

XRISM衛星が拓くブラックホールの物理

水本岬希

(福岡教育大学, the XRISM team)



2024.2.27-3.2 ブラックホール大研究会

目次

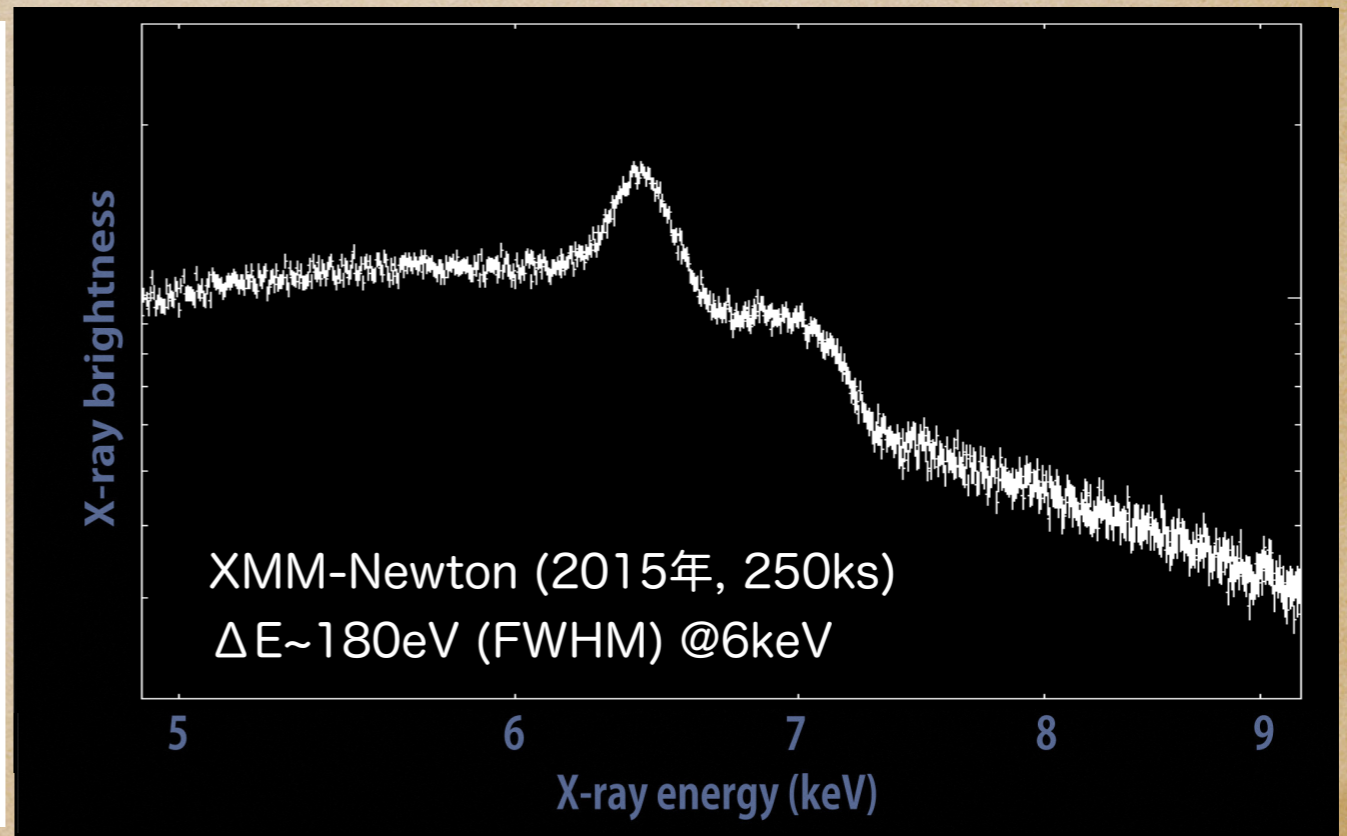
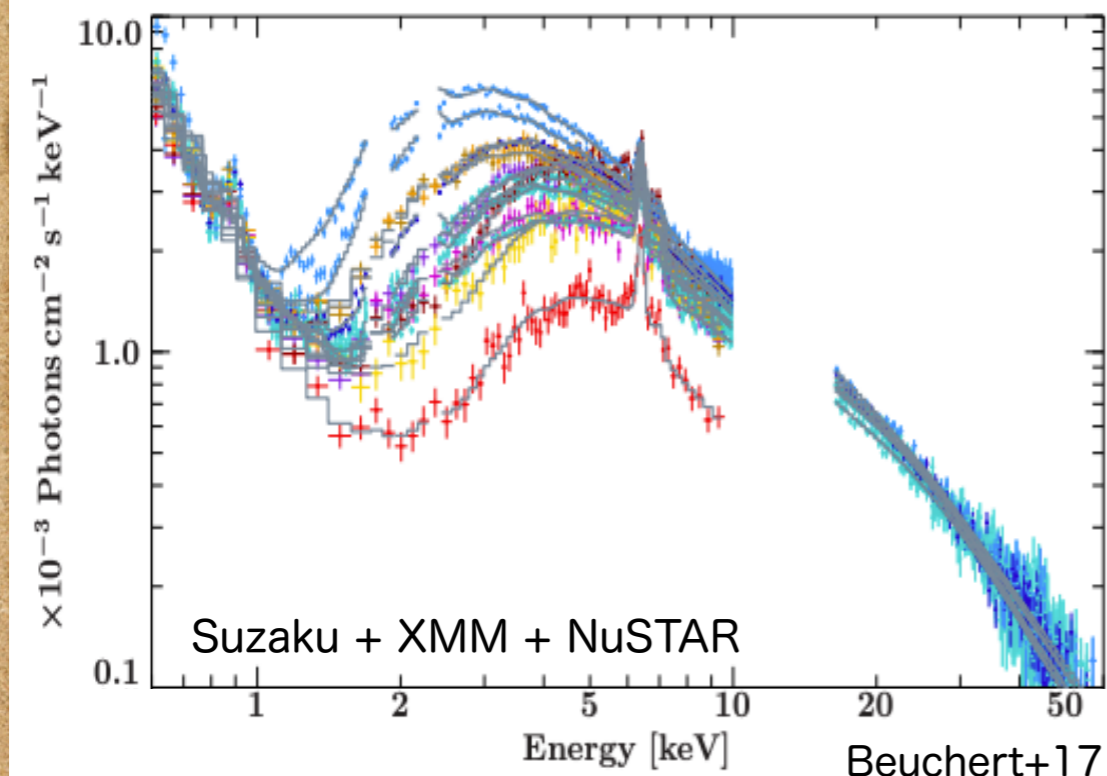
0. NGC 4151 (セイファート1.5型) のスペクトル
1. XRISM衛星の概要
 - a. Resolve検出器
 - b. Xtend検出器
2. 初期観測計画
 - a. Active Galactic Nuclei
 - b. Black Hole Binary
3. 公募観測の案内

目次

- 0. NGC 4151 (セイファート1.5型) のスペクトル
- 1. XRISM衛星の概要
 - a. Resolve検出器
 - b. Xtend検出器
- 2. 初期観測計画
 - a. Active Galactic Nuclei
 - b. Black Hole Binary
- 3. 公募観測の案内

NGC 4151

- セイファート1.5型
- X線で見ると、soft側が常に吸収を受けている
 - > トーラス (あるいはトーラスのようなもの) に隠されている
- Soft側の吸収量が時間変化する
 - > 視線上の吸収体の量の変化。clumpyトーラス?
- 中性の鉄輝線 (Fe-K@6.4keV) が見えている
 - > 反射成分 (トーラス? BLR? 円盤?)



公開版からは削除

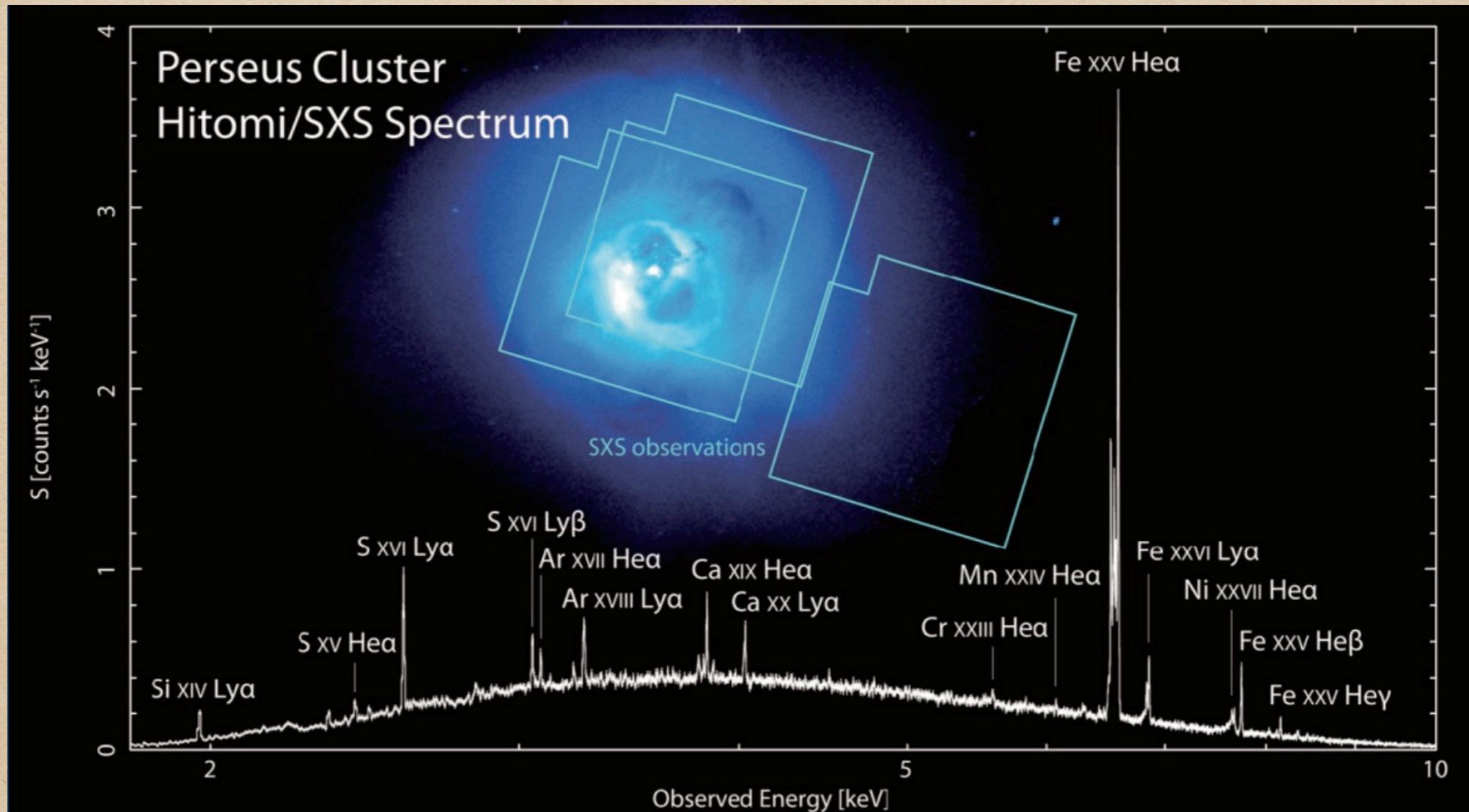
公開版からは削除

目次

- 0. NGC 4151 (セイファート1.5型) のスペクトル
- 1. XRISM衛星の概要
 - a. Resolve検出器
 - b. Xtend検出器
- 2. 初期観測計画
 - a. Active Galactic Nuclei
 - b. Black Hole Binary
- 3. 公募観測の案内

XRISM衛星

ひとみ (ASTRO-H) 衛星の一部装置のリカバリーミッション



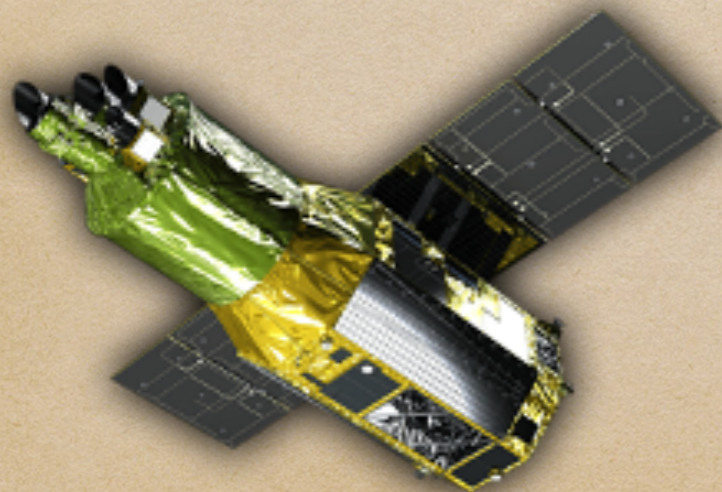
2017年から始動、2023年9月7日打ち上げ

XRISM衛星

Resolve: 精密X線分光のためのマイクロカロリメータ

Xtend: 大視野CCDカメラ

Instrument	FOV/pix	ΔE (FWHM @6 keV)	Energy band
Resolve	3.05' \square / 6 x 6 pix	~ 5 eV (軌道上校正線源実測値)	1.8 – 12 keV (ゲートバルブ閉状態 (後述) での軌道上実測値)
Xtend	38' \square / 1280 x 1280 pix	~180 eV (軌道上校正線源実測値)	0.4 – 13 keV



質量	2.3 t
サイズ	7.9 m x 9.2 m x 3.1 m
寿命	3年 (液体He使用) + α (無冷媒運転)

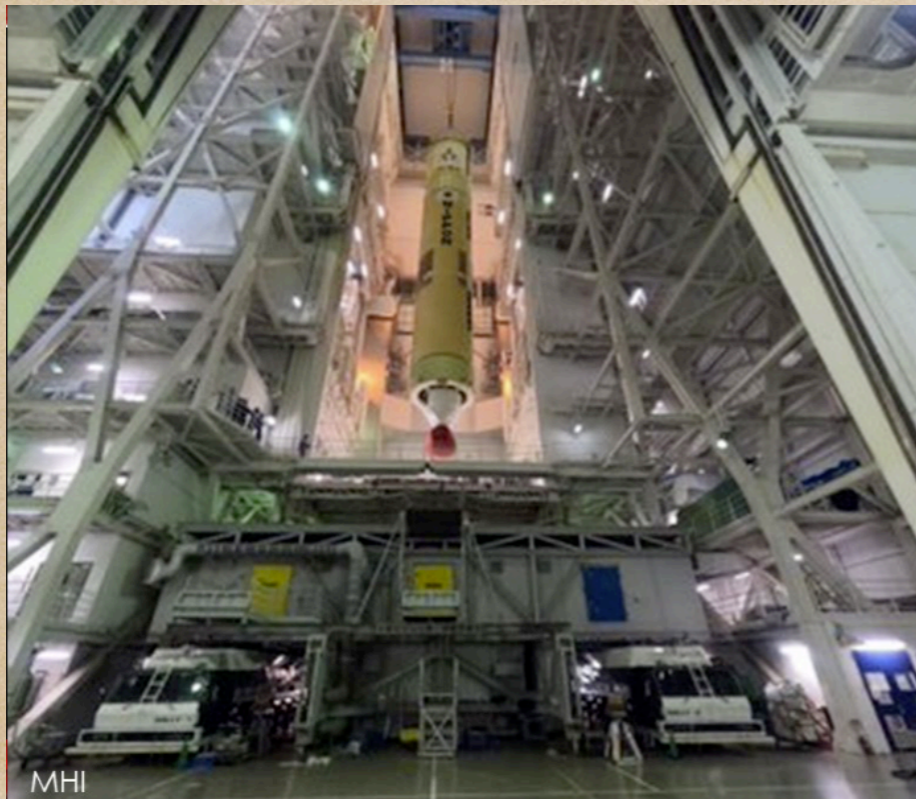
つくば → 種子島



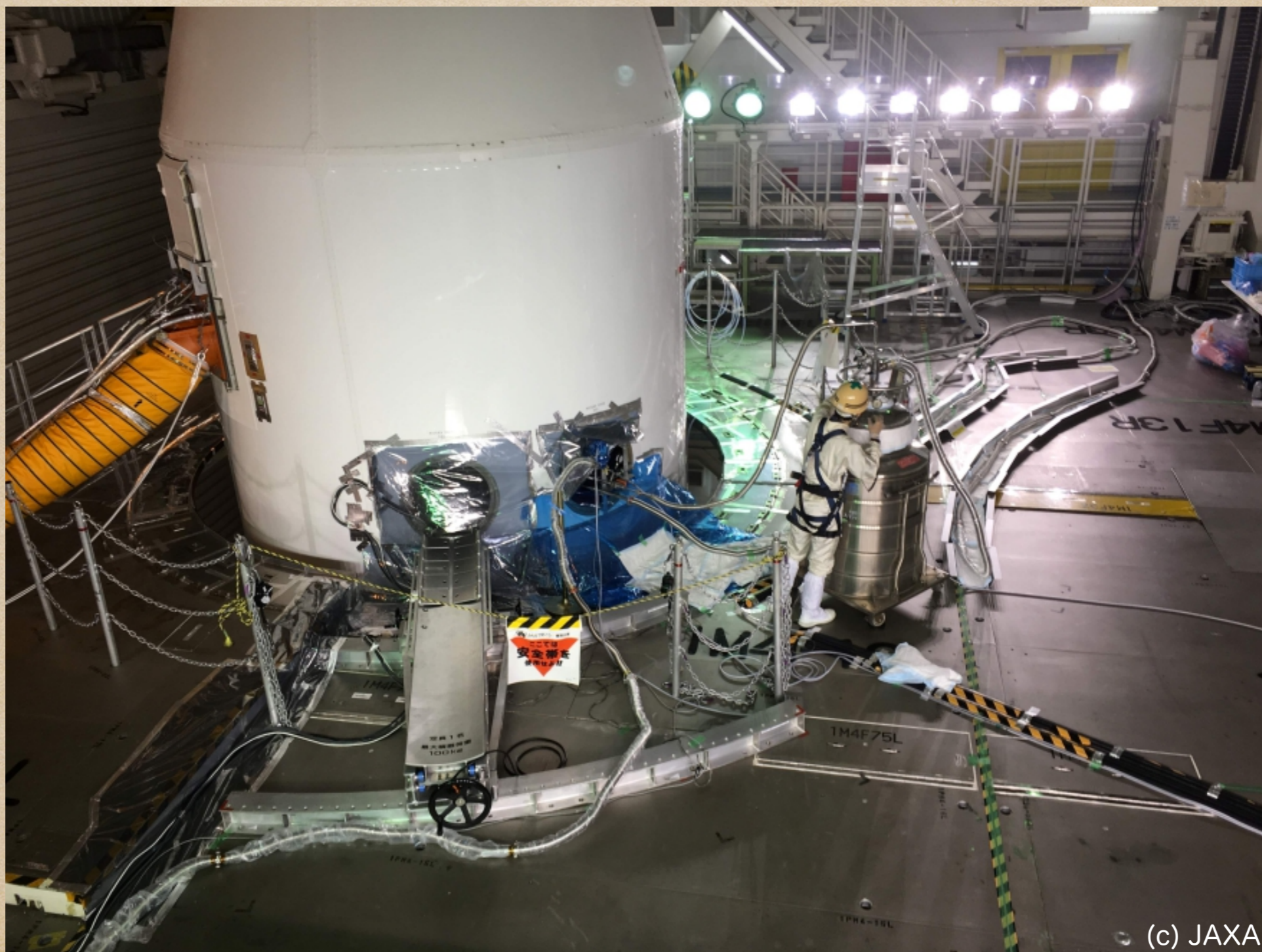
フェアリングに搭載



組立棟に移動



液体ヘリウムを注入



(c) JAXA

組立棟から射場へ



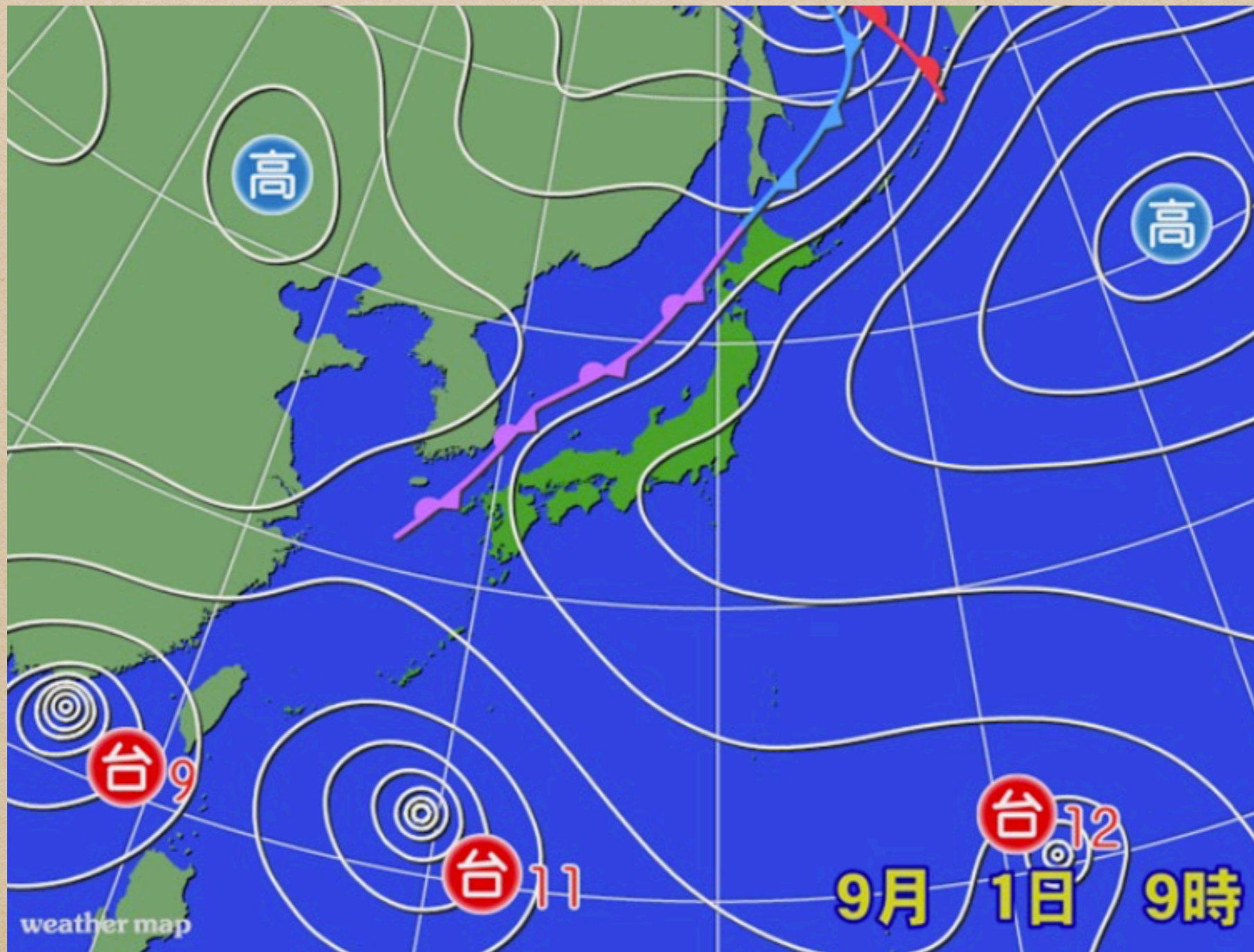
組立棟から射場へ

JAXA



打ち上げ延期

(当初は2023.8.26打上予定だった)



2023.9.7 打ち上げ成功



スケジュール

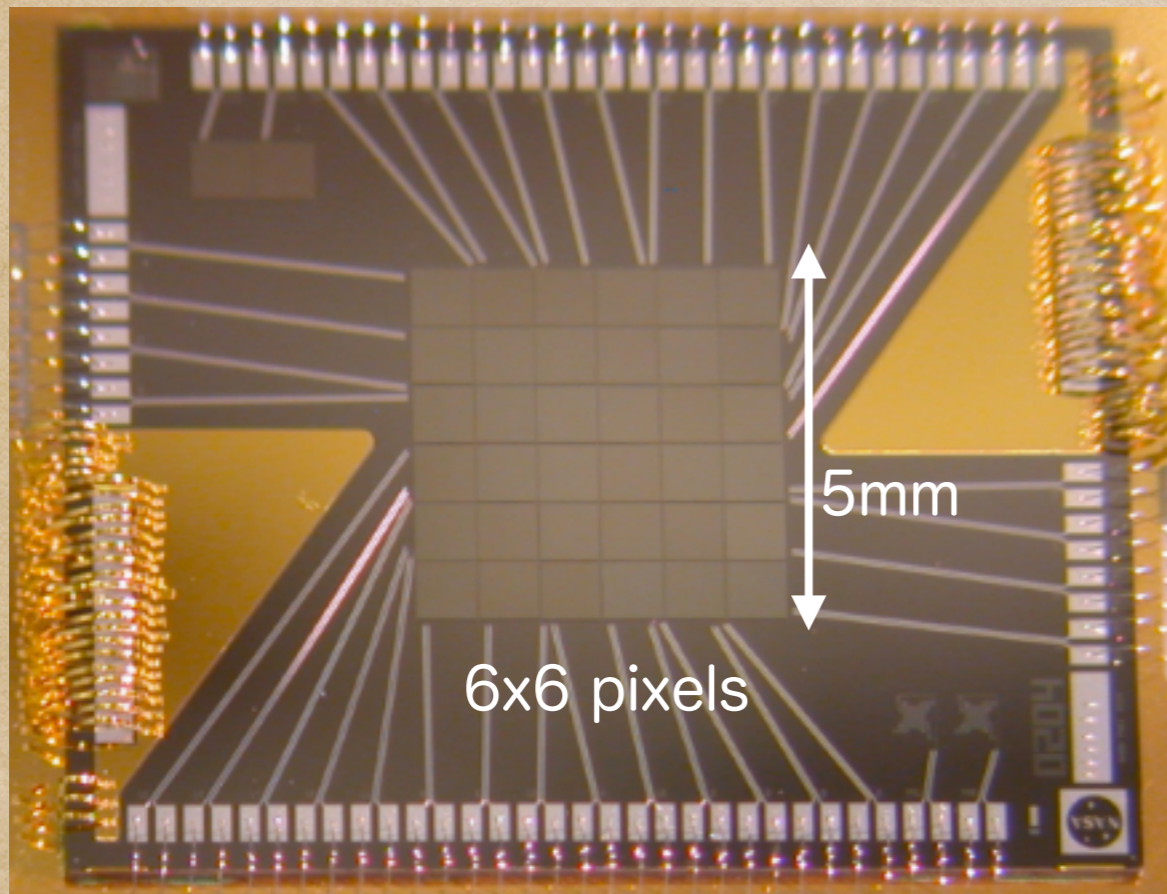
年	月	観測天体	公募観測
2023	9	コミッショニング (一部較正天体、PV天体含む)	
	10		
	11		Call for Proposal
	12		
2024	1	PV天体 (Performance Verification) +較正天体	
	2		
	3		
	4		プロポーザル締切 (4/4)
	5		
	6		
	7		
	8	公募観測	
	9	(以下、1年ごとに公募)	

目次

- 0. NGC 4151 (セイファート1.5型) のスペクトル
- 1. XRISM衛星の概要
 - a. Resolve検出器
 - b. Xtend検出器
- 2. 初期観測計画
 - a. Active Galactic Nuclei
 - b. Black Hole Binary
- 3. 公募観測の案内

Resolve検出器

Kilbourne+18



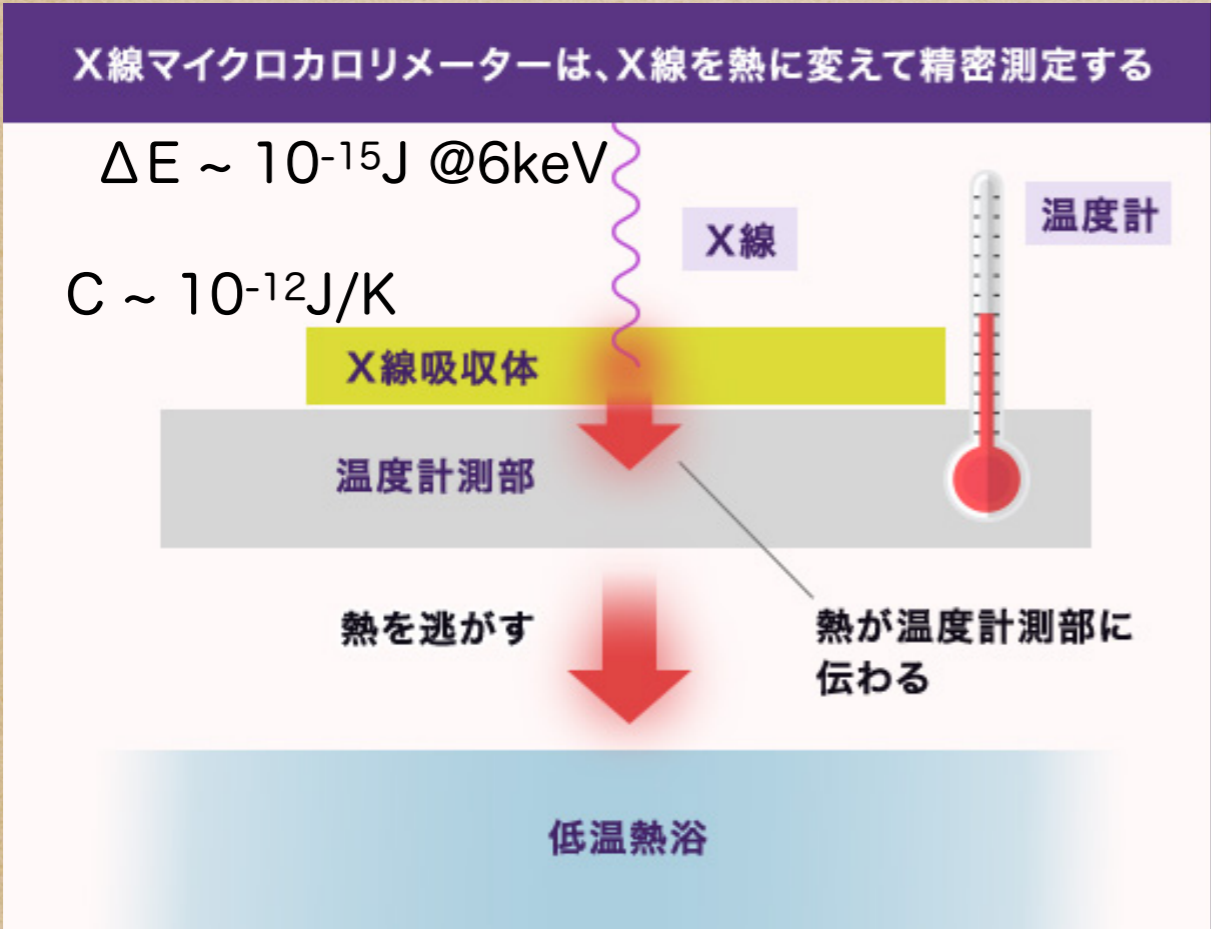
PSP description document

0.17	0.43	1.00	0.81	1.07	0.46
0.27	0.98	3.55	4.93	3.37	1.05
0.10	0.81	5.05	24.4	4.82	0.85
0.27	1.06	3.52	4.90	3.53	1.05
0.17	0.41	1.03	0.85	1.04	0.40
0.10	0.17	0.27	0.10	0.24	0.15

6x6 ピクセルで構成されている。

↑ point sourceを観測した際のカウント分布 (単位は%, HPD = 1.3 arcmin)

マイクロカロリメータの仕組み



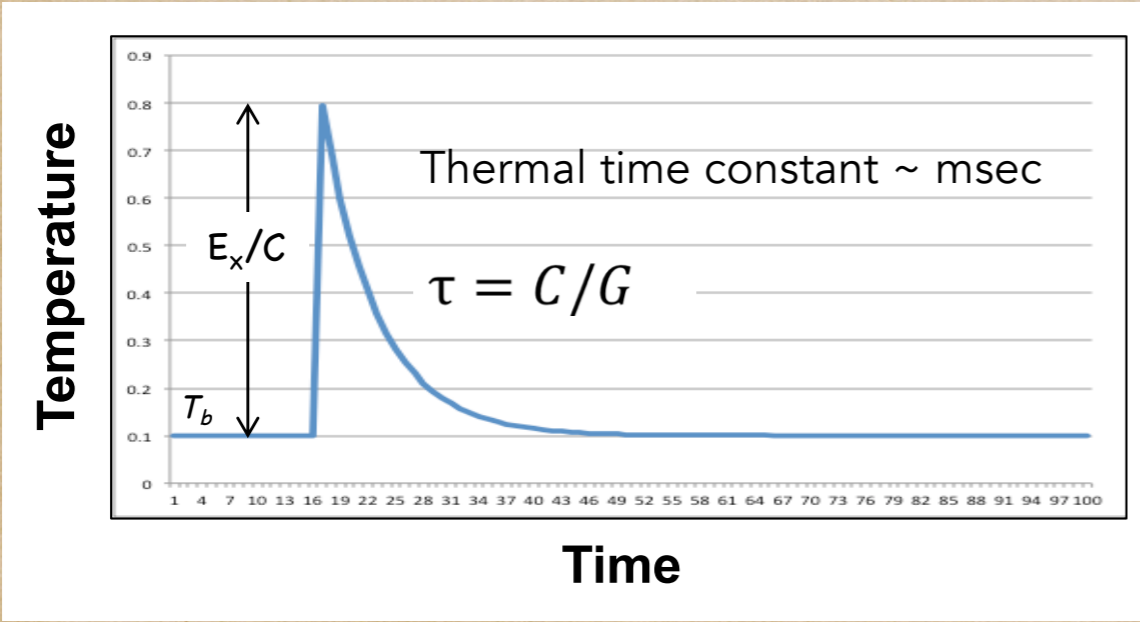
- X線光子が吸収された際の温度上昇を捉えることで、エネルギーを正確に測定する

- X線光子のエネルギー $E \sim 10^{-15} \text{J} @ 6 \text{keV}$

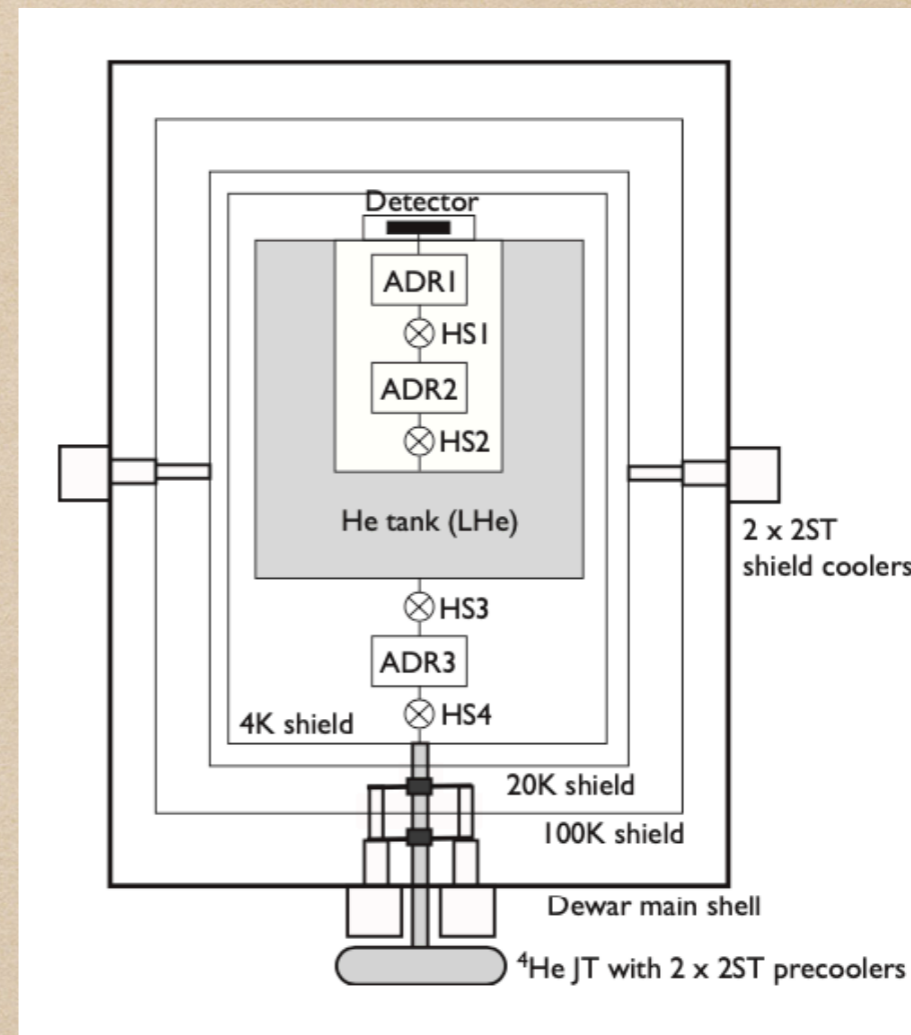
- 熱容量 $C \sim 10^{-12} \text{J/K} @ 50 \text{mK}$
 -> $\Delta T = E/C \sim 1 \text{mK}$

- 熱容量 C は T^3 に比例するので、 T を下げれば ΔT を劇的に増加させることが可能

-> $T = 50 \text{mK}$ まで冷却している



冷却デューワー

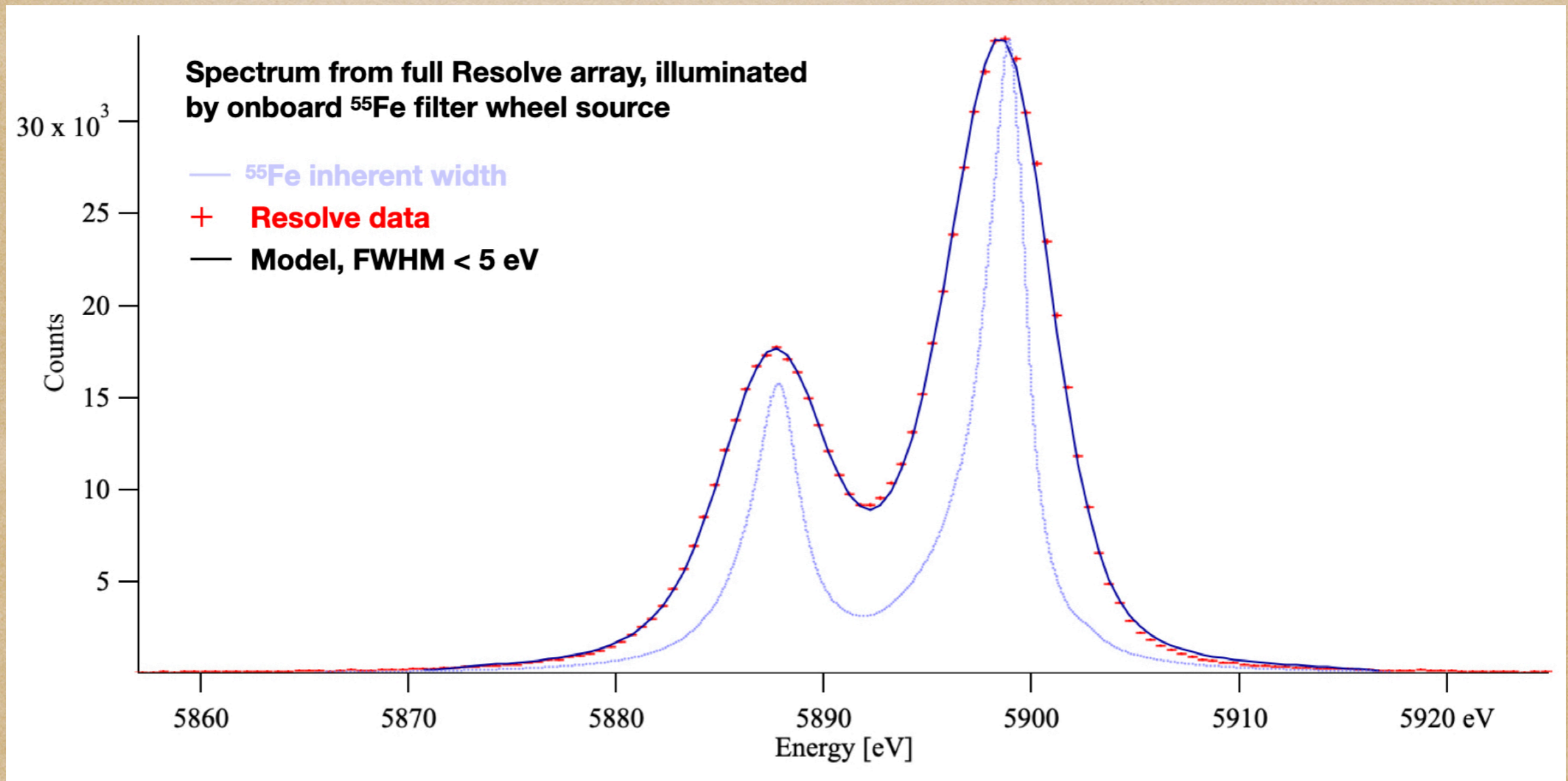


- 複数台の冷凍機により4Kまで冷やされたのち液体Heタンクで1K程度まで冷やされる。
- さらに2段の断熱消磁冷凍機（ADR1, 2）によって検出器部は50mKに冷却される。
- 全てが正常に動けば液体Heを用いて3年以上の観測が可能で、その後も追加の冷凍機（ADR3）を用いた無冷媒運転により観測継続可能。

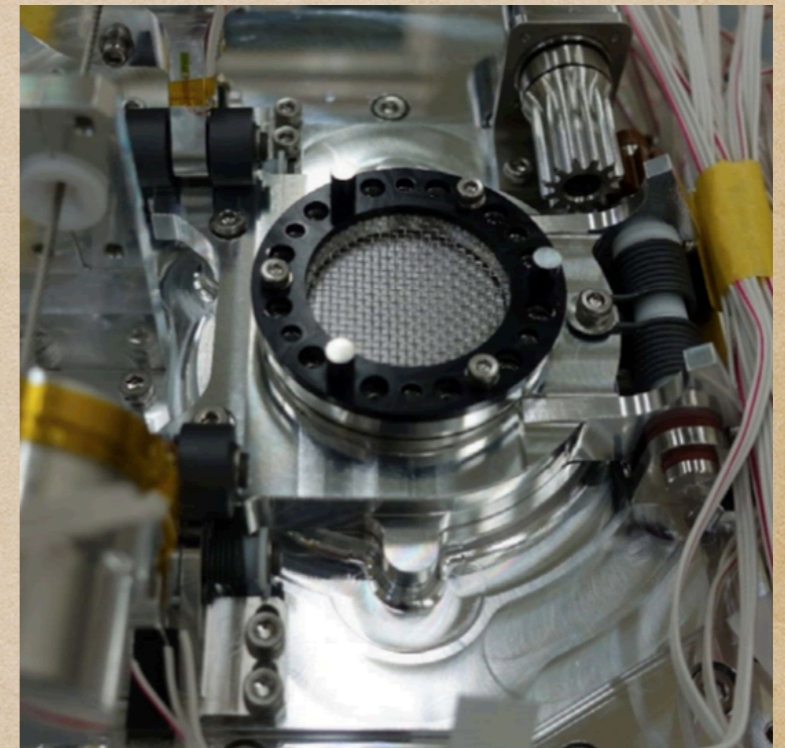
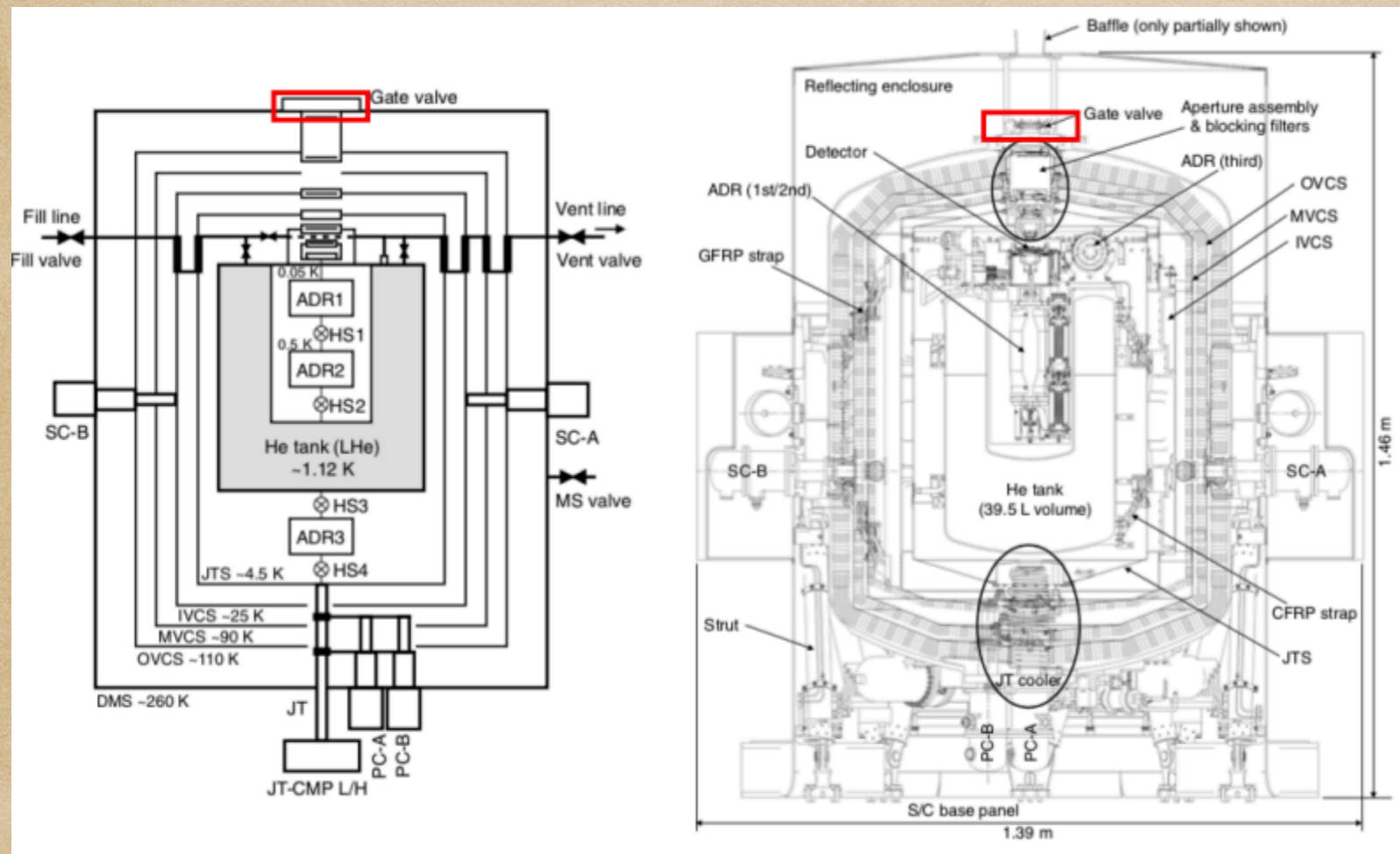
エネルギー分解能評価

軌道上での実測として $\leq 5\text{eV}$ FWHM @6keV を達成

校正線源(^{55}Fe)から到来するMnKa輝線をモデルフィットしたもの



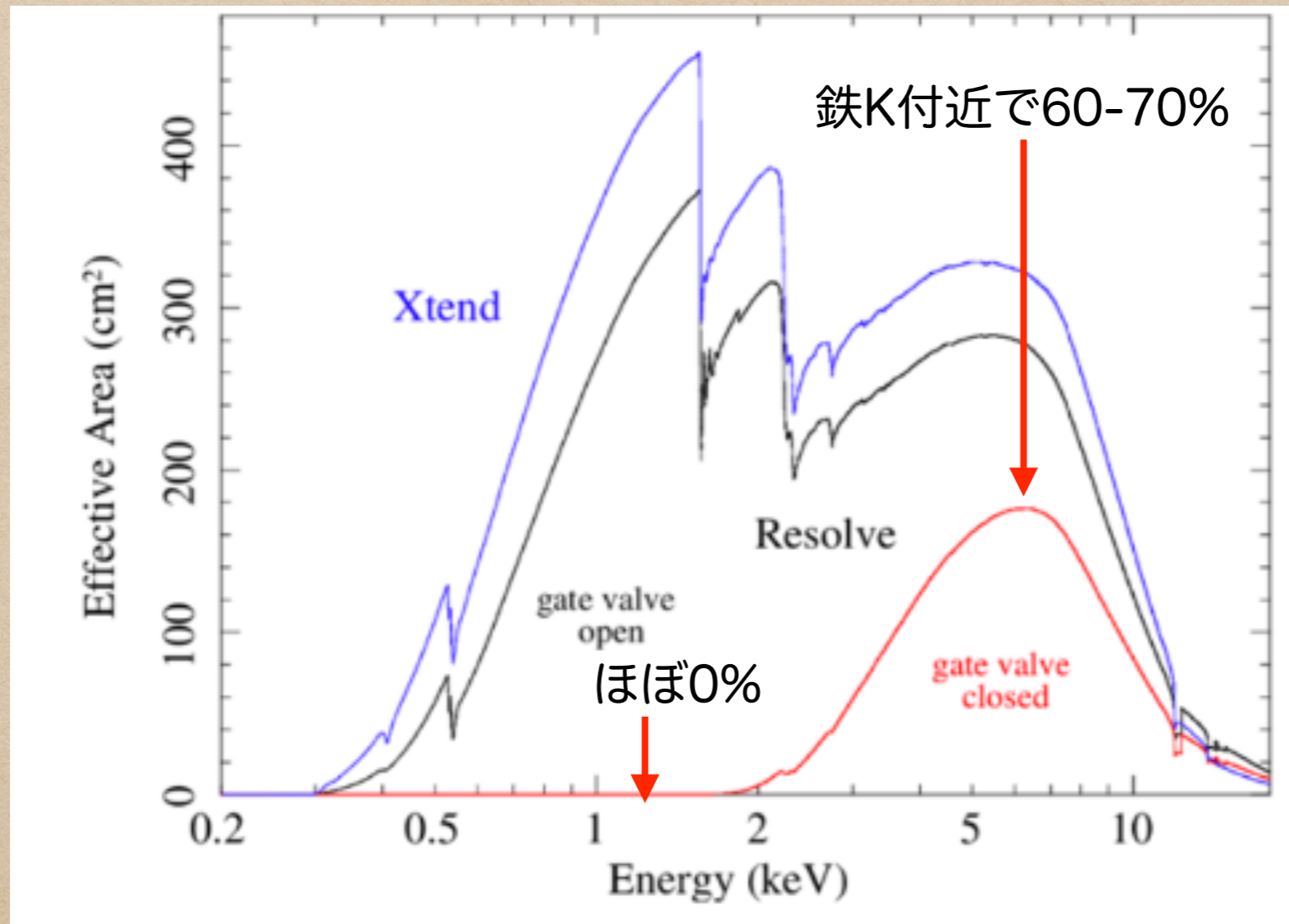
ゲートバルブ (X線入射部保護膜)



- 地上でデュワーの真空を保持する
- 打ち上げ直後のコンタミネーションからデュワー内部を守る
- 現状、この保護膜がまだ開放できていない

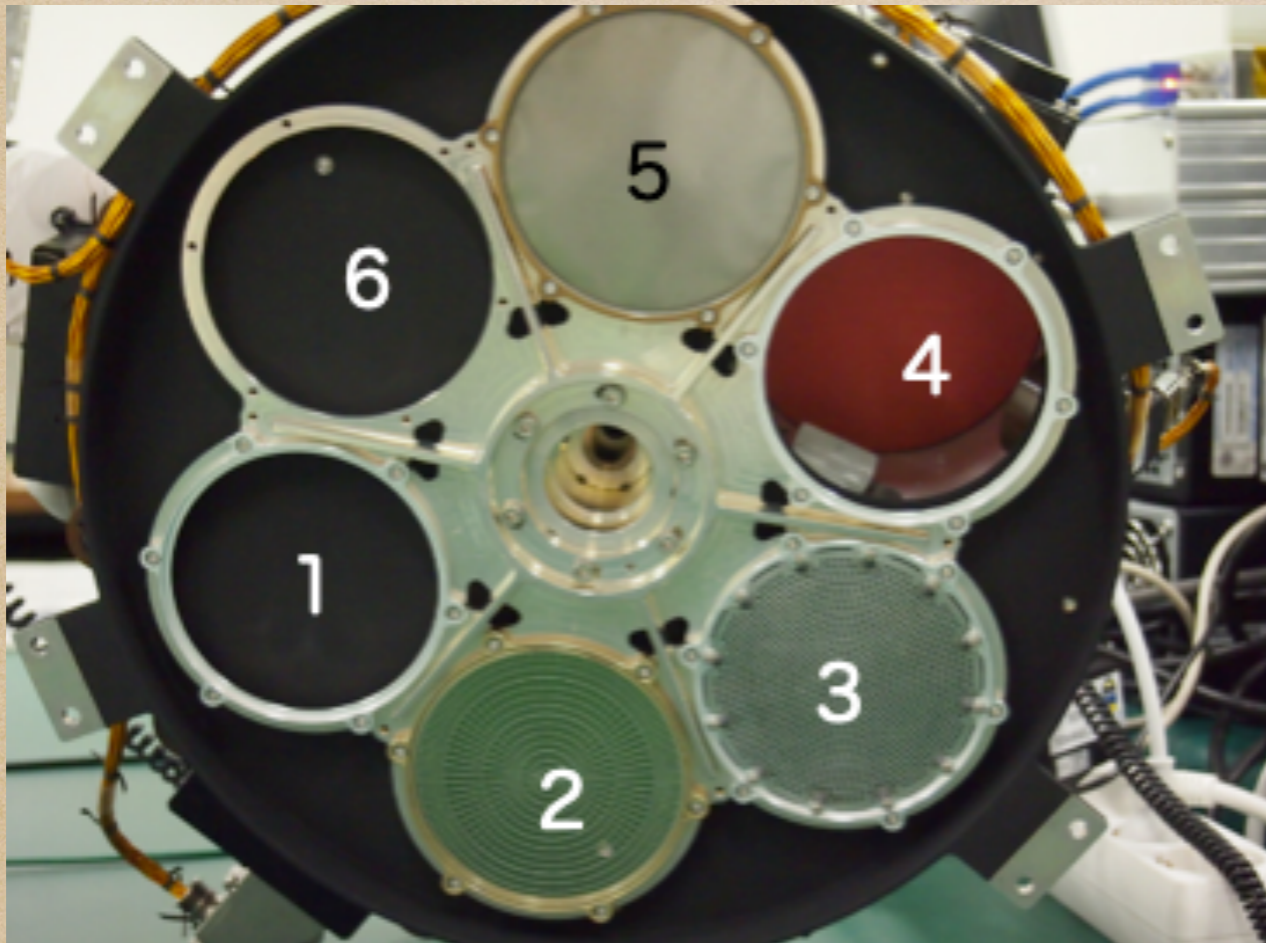
有効面積

ゲートバルブが閉まっている状態ではベリリウム保護膜越しに観測するため、低エネルギー側がカットされている



- 軌道上較正観測計画の練り直し
- PVプログラムの見直し (ターゲットリストの改訂・観測時間の再評価)

観測モード



- 1: Open
- 2: Optical Blocking Filter
- 3: 25% Neutral Density filter
- 4: Open
- 5: Be filter
- 6: ^{55}Fe + Open

- 光軸上に搭載されたフィルタホイールからユーザが観測天体に適したフィルタを選択可能
- 通常はOpenだが、特に明るい天体を観測する際には25% Neutral Density filterを使う
(明るすぎると分解能が劣化したイベントの割合が高くなるため)

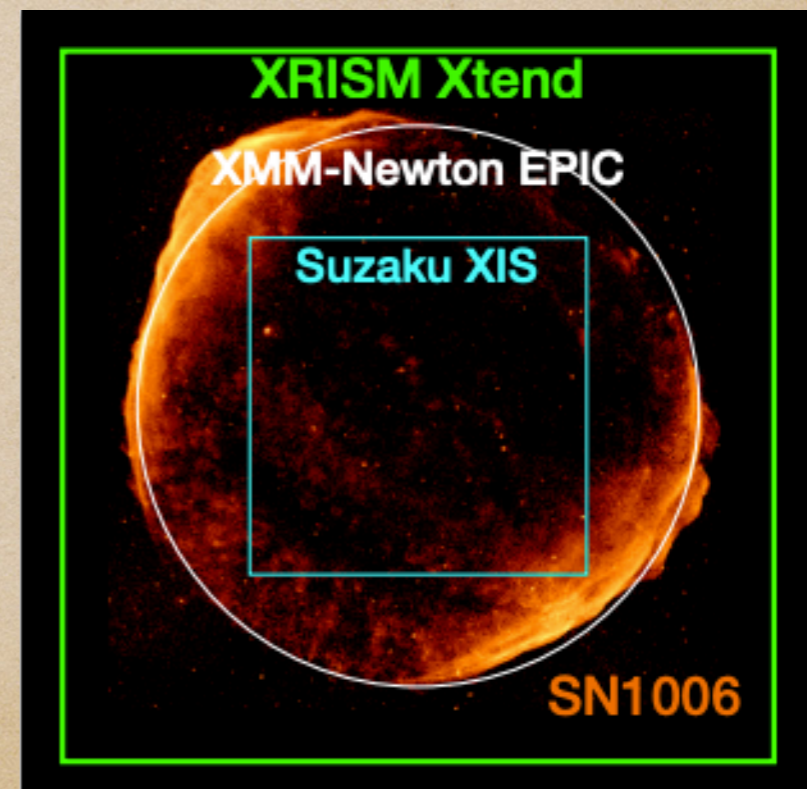
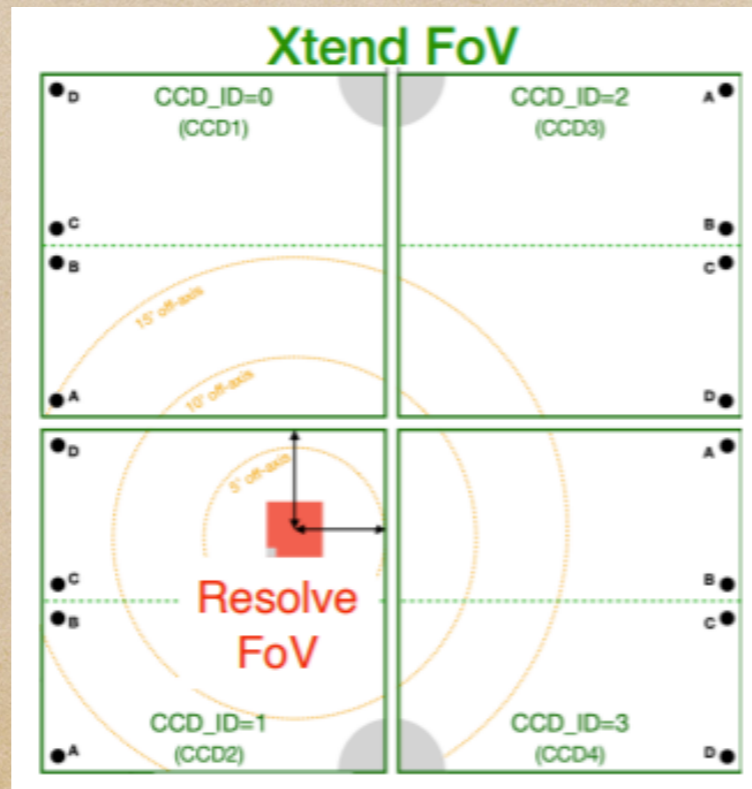
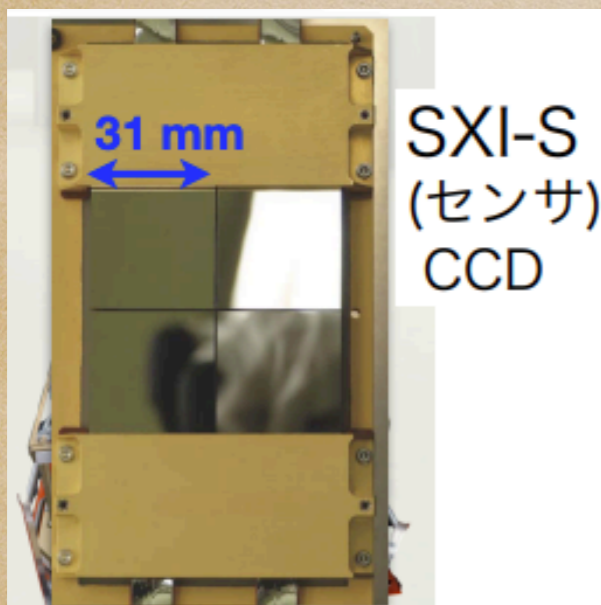
目次

- 0. NGC 4151 (セイファート1.5型) のスペクトル
- 1. XRISM衛星の概要
 - a. Resolve検出器
 - b. Xtend検出器
- 2. 初期観測計画
 - a. Active Galactic Nuclei
 - b. Black Hole Binary
- 3. 公募観測の案内

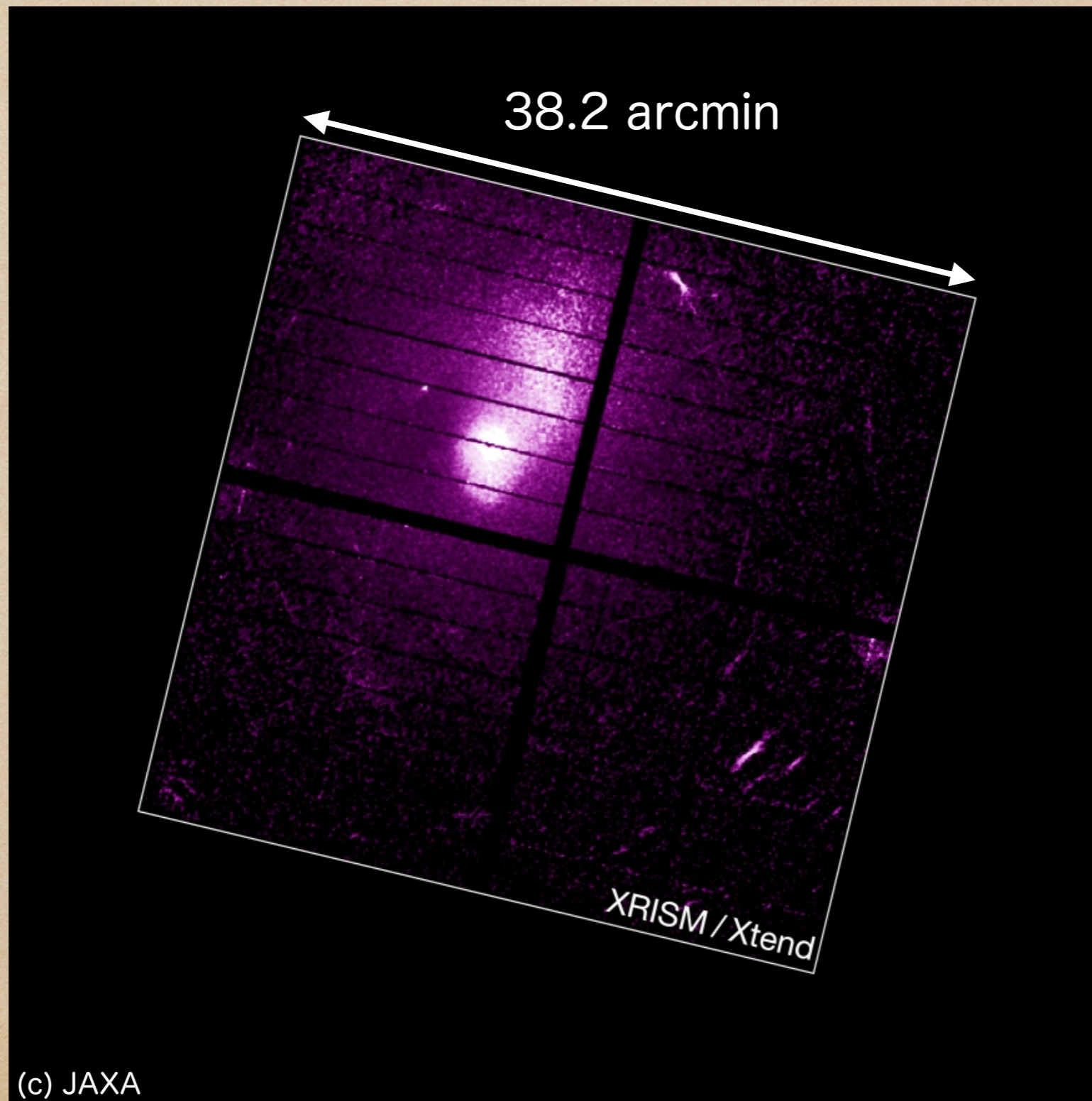
Special thanks: 野田博文 (大阪大)、鈴木寛大 (JAXA)、米山友景 (中央大)

Xtend

- X線CCDカメラ
- 帯域：0.4-13keV
- 視野：38'x38'
- エネルギー分解能：
~180eV @5.9keV
- 角分解能：<1.7' (HPD)
- Resolveと同時に広い視野で見る
 - Resolveで注目する天体以外の寄与（バックグラウンド、周辺天体のもれ混み）をはっきりさせる
- Xtend単体でももちろん活躍する
 - 「すざく」並みの低いバックグラウンド
 - XMM-Newtonの2倍の広視野

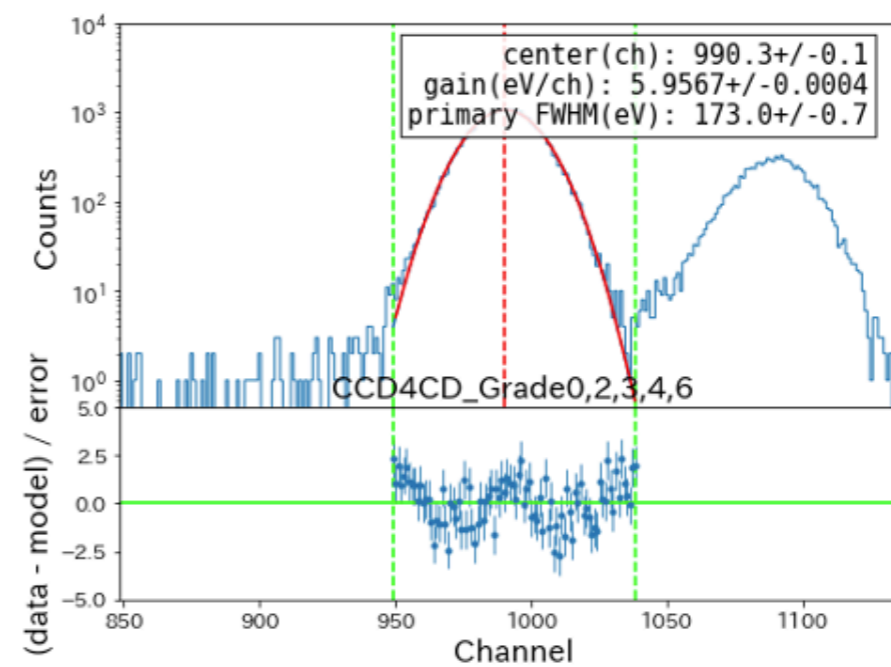
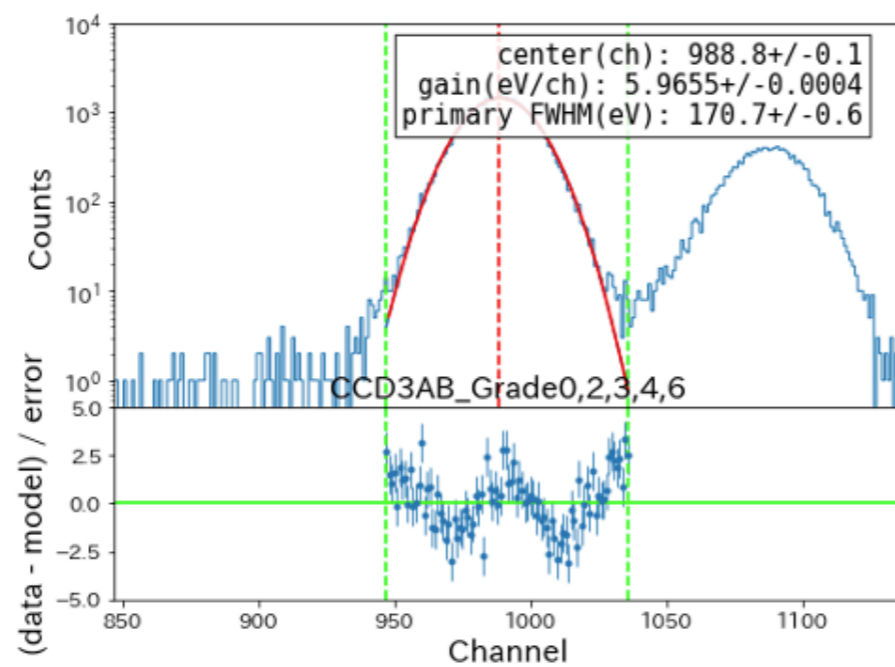
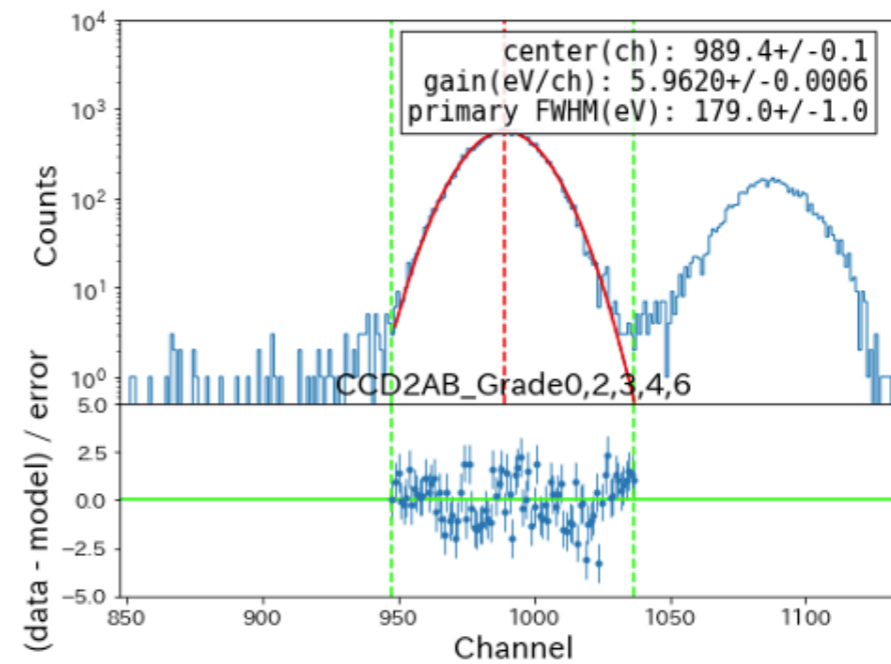
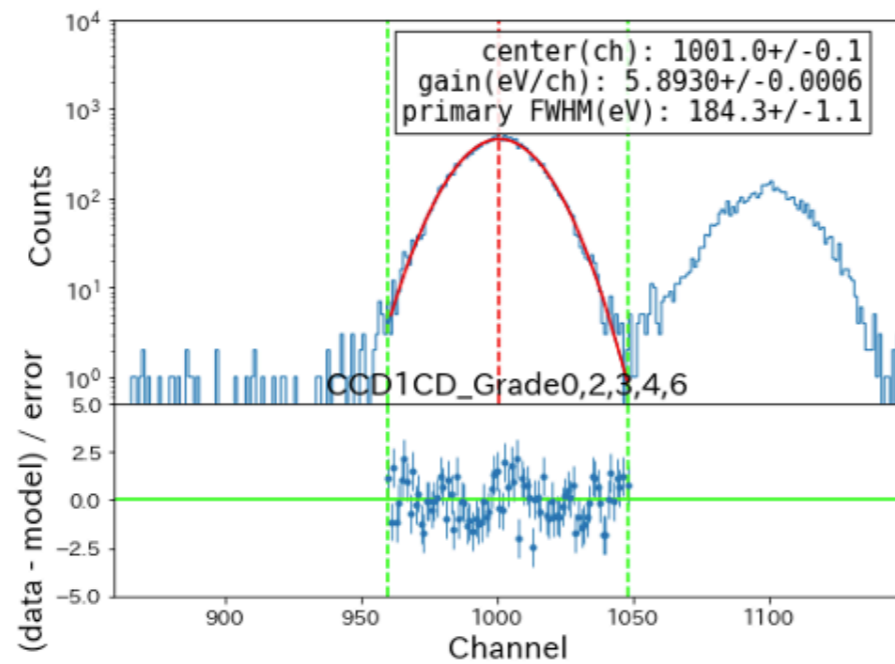


実際のイメージ (Abell 2319)

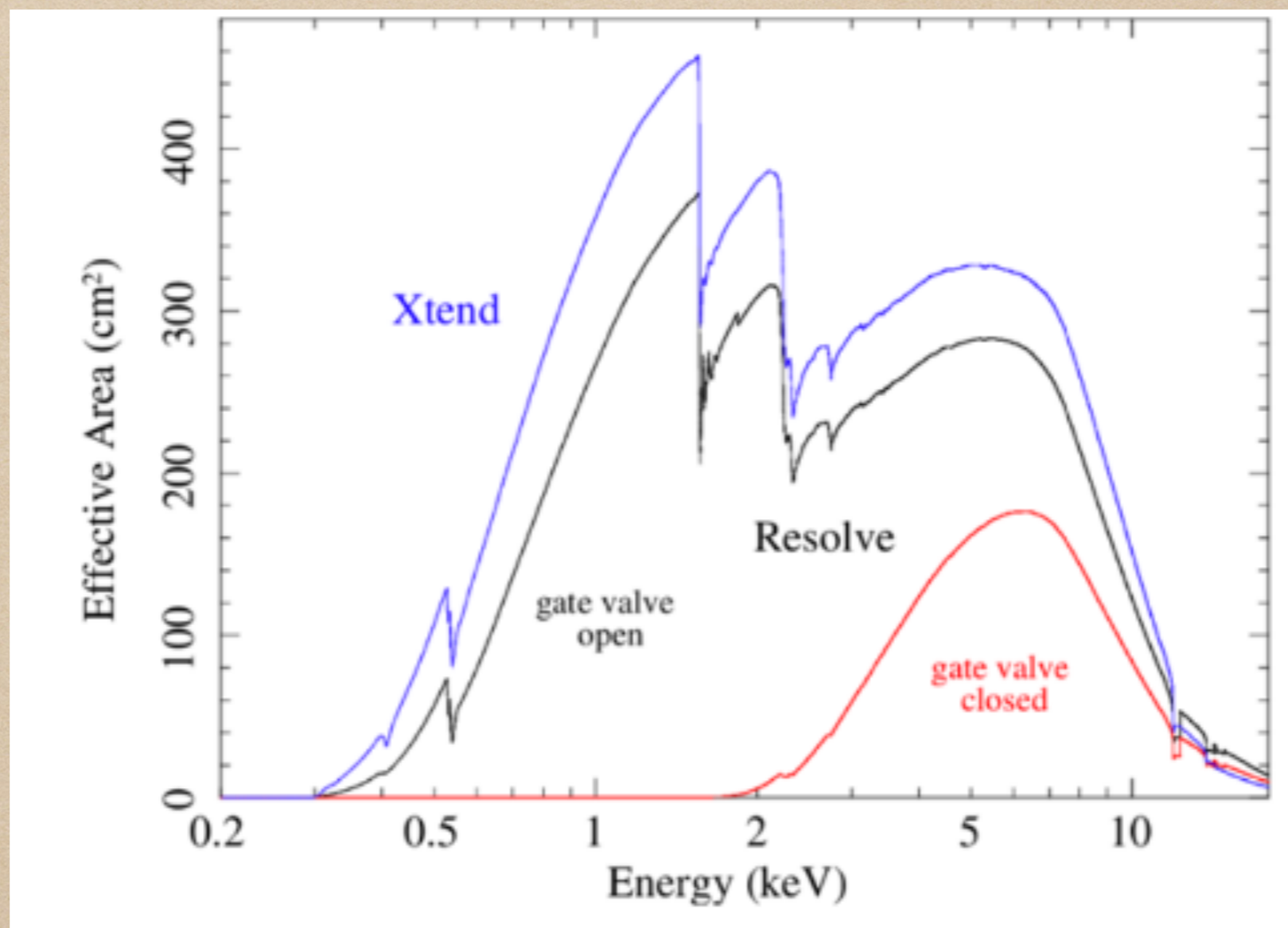


エネルギー分解能

$\Delta E \sim 180\text{eV}$ @ 5.9keV (要求値の 200eV を満たしている)



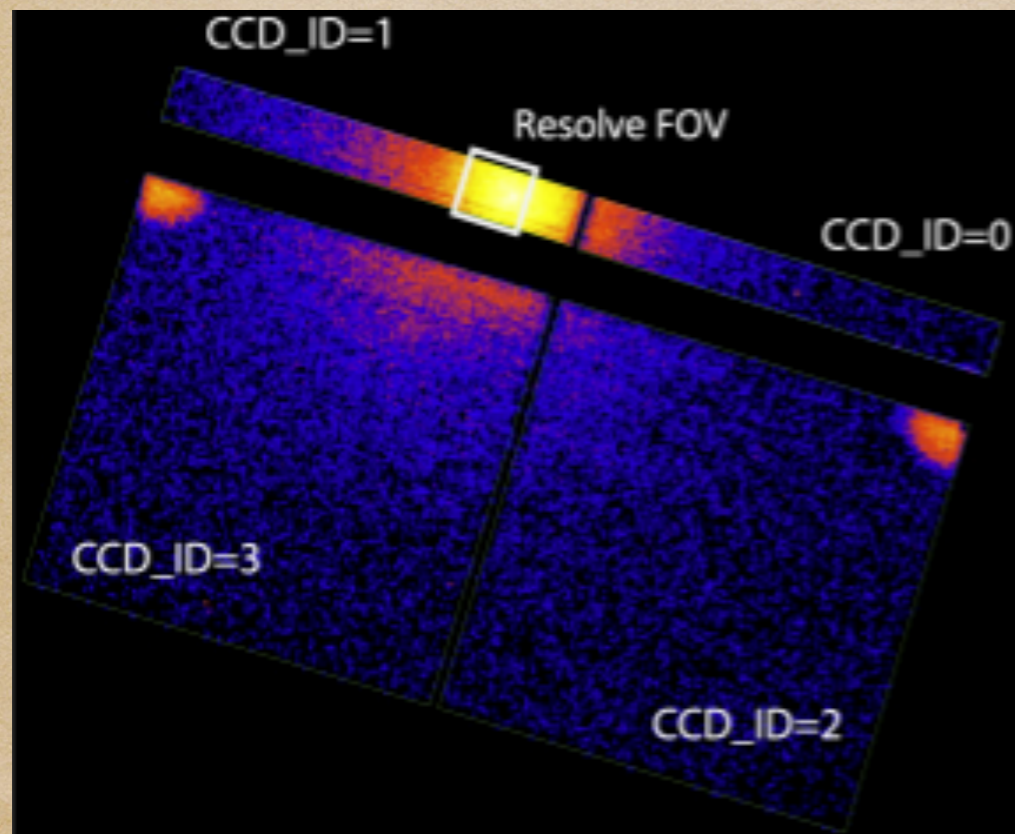
有効面積



特にゲートバルブが開放されていない現状において、Xtendを使ってsoft側を決定することは重要

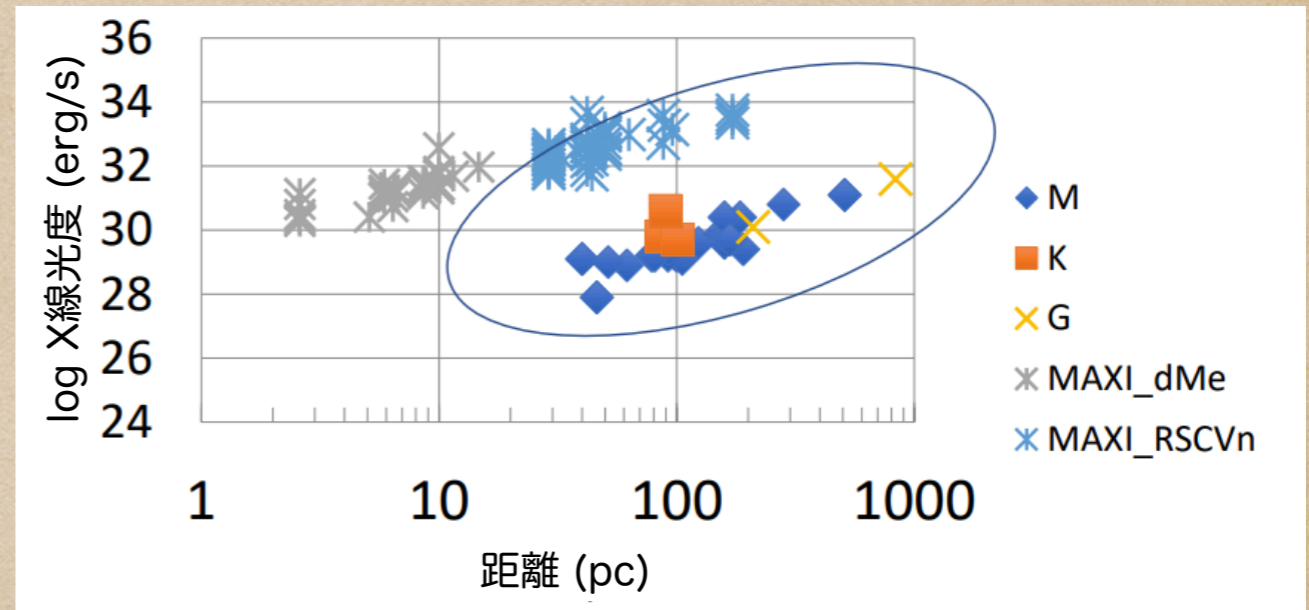
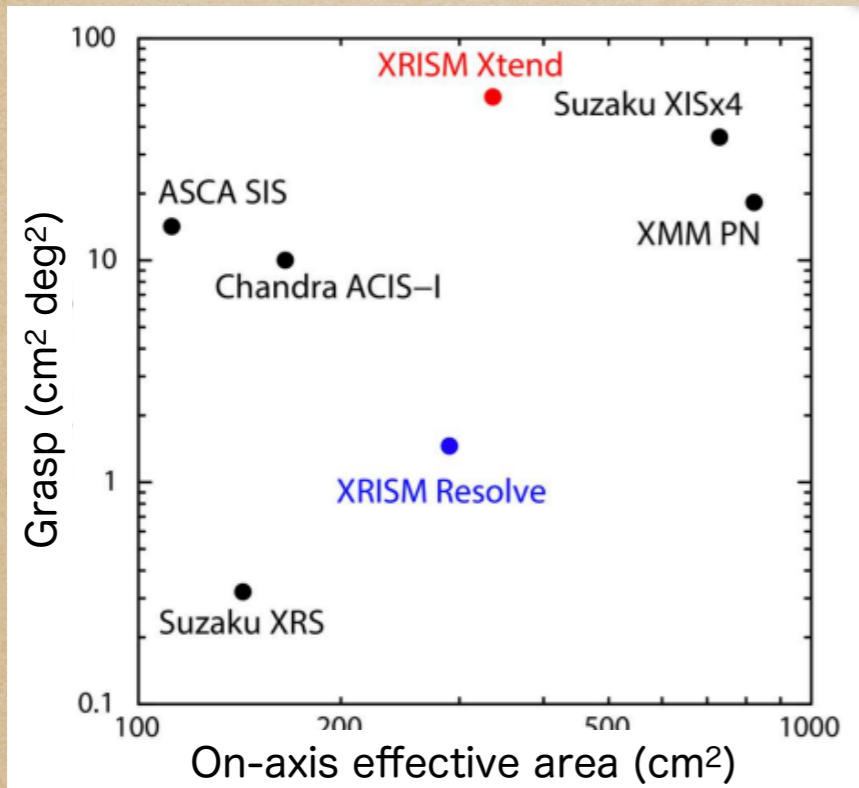
観測モード

Mode	Region size	Frame exposure	Live time fraction	Purpose
Full window	1	4.0 sec	0.99	General
1/8 window	1/8	0.46 sec	0.93	Bright/variable sources (against pile-up, etc.)
1/8 window + 0.1-s burst	1/8	0.06 sec	0.12	Bright/variable sources (against pile-up, etc.)
0.1-s burst	1	0.06 sec	0.015	Crab mode, not for users



- 典型的なAGNだと 1/8 window mode
- BHBだと 1/8 window + 0.1 s burst

Xtend Transient Search (XTS)



最大級のGrasp (有効面積x視野)

-> 視野内の突発天体を探査し、速報する

- 恒星フレアの場合、MAXIと比べて4桁以上暗い天体を検出可能
- BH binaryのoutburstにも威力を発揮

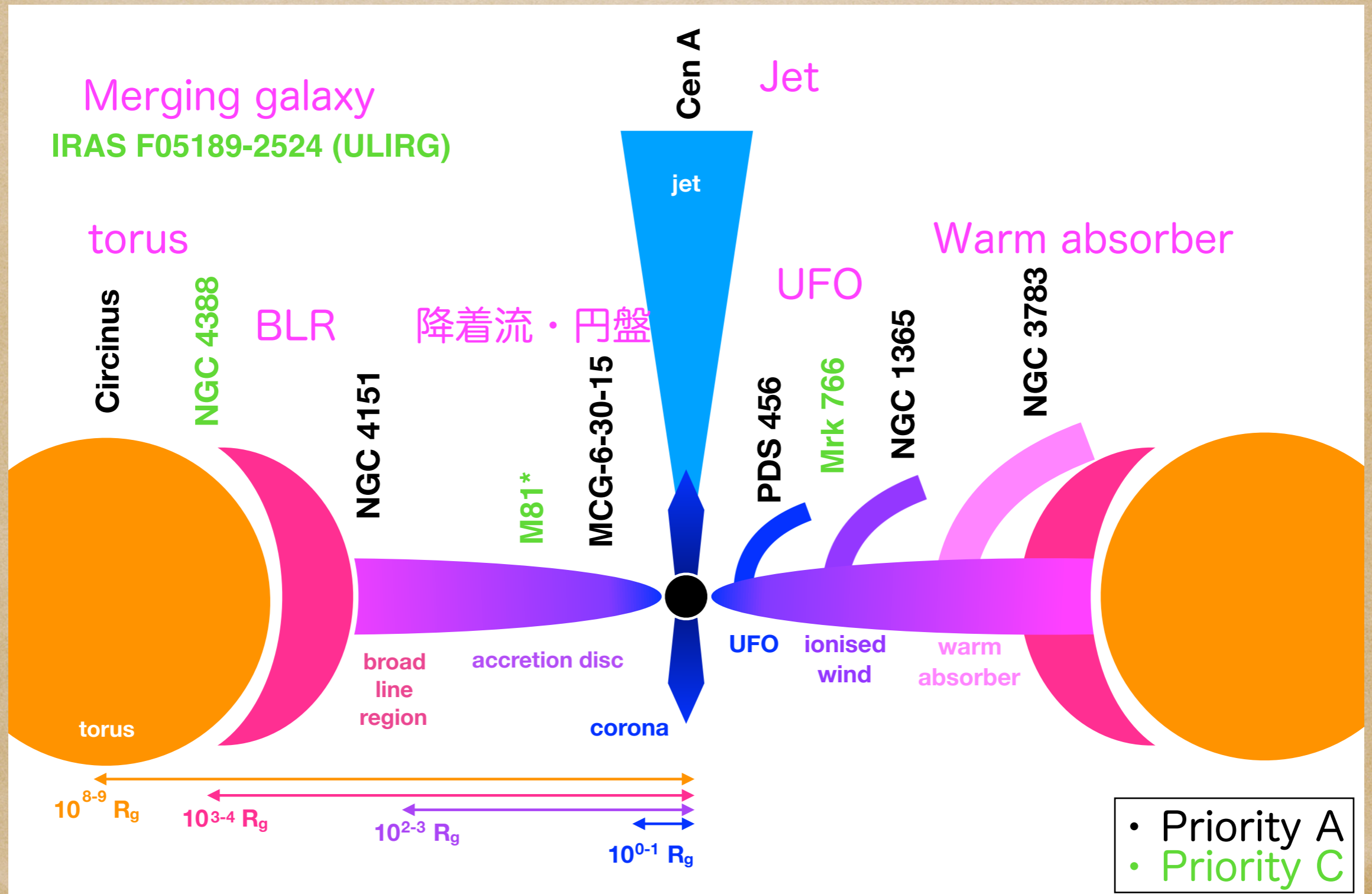
- Xtend視野のうちResolve視野をのぞいた部分を探査
- 検出後、XTS teamによる科学的価値判断の上でAtel, GCNに投稿
- ~10新天体/年 + 既知天体の変動の検出を期待

XRISM で time-domain astronomy に貢献する

目次

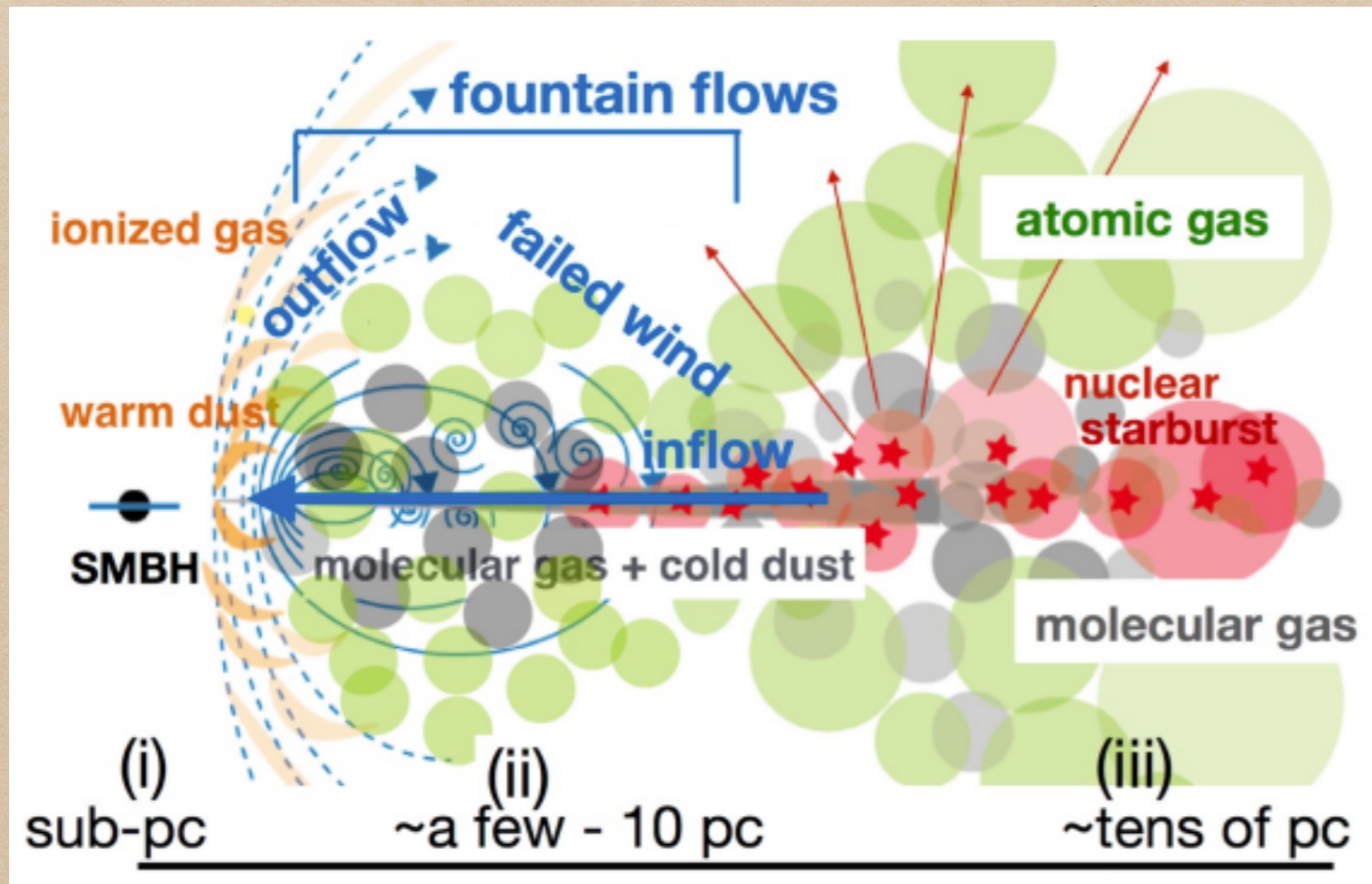
- 0. NGC 4151 (セイファート1.5型) のスペクトル
- 1. XRISM衛星の概要
 - a. Resolve検出器
 - b. Xtend検出器
- 2. 初期観測計画
 - a. Active Galactic Nuclei
 - b. Black Hole Binary
- 3. 公募観測の案内

PV観測天体 (AGN)



1. BLR, torusの理解

AGN fountain flow model (Wada 2002)

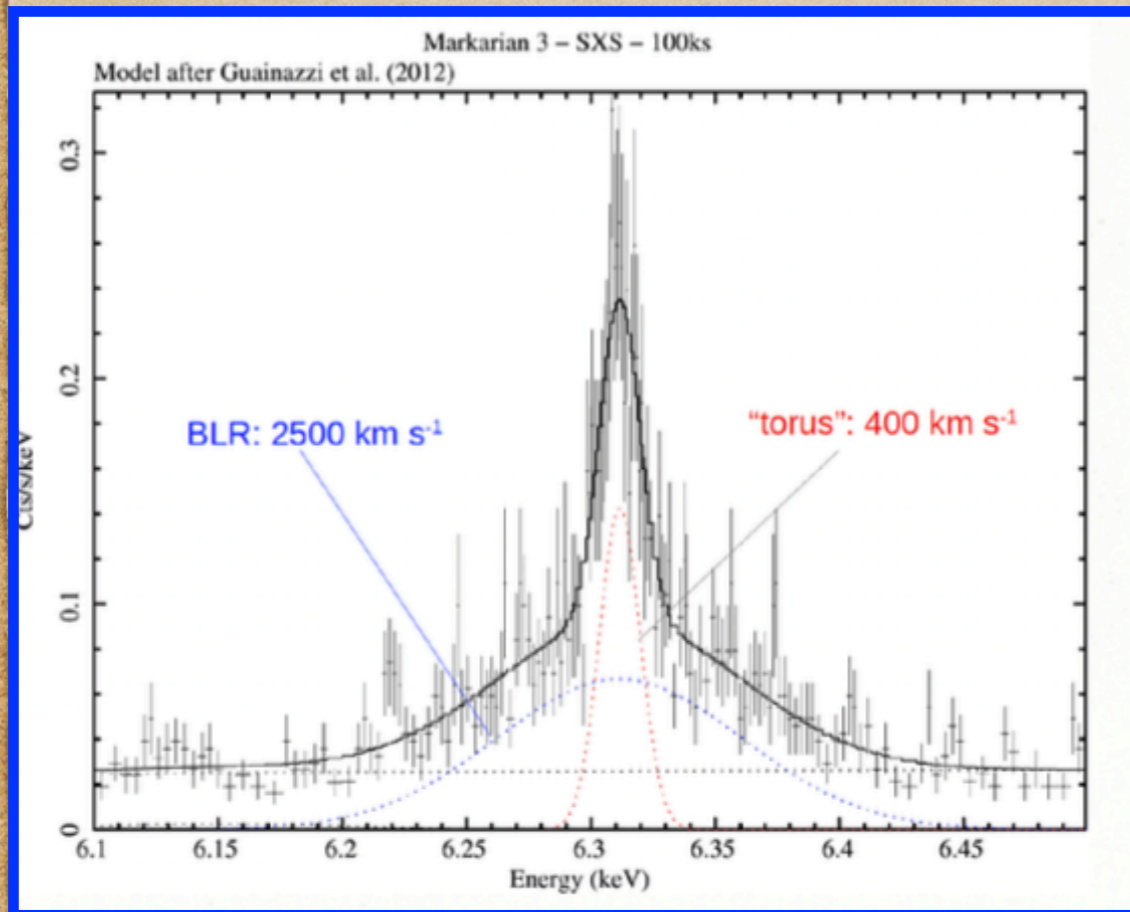


Izumi+18

鉄輝線プロファイルの情報

Doppler velocityによる距離診断

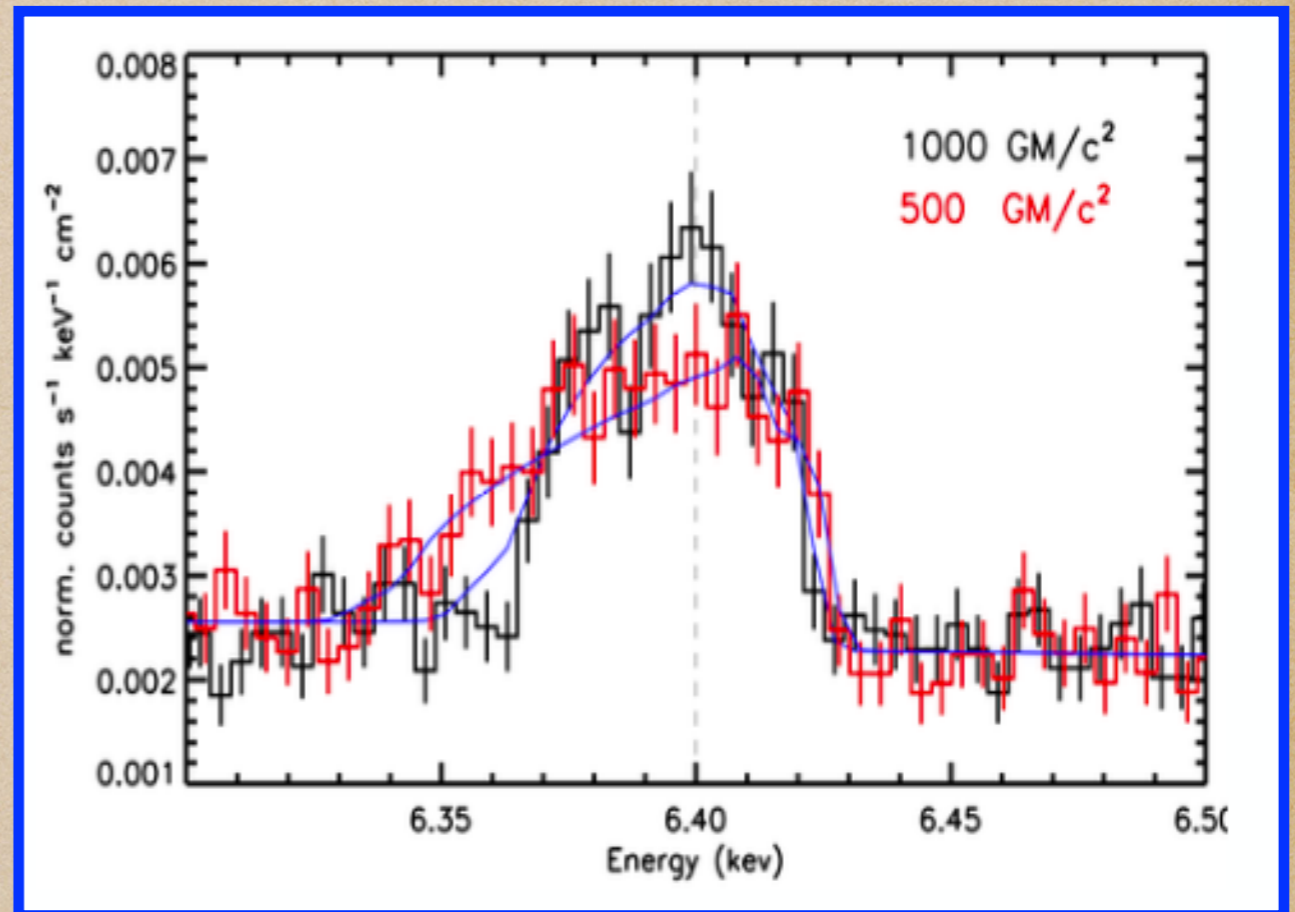
Mrk 3, XRISM/Resolve 160ks



Credit: Matteo Guainazzi

重力赤方偏移による鉄輝線の歪み

NGC 4151, XRISM/Resolve 30ks



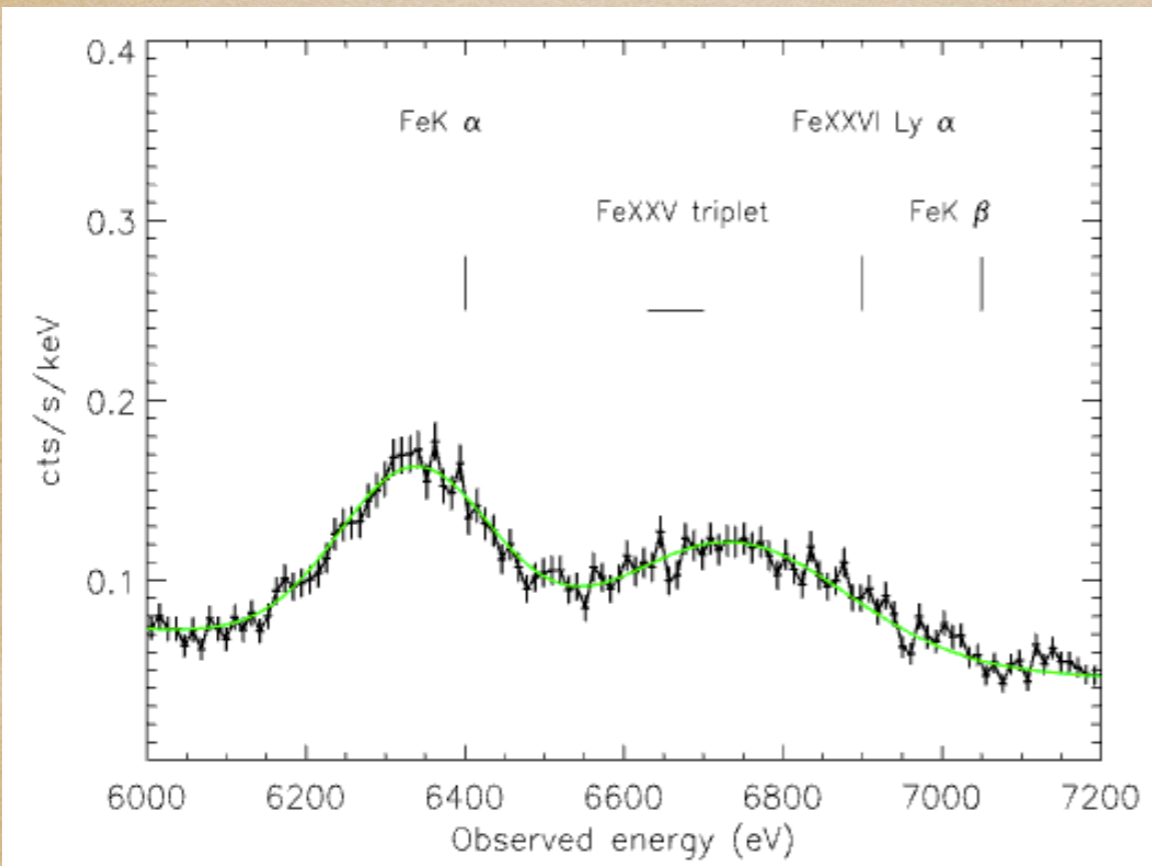
Miller+18

シミュレーション

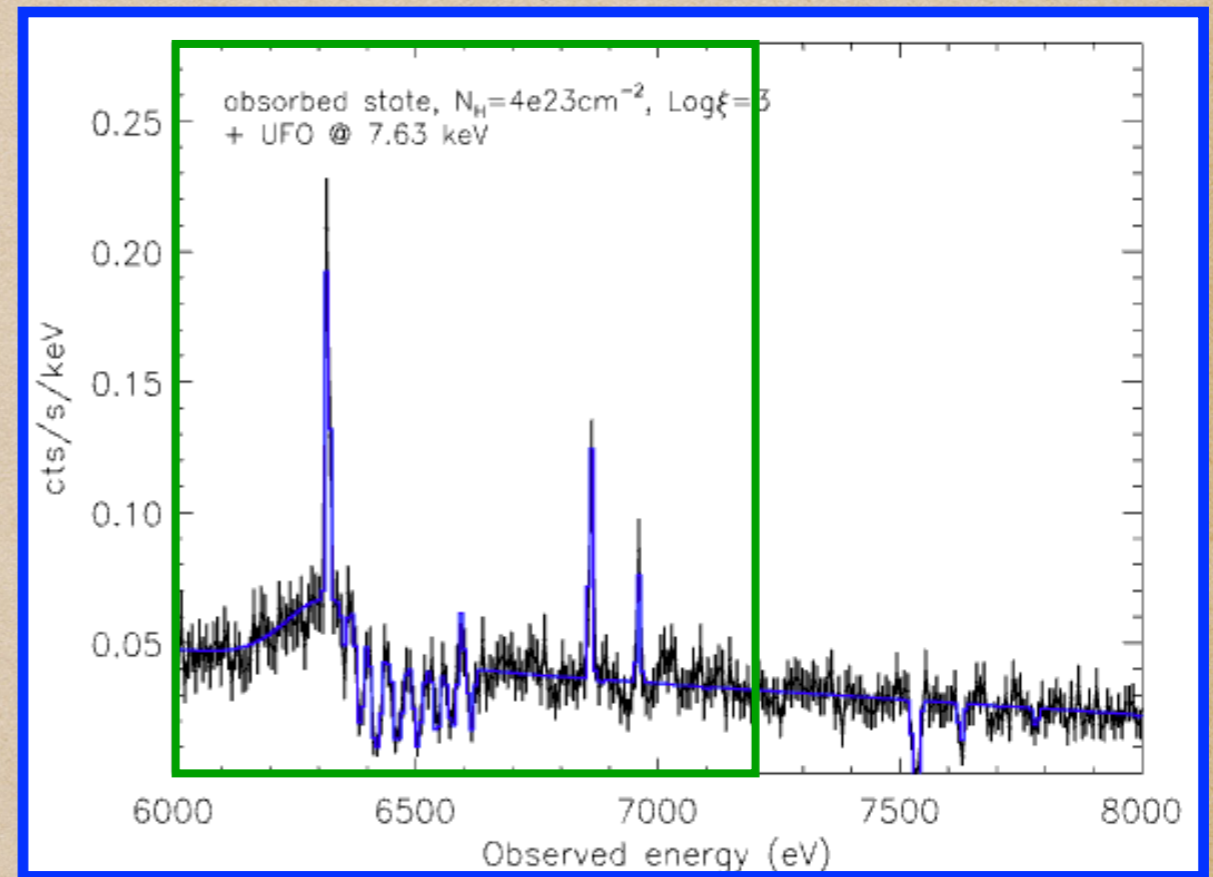
2. AGN outflow

Mrk 766 (Seyfert 1)

XMM-Newton



XRISM/Resolve 130ks



Credit: Elisa Constantini

電離度が異なる複数の鉄イオンによる吸収線を見る

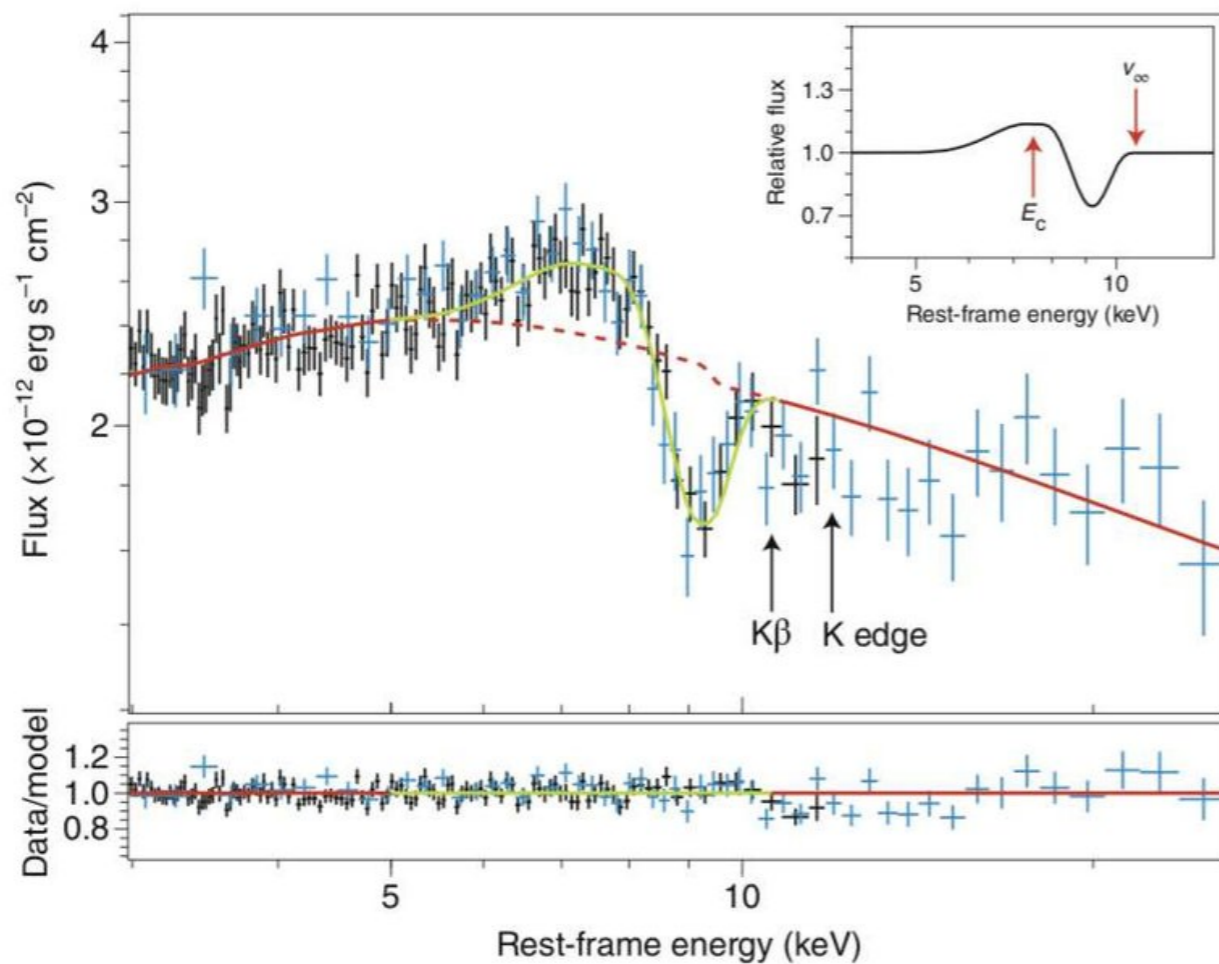
-> 電離パラメータの確定 $\xi = L/nr^2$

シミュレーション

UltraFast Outflow (UFO)

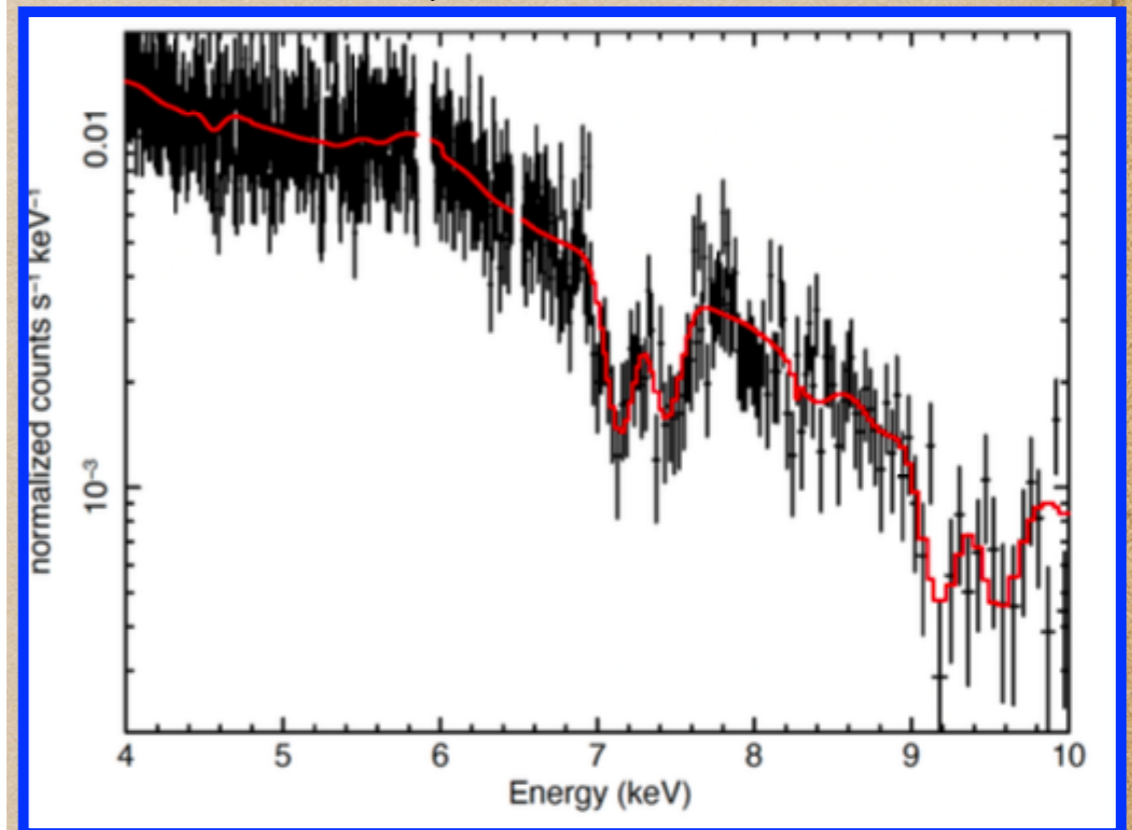
PDS456: nearby quasar, 強いUFOが常に見えている

XMM-Newton



Nardini+15

XRISM/Resolve 240ks



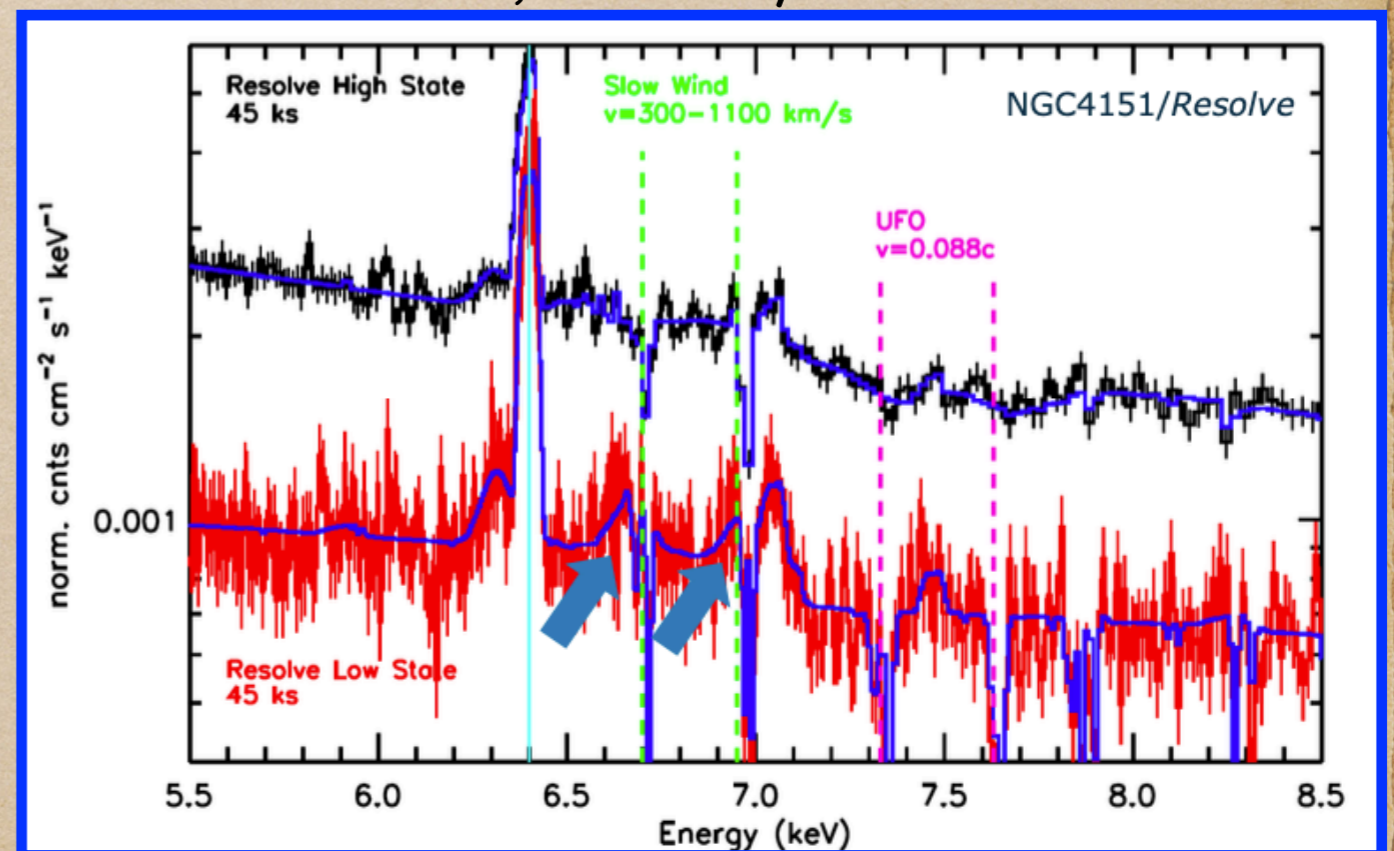
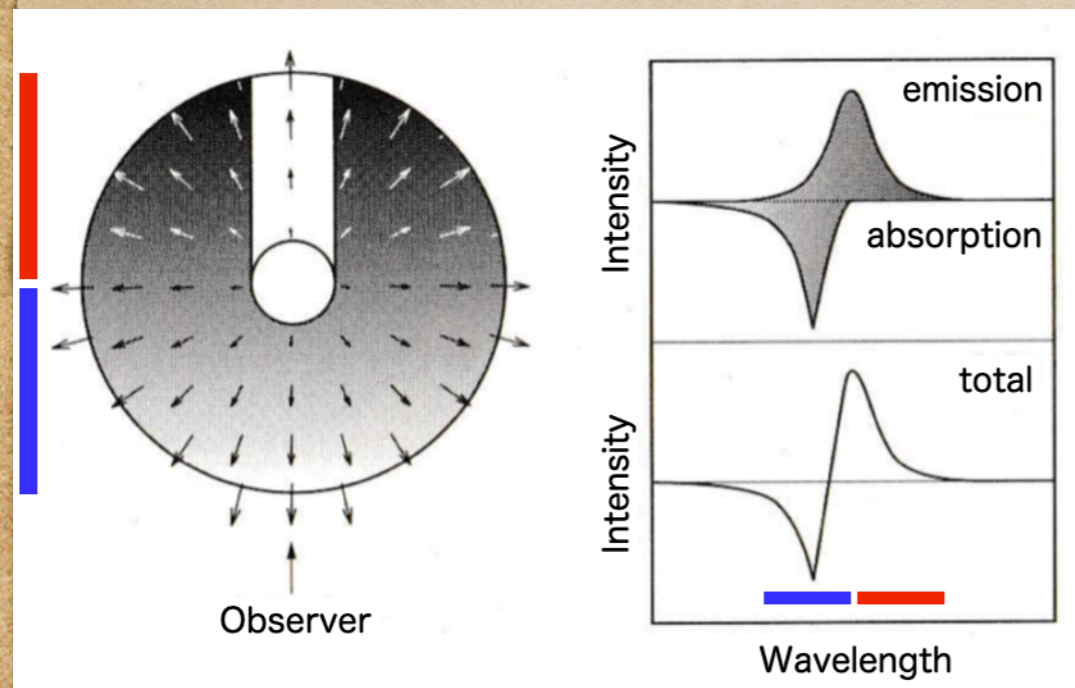
Credit: Kouichi Hagino

シミュレーション

P Cygni profile

- P Cygni profile: blueshiftした吸収線と広がった輝線の重ね合わせ
- 輝線の強度測定 -> windの実質的な立体角 (立体角 x volume filling factor) を求める

NGC 4151, XRISM/Resolve 70ks



Credit: Jon Miller

シミュレーション

目次

- 0. NGC 4151 (セイファート1.5型) のスペクトル
- 1. XRISM衛星の概要
 - a. Resolve検出器
 - b. Xtend検出器
- 2. 初期観測計画
 - a. Active Galactic Nuclei
 - b. Black Hole Binary
- 3. 公募観測の案内

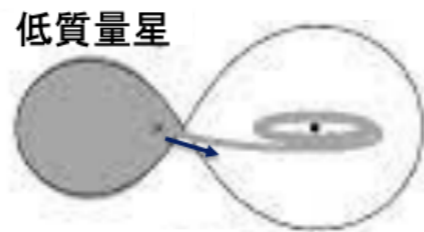
special thanks: 志達めぐみ (愛媛大)

PV観測天体 (X-ray binary)

	BH	NS
LMXB	<ul style="list-style-type: none"> Priority A Priority C 	4U 1624-490 4U 1916-053 GX 13+1 2S 0921-630 Cir X-1
HMXB	Cyg X-1 Cyg X-3	Cen X-3 Vela X-1
ToO	Transient BH binaries	

low mass X-ray binary (LMXB)

- 伴星: 低質量星
- Roche lobe overflow
による降着

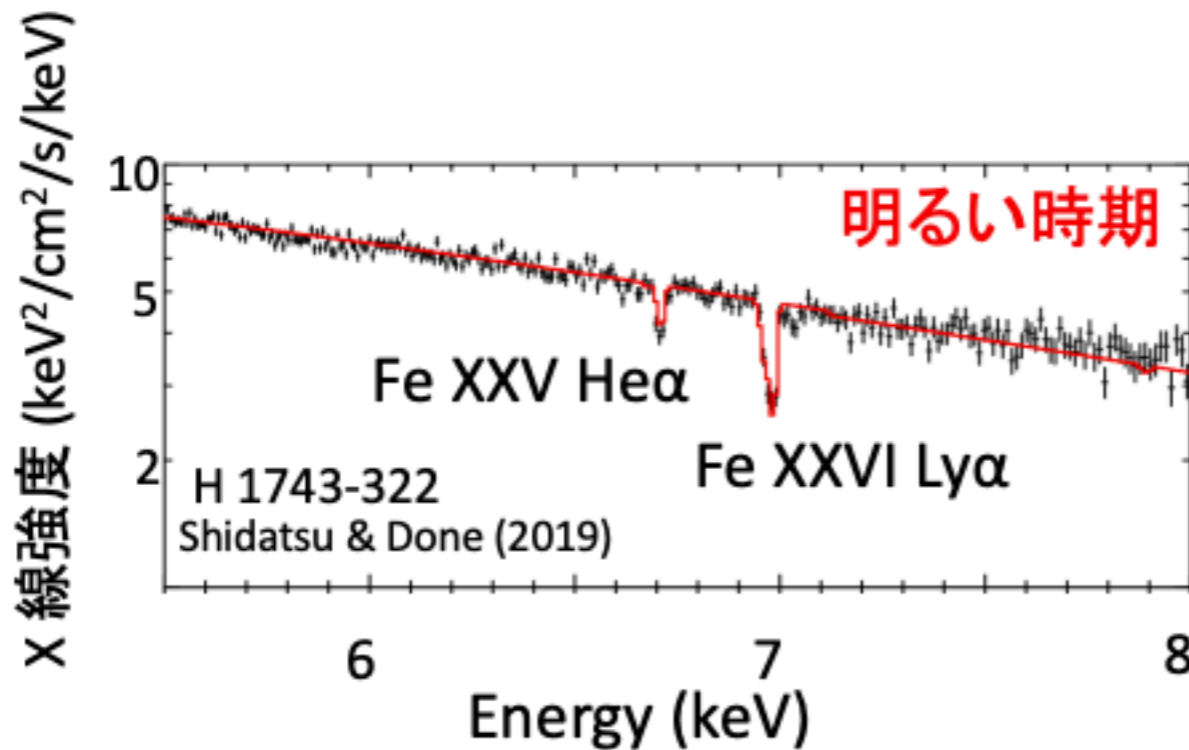


high mass X-ray binary (HMXB)

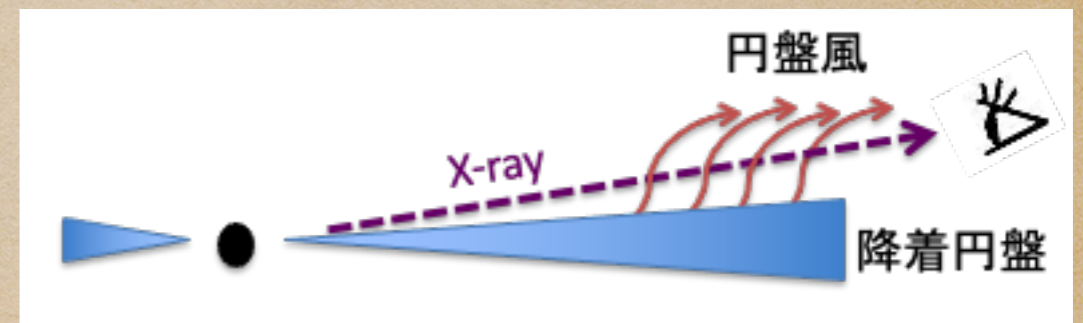
- 伴星: 大質量星
(O or B 型星)
- 主に星風降着



1. 円盤風



- 青方偏移した高電離の**吸収線** (主に鉄)として観測
(e.g., Ueda+ 1998, Yamaoka+ 2000, Kotani+ 2000, Miller+ 2006 & 2008 etc.)
- 視線速度: $10^2 \sim 10^3$ km/s
- 円盤を真横から見ている天体 (傾斜角 $> \sim 70$ deg) のみに見られる



円盤風の噴出機構

(1) 熱駆動 (ガス圧)

降着円盤の表層への強い X 線照射
 -> コンプトン散乱によりガスが加熱される
 (Begelman+ 1983 etc.)



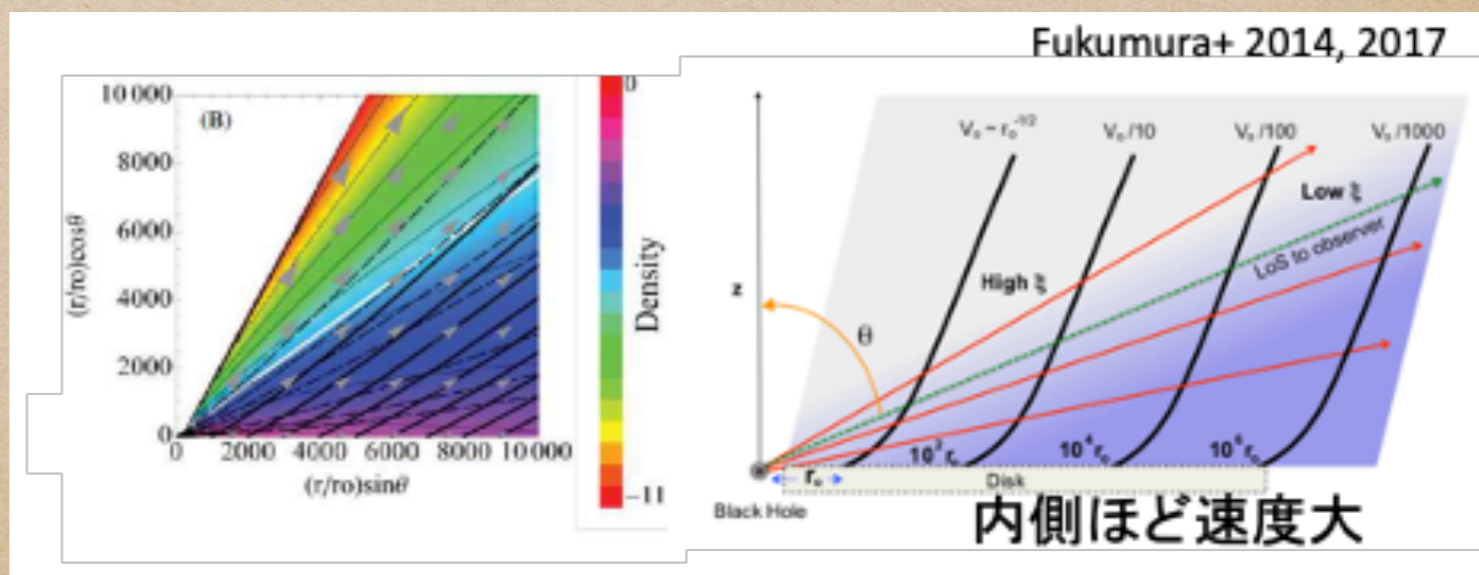
$$kT \geq \frac{GMm_p}{R}$$

円盤の外縁部 ($R > \sim 10^4 R_s$)
 から噴き出す
 速度: ~数百 km/s. (**観測と合致!**)

(R_s : Schwarzschild 半径)

(2) 磁場駆動

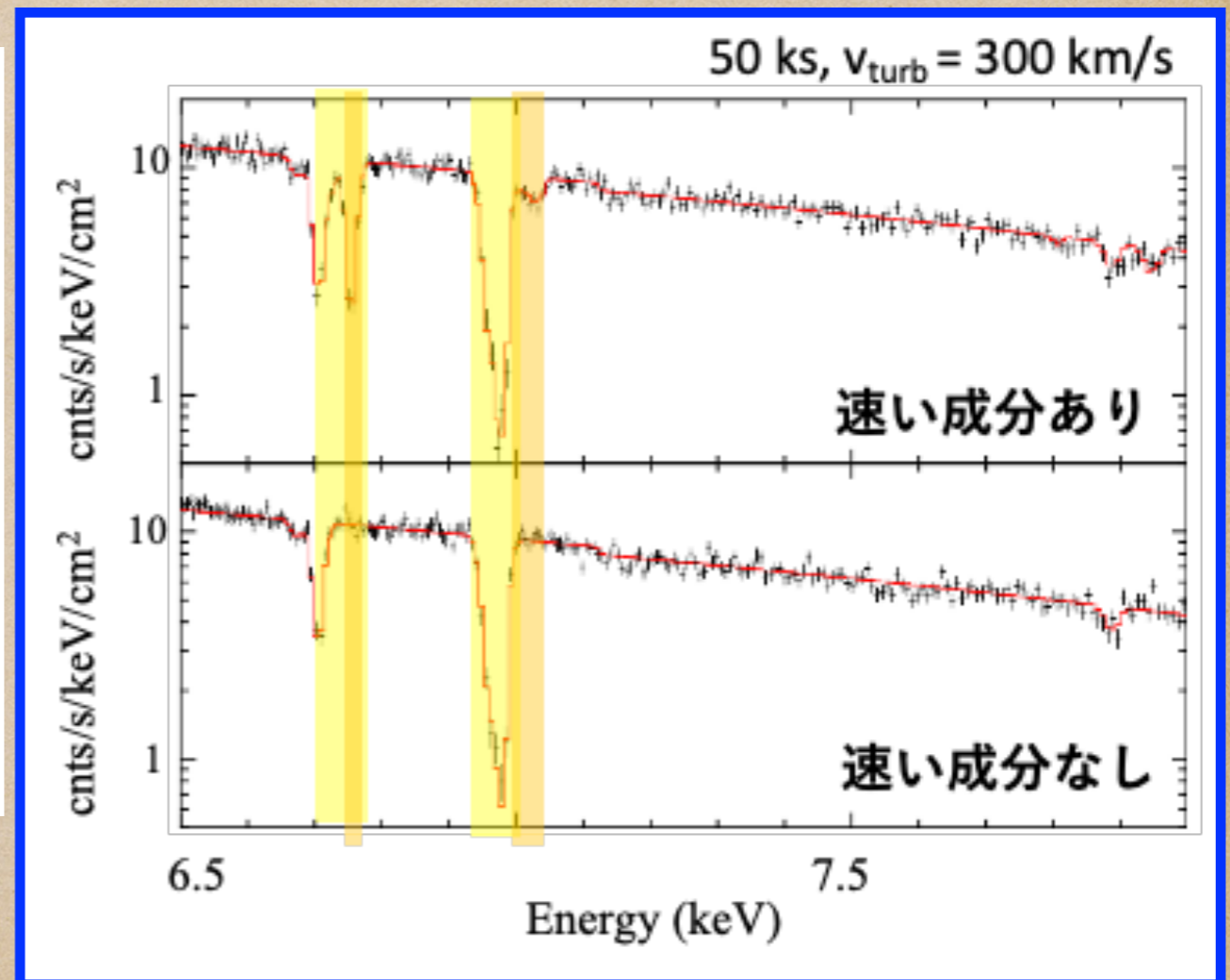
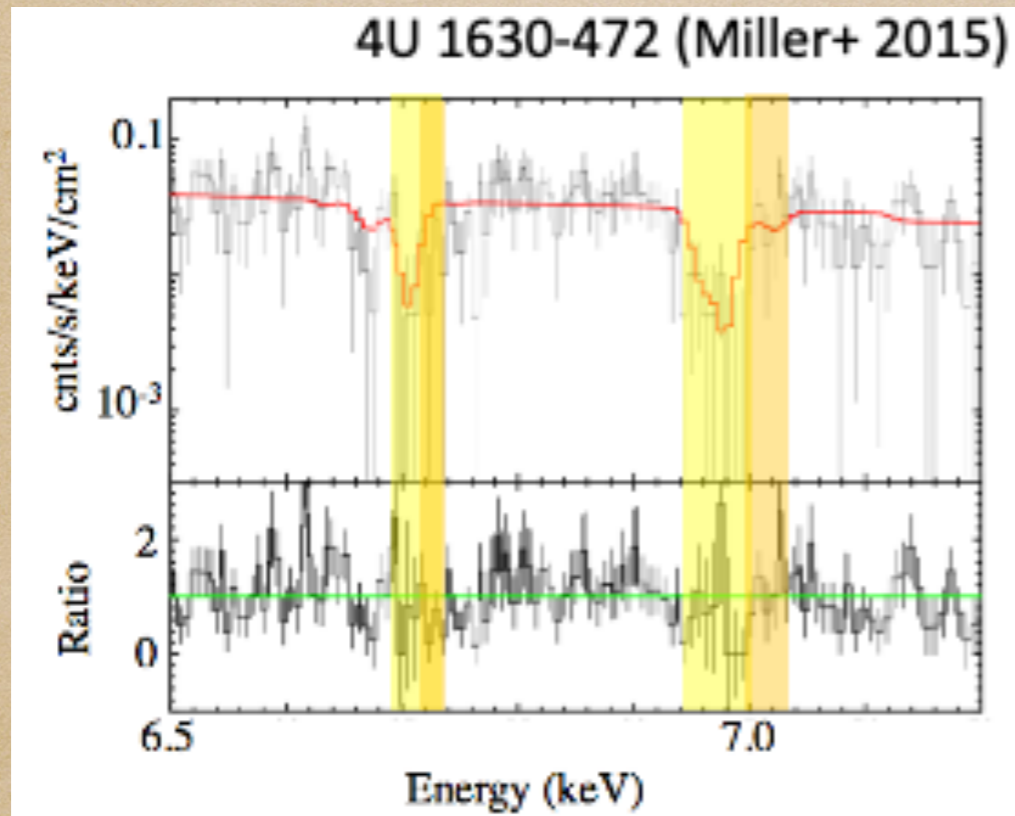
円盤磁場によりガスを加速
 円盤の内側からも噴き出す (磁場構造による)



XRISMで期待される成果

Chandra/HETG (3次の回折光) によって、 $v > 0.01c$ の成分の存在が示唆
-> 磁気駆動型の証拠か？

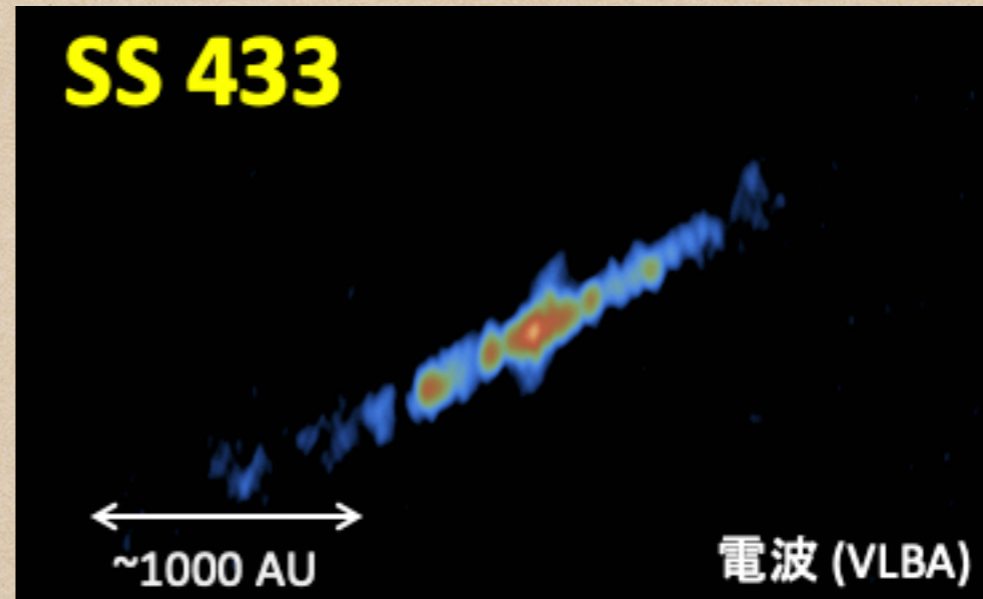
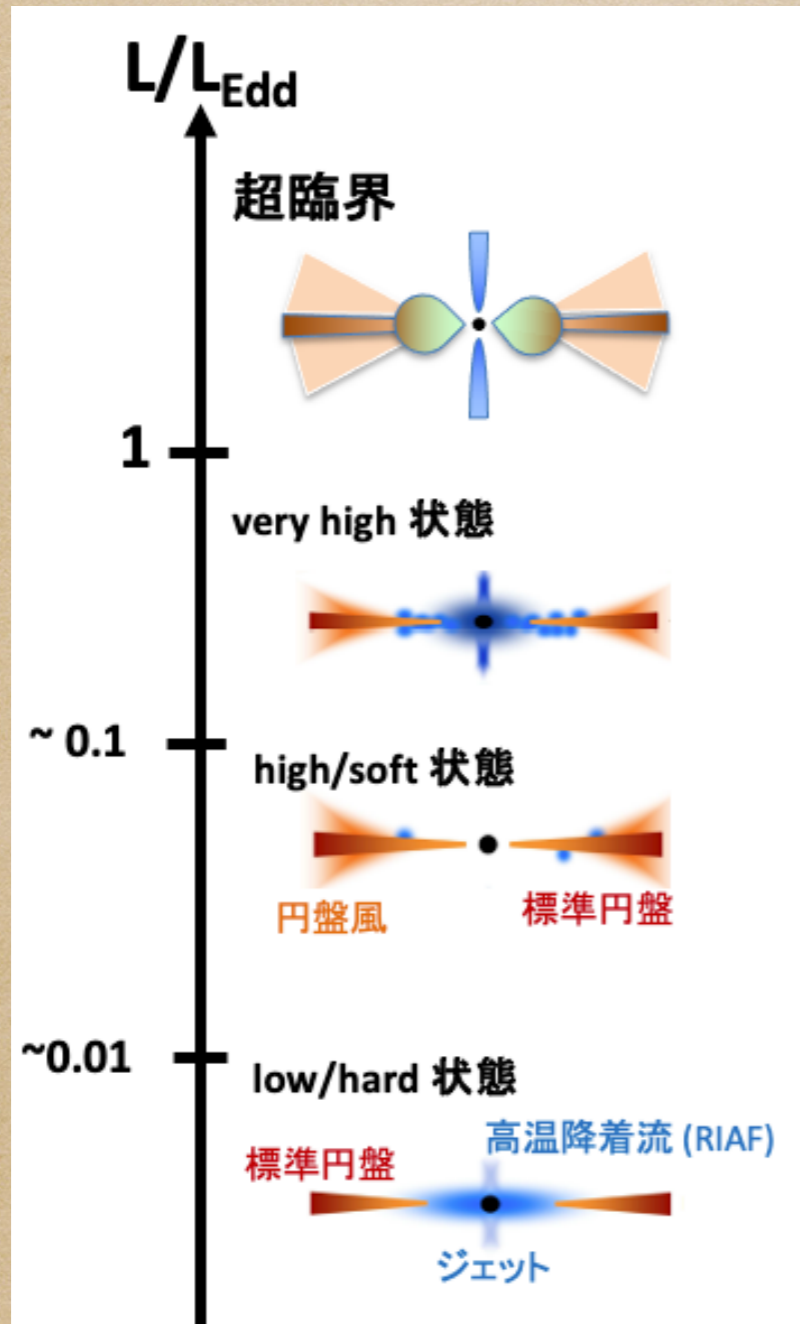
XRISM/Resolve, 50ks



シミュレーション

2. ジェット

降着円盤の状態遷移に伴ってジェットと円盤風が噴出or停止



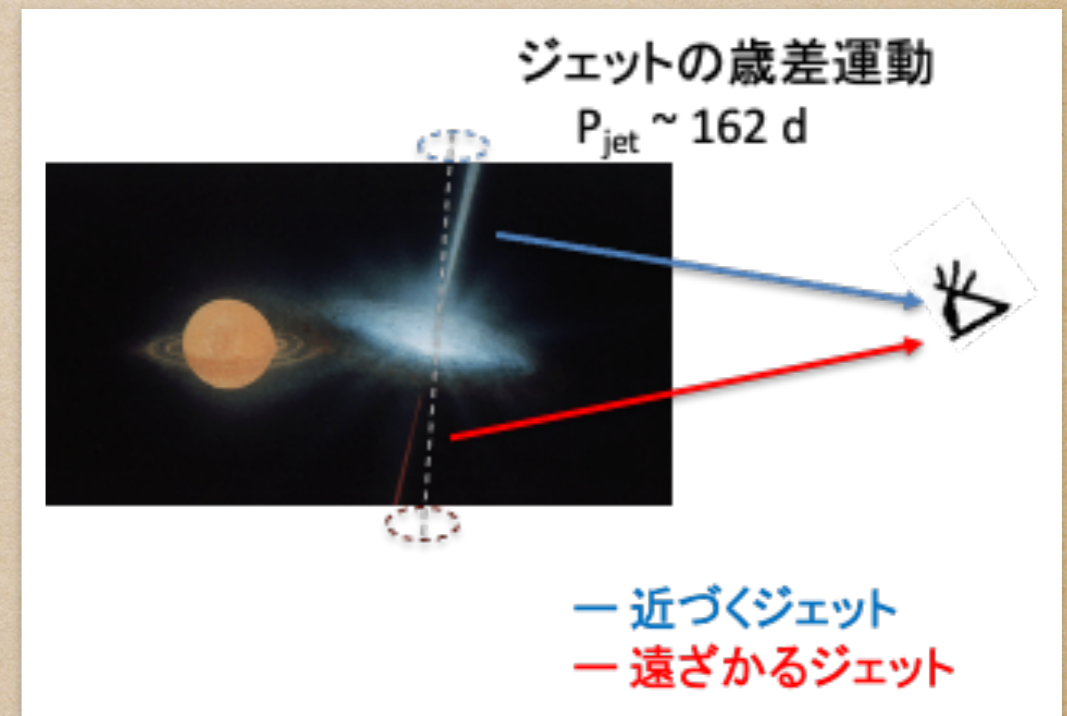
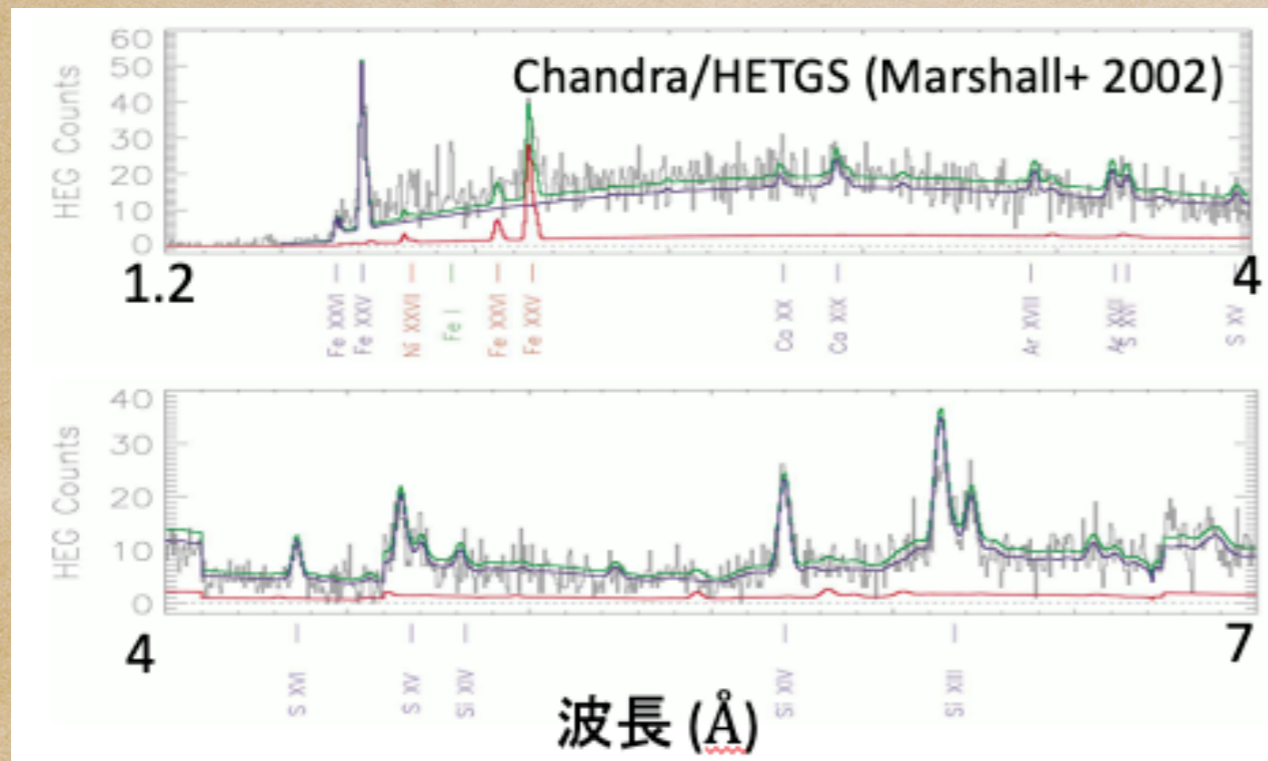
- 定常的にジェットが出ている
- 主にUVと可視光で明るく、X線で暗い
- 中心天体の正体は不明 $M=1.9-4.9M_{\text{solar}}$
- 伴星はA型超巨星
- 軌道傾斜角 $i=78.8^\circ$
- 降着円盤はほぼ見えず、ジェットの根元付近からの放射が見える
- 食が起きるとジェットの下流部分しか見えなくなる

ジェットからのX線放射

$v=0.26c$ のジェットが定常的にみられる

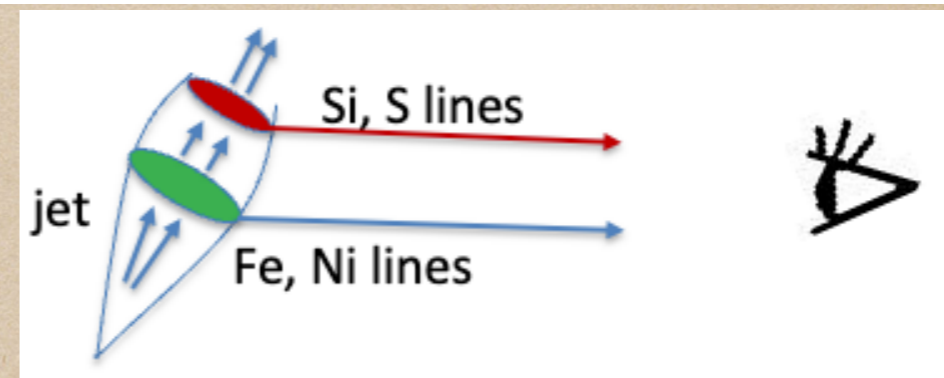
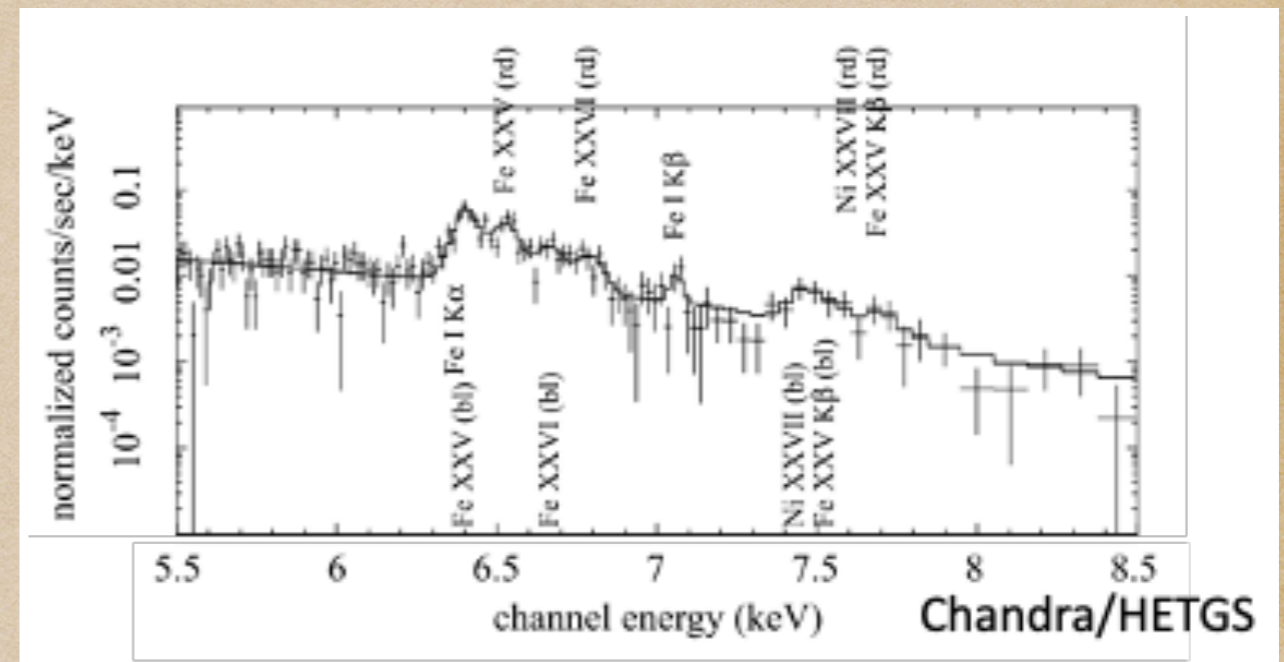
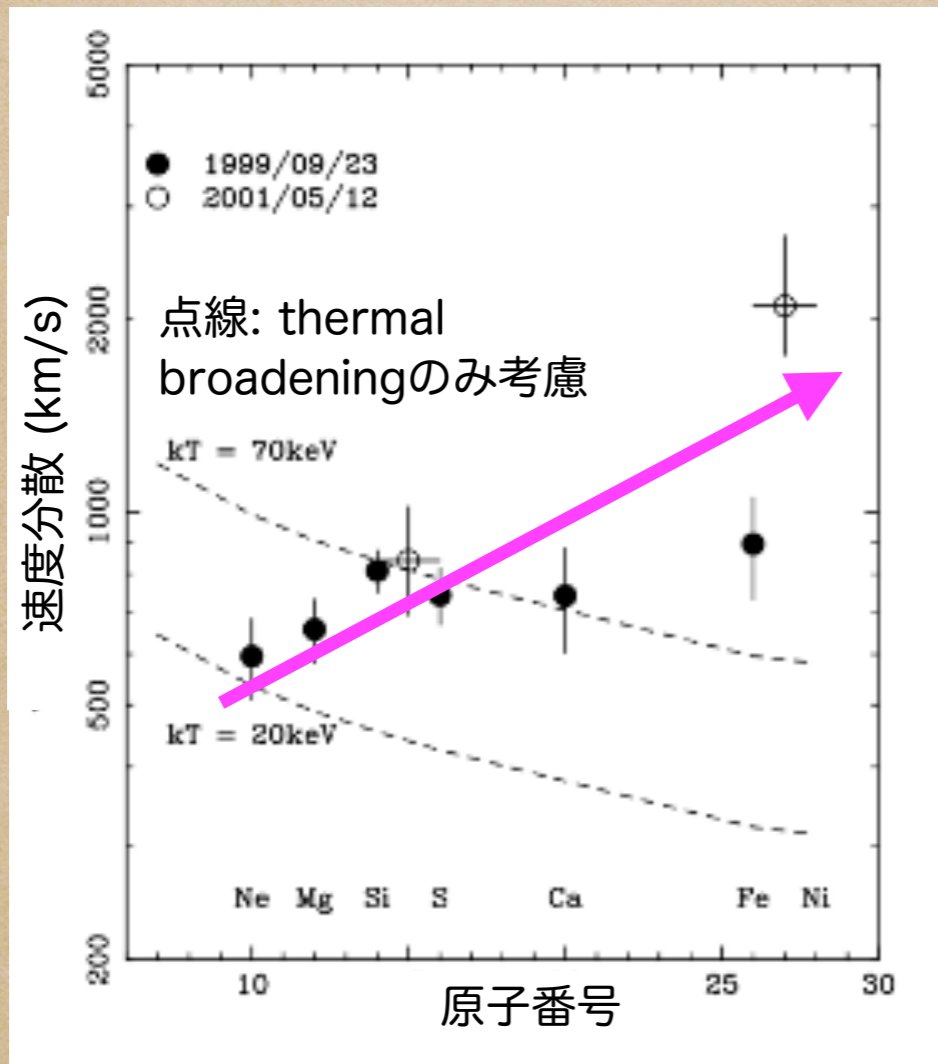
X線スペクトル=光学的に薄い熱的プラズマ

-> バリオンが噴出している (系内X線連星では他に例なし)



ジェットのкориメーション

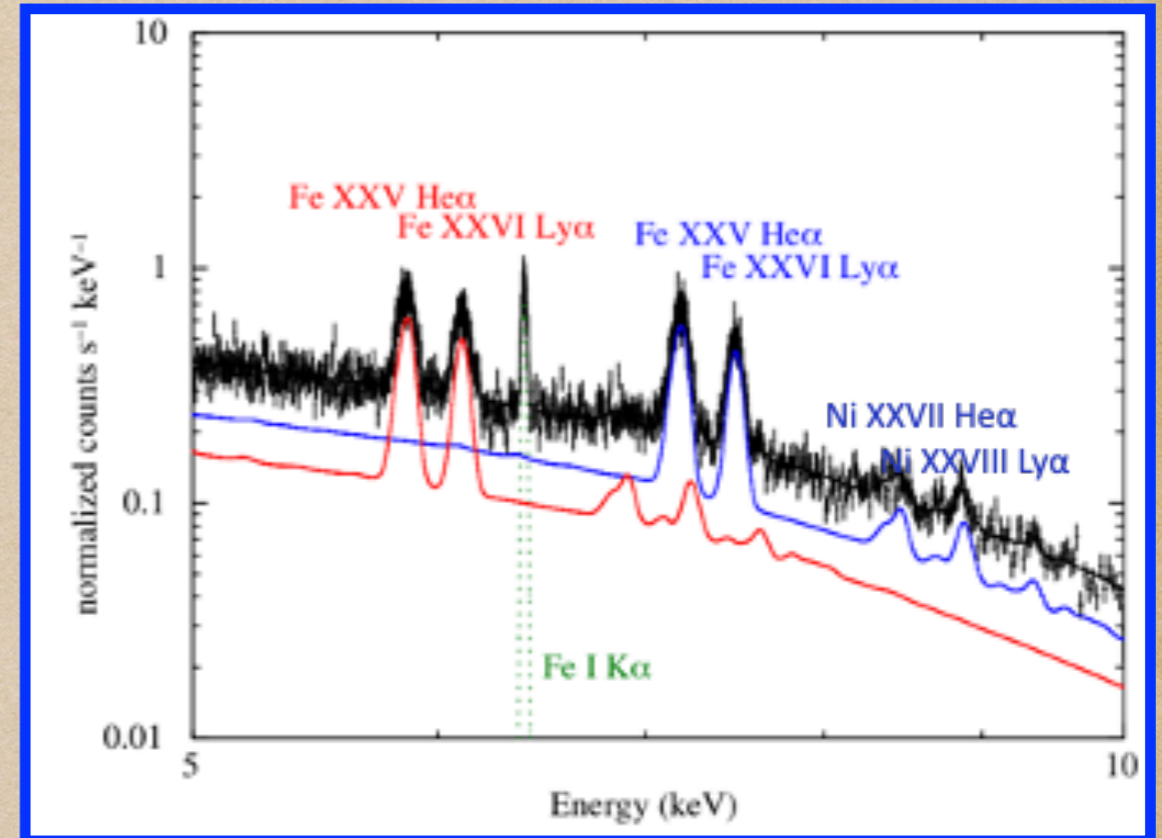
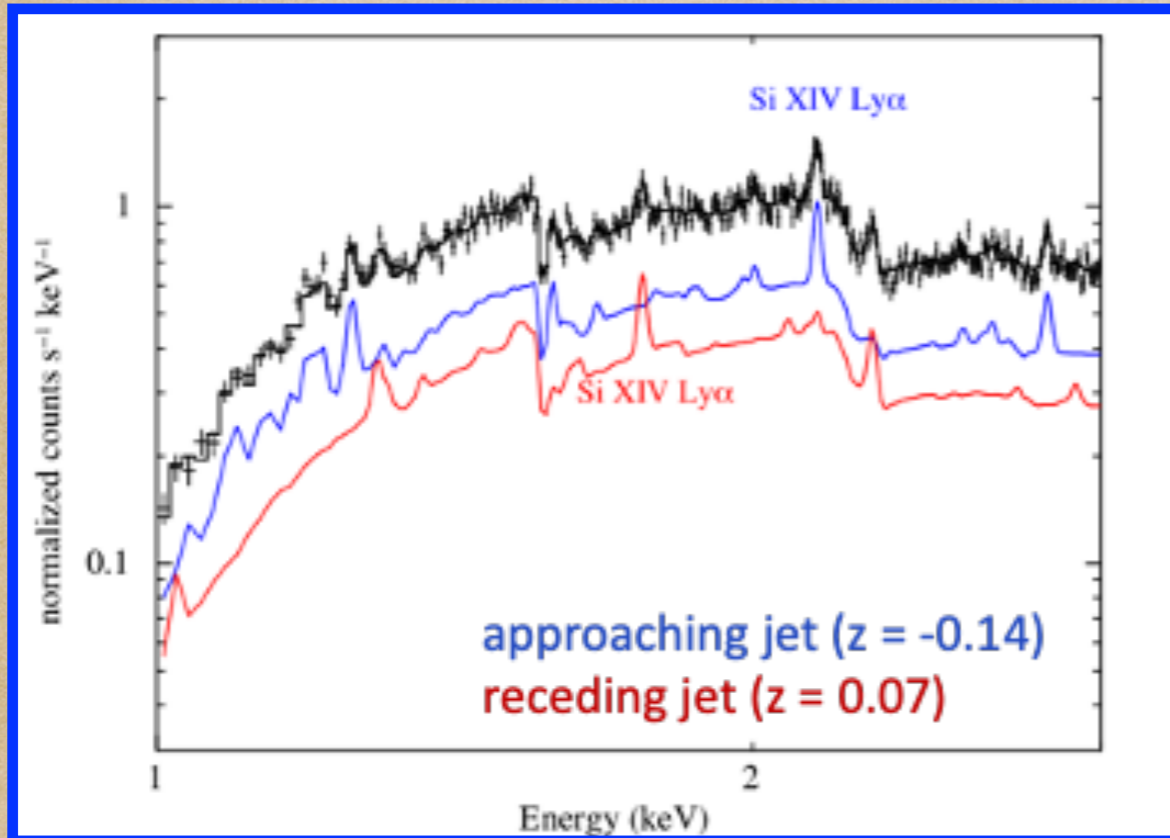
低エネルギーの輝線 (S, Si) よりも高エネルギーの輝線 (Fe, Ni) の方が幅が広い
 -> ジェットの開口角が狭くなっている? (Namiki+03)



He-like Fe K α @6.7keV の幅で主に決まっているが、複数の分解できていない輝線が混ざり合うことで速度分散を過大評価しているかも (Marshall+13)

XRISMで期待される成果

SS433, XRISM/Resolve 30ks (out of eclipse; ゲートバルブ開)



	Exposure (ks)	Velocity Dispersion (km/s)	
		Fe XXVI Lyα	Si XIV Lyα
Out of Eclipse	30	1680 ± 140	930 ± 230
In Eclipse	50	1200 ± 300	950 ± 160

注：ゲートバルブ閉でもサイエンス目的を達成できるように観測時間を調整する予定

Si XIV と Fe XXVI Lyαを用いて速度分散の違いを検出可能!

シミュレーション

目次

- 0. NGC 4151 (セイファート1.5型) のスペクトル
- 1. XRISM衛星の概要
 - a. Resolve検出器
 - b. Xtend検出器
- 2. 初期観測計画
 - a. Active Galactic Nuclei
 - b. Black Hole Binary
- 3. 公募観測の案内

公募観測案内

- 締切2024年4月4日 午後4時30分
- 1観測あたり10-300ks、1提案書あたり上限600ks
- 3/10までにゲートバルブがopenにならないければ、closedでの提案を募集する
- Scientific JustificationはA4で4ページ。修士以下の学生のみ日本語でも可。

- 観測時間の割り当て
 - Observatory Time (10%)
 - 衛星の保守、校正観測、DDT
 - PV観測のキャリーオーバー (15%)
 - 公募観測(75%)
 - JAXA割当 (48%)
 - JAXA/NASA/ESA以外から最大4%。
 - NAXA割当 (44%)
 - ESA割当 (8%)
- データの鍵なし公開はデータ配布後1年

JAXA公募への応募資格

1. 締切時に日本国内の大学研究機関に所属
 - ・ 複数の機関に所属する場合は日本国内が主であること
 - ・ 給与の50%以上が日本国内から
 - ・ 学生の場合は学位授与（予定）機関が国内
2. 締切時に日本、アメリカ、カナダ、ESA加盟国以外の大学研究機関に所属
 - ・ 条件1を満たすものをco-PIとすることで応募可能
 - ・ 公募観測の全時間の4%以下

審査過程

- 3機関でそれぞれ審査
- JAXAにおいては、1観測提案を複数のX線観測研究者、関連する他波長、理論研究者などにより審査
- 3機関での合議
 - Priority A (50%), Priority B (40%), Priority C (50%)
 - 時期指定観測およびToO観測はPriority Aのみ
 - Priority Cの観測は保証されない
 - 1観測提案のうち一部が採択されることもある
 - 期間中に観測されなかったToOはキャンセル
 - 同じ天体が複数の機関で採択された場合、PI全員が希望していればマージングされ国際共同観測になる
 - より優れた提案のPIをPrime PI
 - Prime PIの機関の観測時間に割り当て
 - PIが1人でも希望しない場合は、より優れた提案を採択

リンク集

観測提案に関する諸情報

<https://xrism.isas.jaxa.jp/research/proposer/index.html>

第一期観測提案に関するアナウンス

<https://xrism.isas.jaxa.jp/research/proposer/announcement/index.html>

JAXAデジタルアーカイブス (XRISM関連)

https://jda.jaxa.jp/search.php?lang=j&page=1&keyword=xrism&library=0&category1=&category2=&category3=&category4=&page_pics=20

まとめ

- XRISM衛星は順調に稼働中
 - NGC 4151の他にも、PV天体が続々と観測されている
 - Resolveのゲートバルブが閉まったままのため、低エネルギー側の感度が低下している
- AGN study
 - トーラスやBLRの位置決定
 - 重力赤方偏移を捉える
 - アウトフローの物理量の決定
- BHB study
 - 円盤、円盤風、ジェットを理解
- 第一回の観測公募は4/4締切。皆様からの応募をお待ちしております。