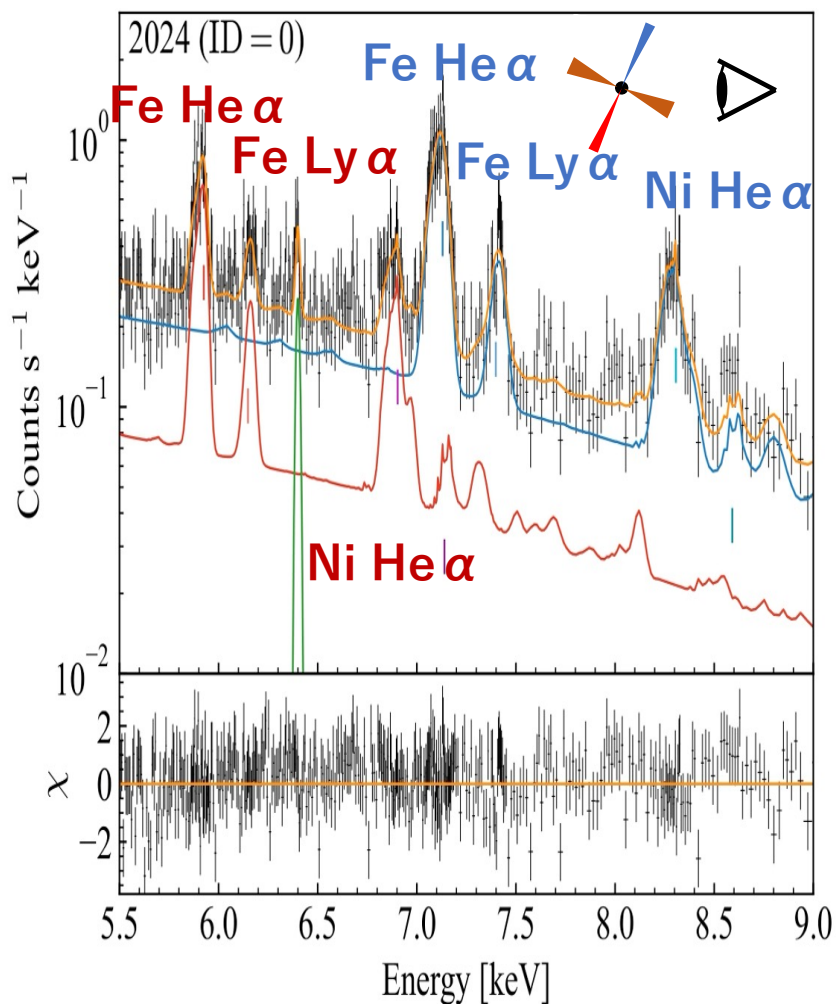
XRISM/Resolveのドップラーシフトの計算方法

Model: Tbabs * (bvapec + bvapec + Gaussian)

(星間吸収、Doppler-shiftしたBlue・Red 2成分プラズマ、中性鉄)

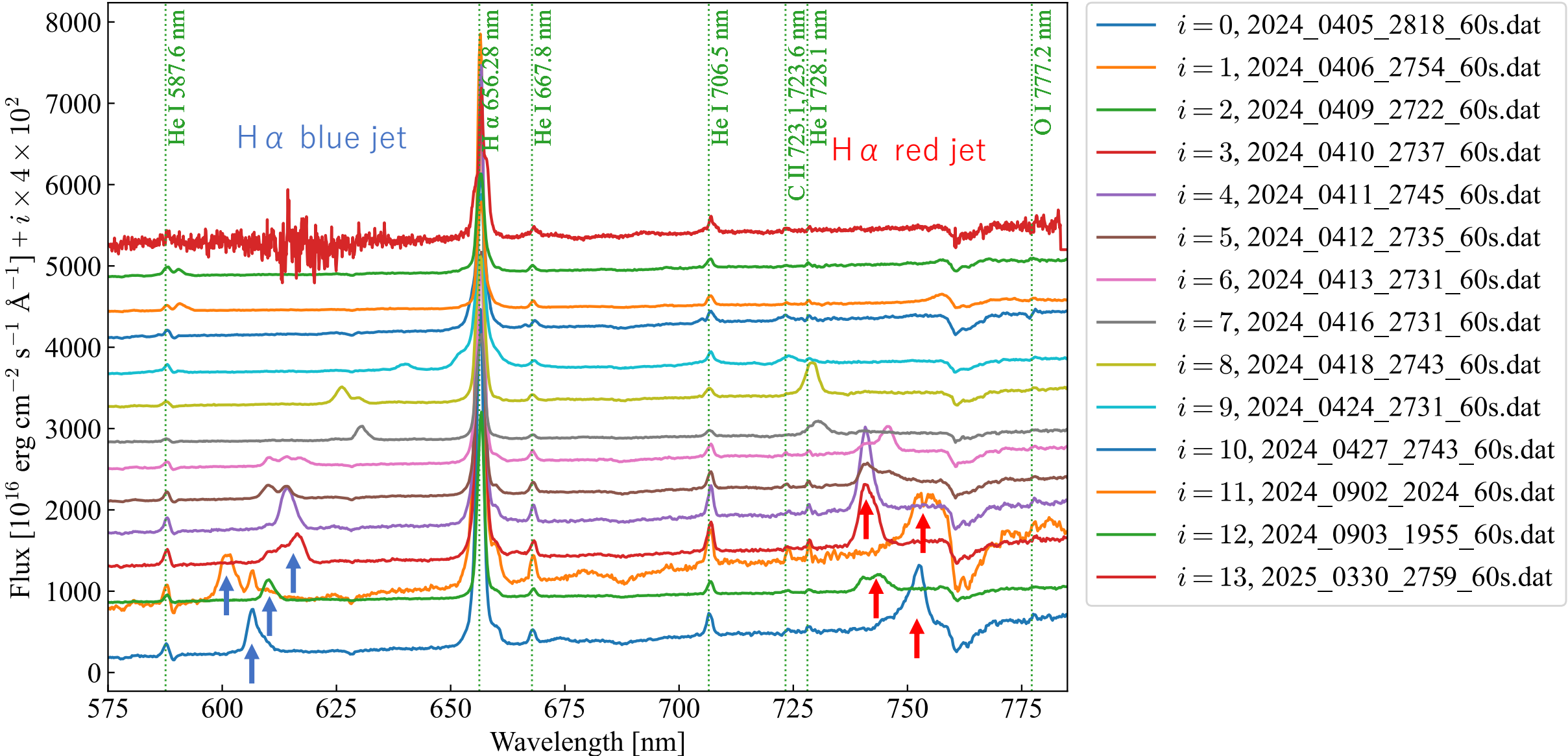
2024年 (各スペクトル露光~7 ks)

2025年 (各スペクトル露光~20 ks)

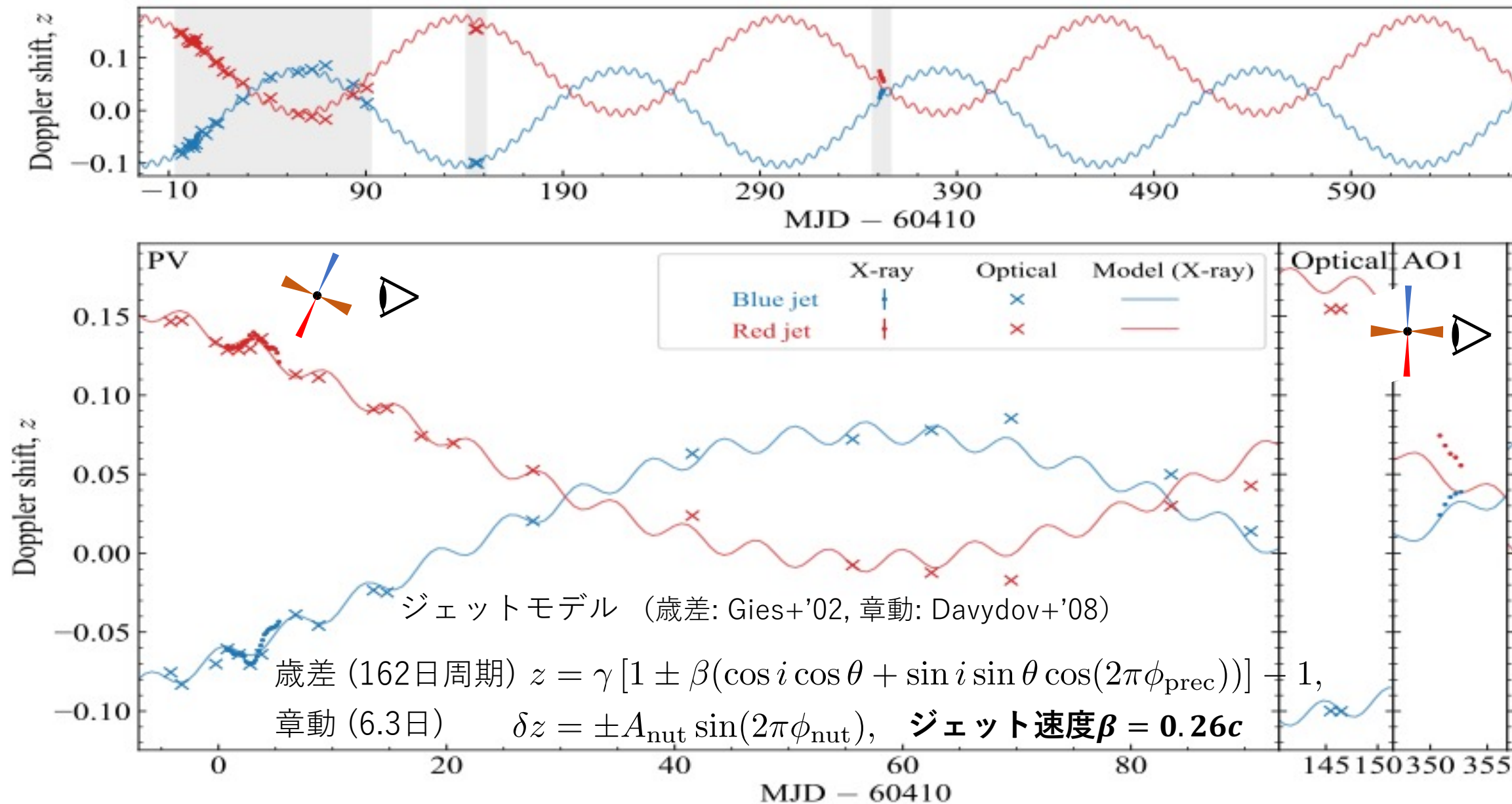


Seimei・LCOのジェットのドップラーシフト

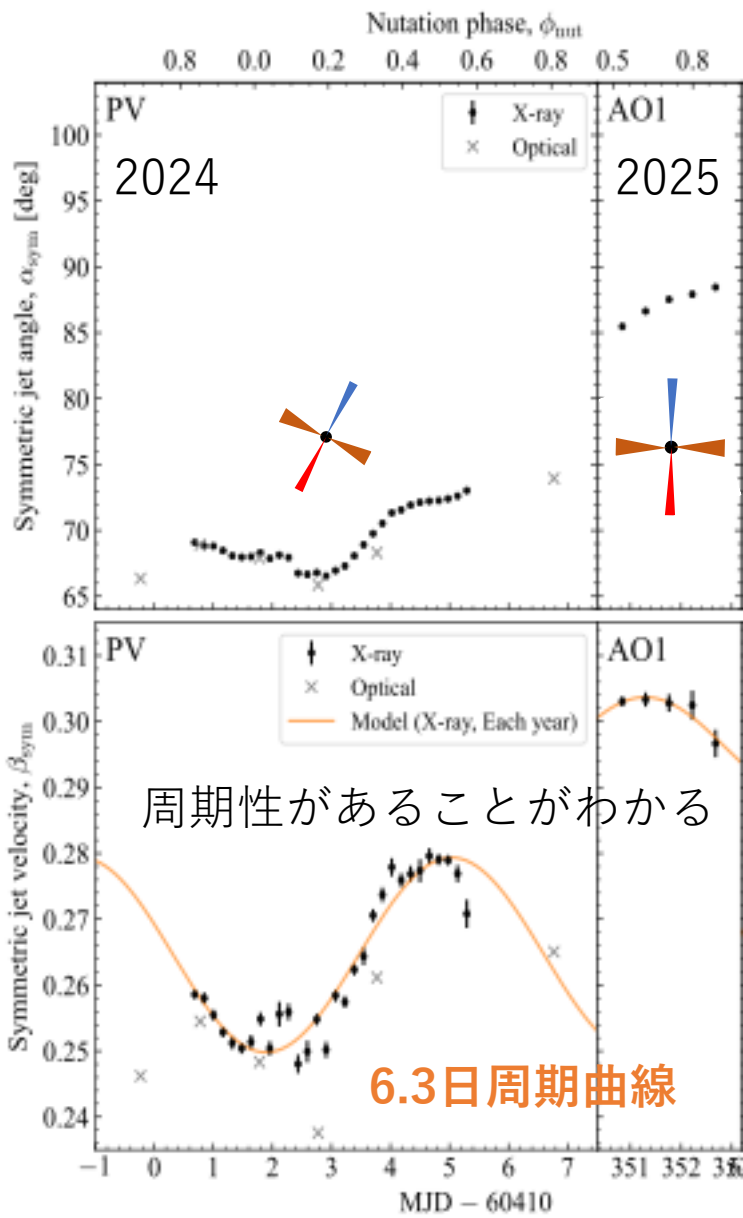
H α のジェットの歳差位相周辺のピーク値を使用



X線 vs. 可視光 ドップラーシフト



ジェット角度・速度変動の位相ずれ

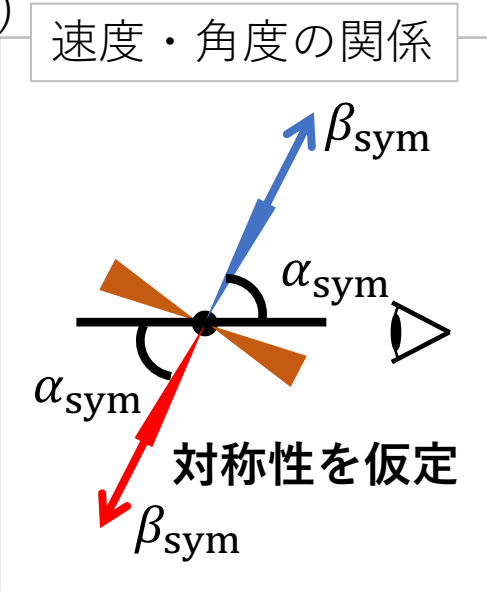


両方のジェットの対称性を仮定し、観測されたドップラーシフト値から
ジェット角度・速度を測定可能(e.g., Marhasll+'02)

相対論的ドップラーシフトの式

観測量： z_b, z_r 知りたい量： $\alpha_{sym}, \beta_{sym}$

$$\begin{cases} z_b = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_{sym}^2}} (1 - \beta_{sym} \cos \alpha_{sym}) - 1 \\ z_r = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_{sym}^2}} (1 + \beta_{sym} \cos \alpha_{sym}) - 1 \end{cases}$$

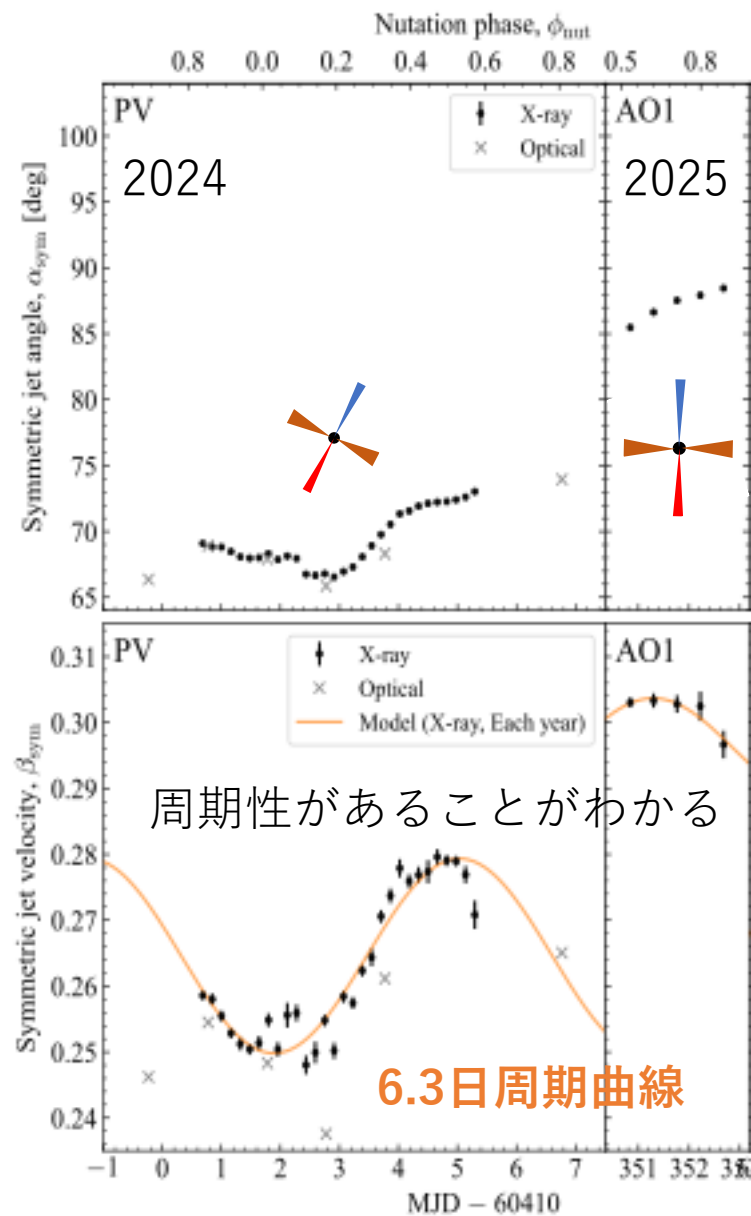


ジェットの放出角度 $\cos \alpha_{sym} = \frac{z_r - z_b}{2 \left(1 + \frac{z_b + z_r}{2}\right) \sqrt{1 - \left(1 + \frac{z_b + z_r}{2}\right)^{-2}}}$

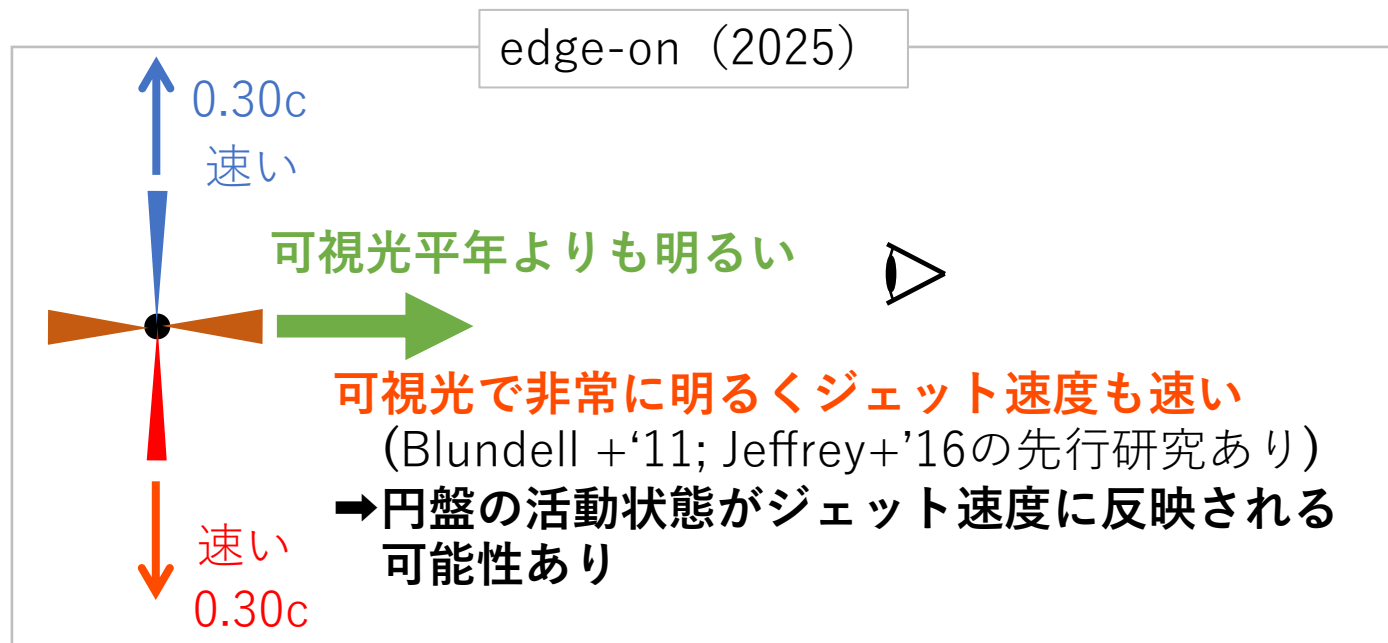
ジェットの放出速度 $\beta_{sym} = \sqrt{1 - \left(1 + \frac{z_b + z_r}{2}\right)^{-2}}$

ジェット速度が ~6.3日スケールで変動していることを観測

ジェット角度・速度変動の位相ずれ

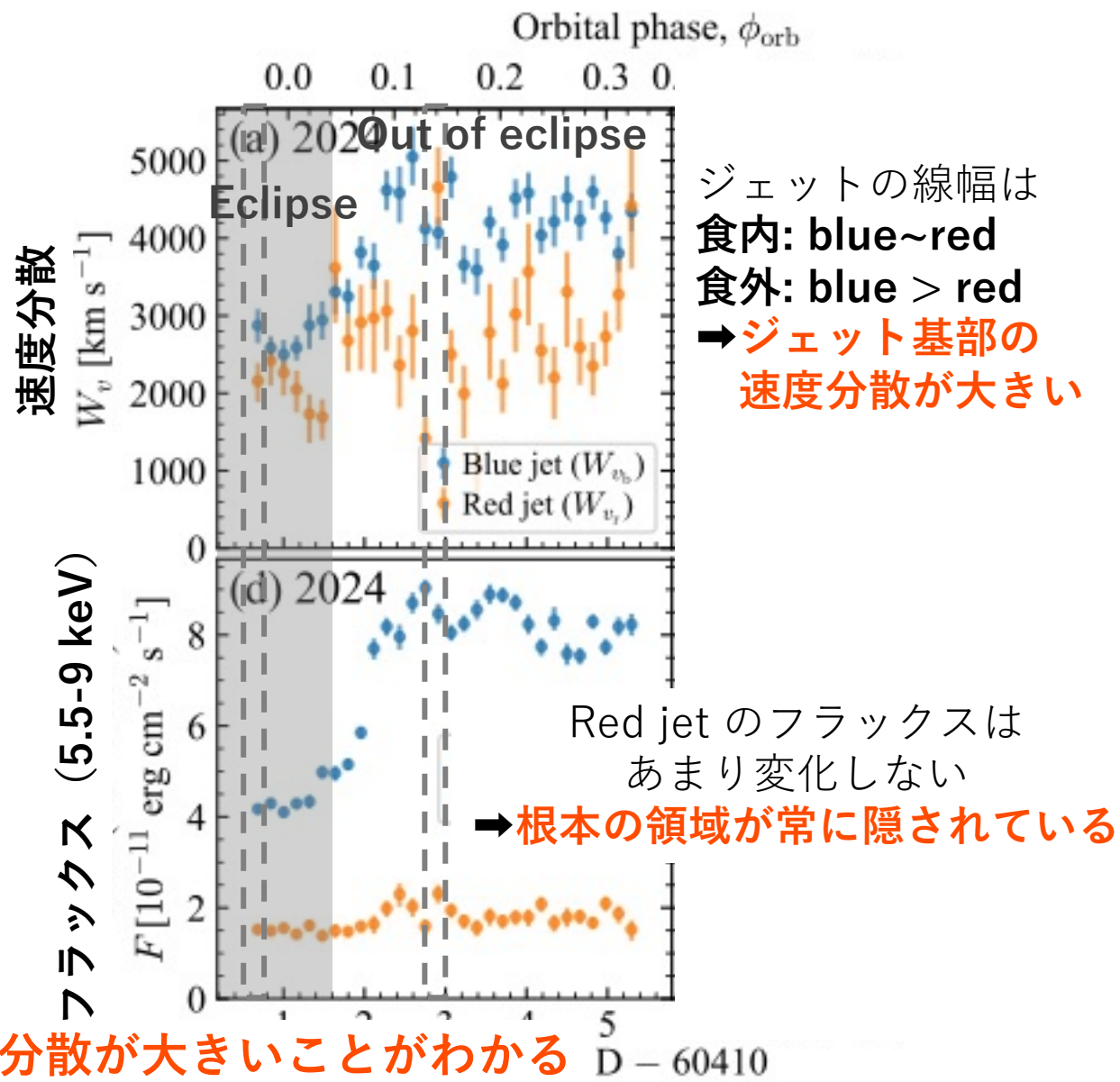
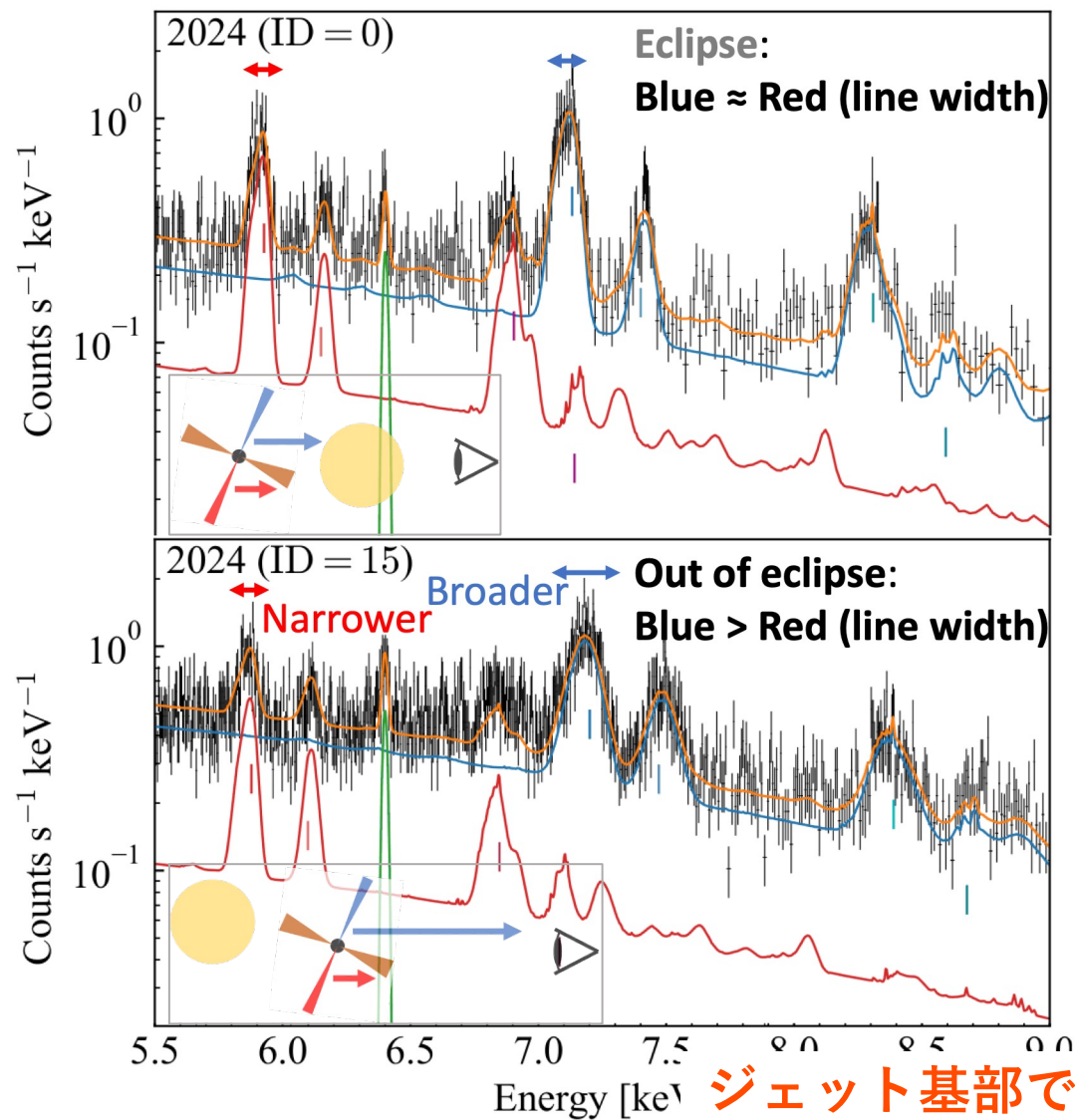


今回の結果はedge-onの方が可視光が明るくジェット速度も速い



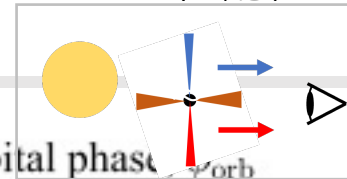
ジェット線幅の時間変動

根本の線幅が大きい (Shidatsu+2025)

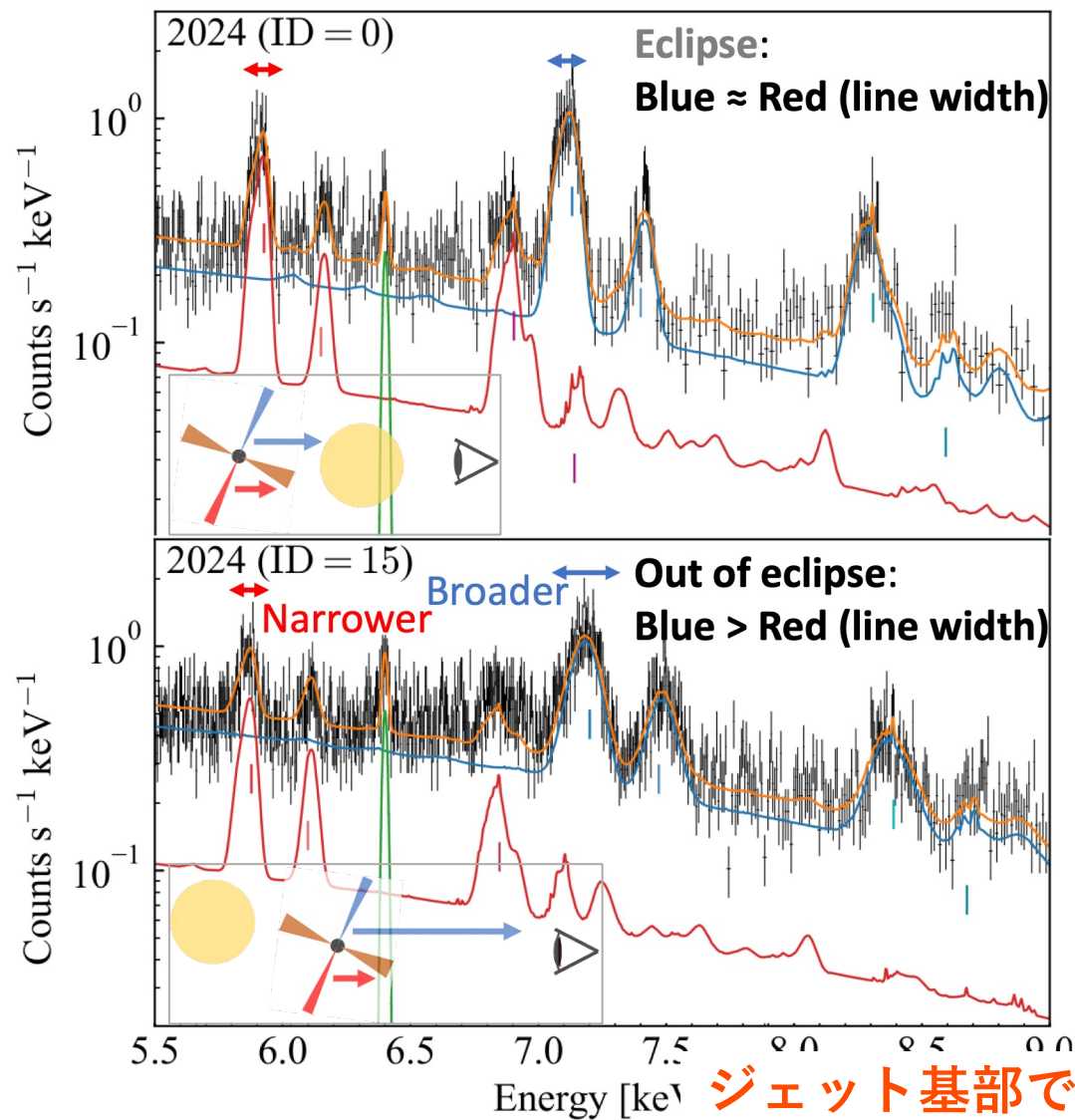


ジェット線幅の時間変動

2025年 配置

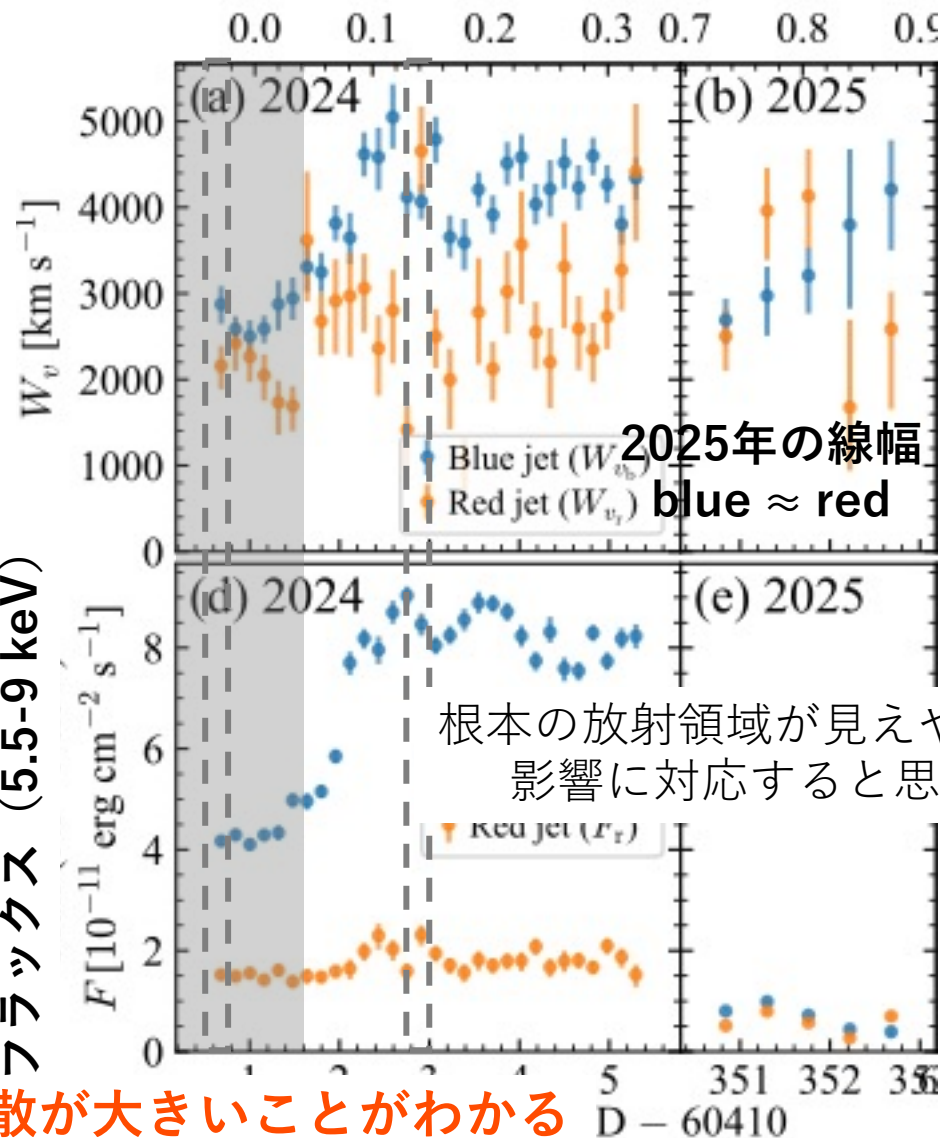


根本の線幅が大きい (Shidatsu+2025)



速度分散

フラックス (5.5-9 keV)



ジェット基部で速度分散が大きいことがわかる

まとめ

- **Chandra による SS 433 ジェットの詳細な空間構造解析**
 - サブ秒角スケールでジェット構造を解析し、**螺旋状に広がる構造を示唆**
 - 中心領域では **thermal 成分が支配的**で、外側では輝線成分が弱い
→ 外側放射は **非熱的放射または低温/高温プラズマ**の可能性
- **XRISMと可視光同時観測による解析**
 - 可視光で1.2倍の400秒スケールのフレアを検出
 - 同時観測されたX線との明確な対応関係は見られなかった
 - 可視光とX線が異なる放射領域を反映している可能性を示唆
- **XRISM 観測によるジェット速度変動の検出**
 - ジェット速度は **章動タイムスケールで変動**することを確認
 - **可視光で明るい時期にジェット速度が速いことを示唆**
 - ジェット根本の速度分散は小さいことを示唆