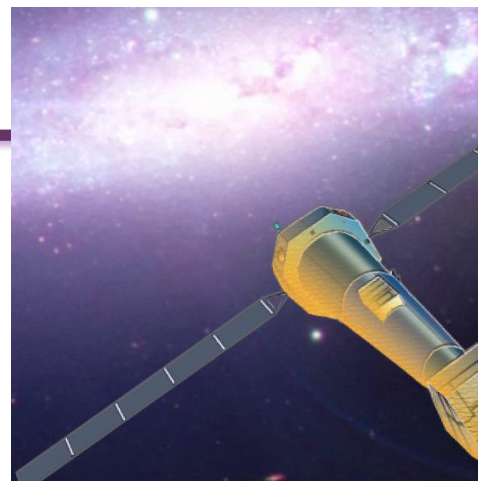
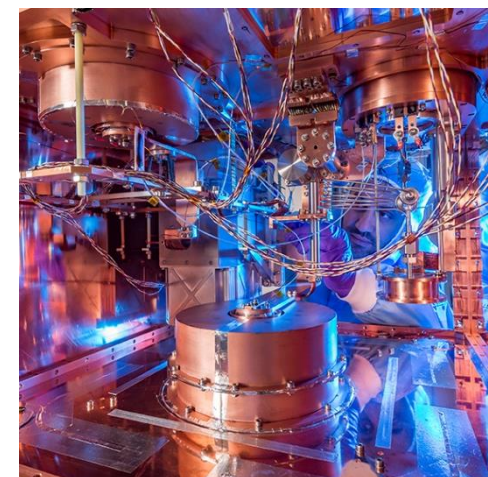


# ATHENA



## CC-CTP研究開発の状況 と X線天文衛星計画 Athena の現状



松本浩典 (大阪大学)  
山崎典子 (ISAS/JAXA)  
Athena WG

# サイエンス: Hot and Energetic Universe

## ■ Hot Universe

### ■ 大規模構造への物質集積過程の解明

- 最大の重力束縛構造である銀河団の主成分はX線ガス

## ■ Energetic Universe

### ■ 巨大BHの成長と周辺環境への影響の解明

- 物質を飲み込み成長しつつ、AGNとしてX線で輝く

**X線観測が必要 → ESAがAthena採択**

# Athena

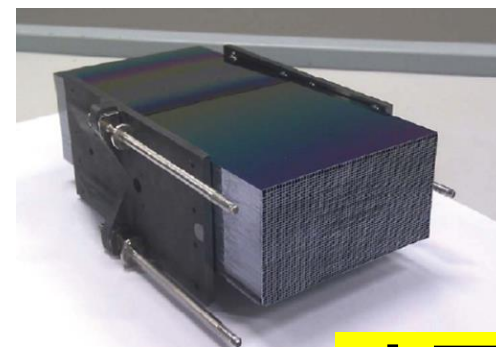
## SPO Mirror

2030年代初頭打ち上げ  $\sim 3\text{ m}$

L2 (or L1) orbit

M $\sim$ 7000 kg

Life $\sim$ 4 yrs



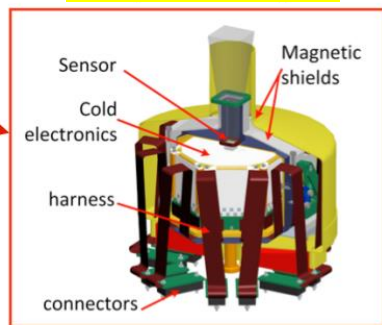
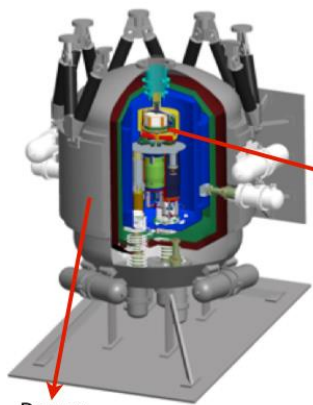
PSF $\sim$  5" **大面積**  
 $S \sim 1.4\text{m}^2 @ 1\text{keV}$

## X-IFU

TES calorimeter

$\Delta E \sim 2.5\text{eV}$

**高精度**



Dewar

ATHENA X-ray Integral Field Unit

Japan Aerospace Exploration Agency



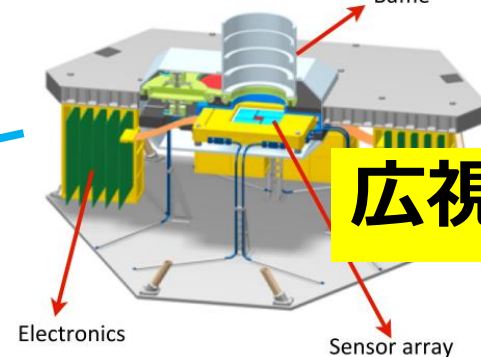
12m

## WFI

DEPFET

FOV $\sim$  40'

**広視野**



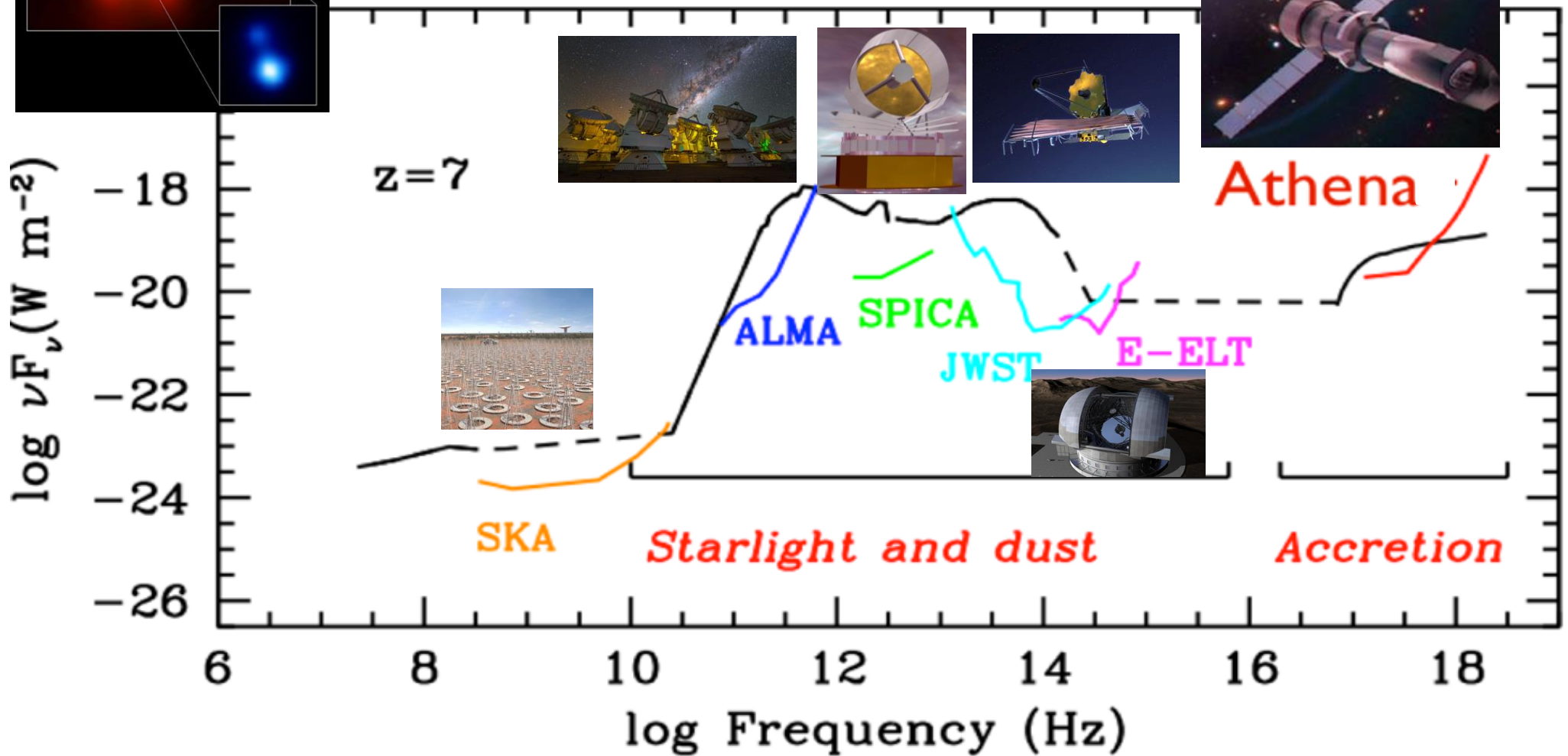
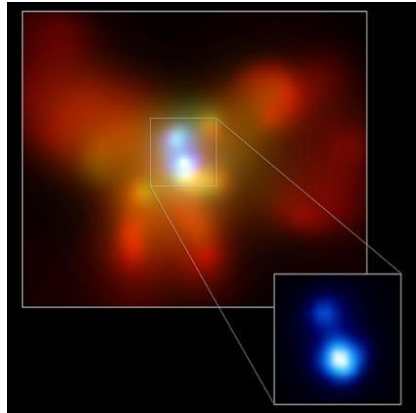
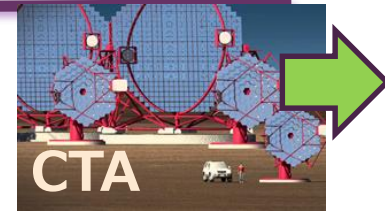
Electronics

Sensor array

2019/Jan/8-9. 宇宙科学シンポジウム

# 2030年代の大型天文台との連携

もし活動銀河核 (ULIRG) NGC6240 が、 $z=7$  に存在したら



# ASTRO-H, XRISM から Athena へ

## 圧倒的な性能向上

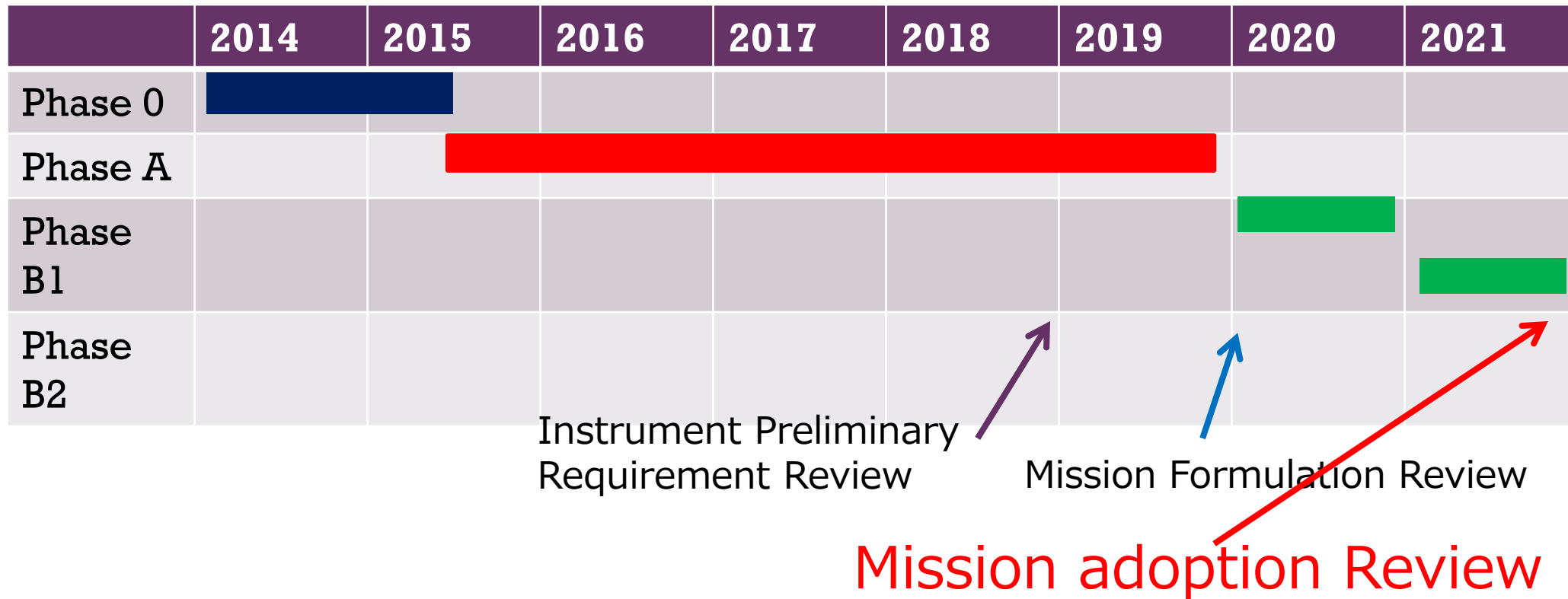
面積 30倍、角度分解能 16倍、視野×面積 100倍

	AH、XRISM	Athena
角度分解能 (望遠鏡)	80 秒角	5秒角
(カロリー)	36画素	3840画素
面積 @ 1keV	$0.06 \text{ m}^2$	$2 \text{ m}^2$
@ 6keV	$0.04 \text{ m}^2$	$0.2 \text{ m}^2$
エネルギー分解能(カロリー)	5 eV	2.5 eV
視野 (カロリー)	3分角四方	直径5分角
(半導体)	38分角四方	40分角四方

# 日本の Athena への参加

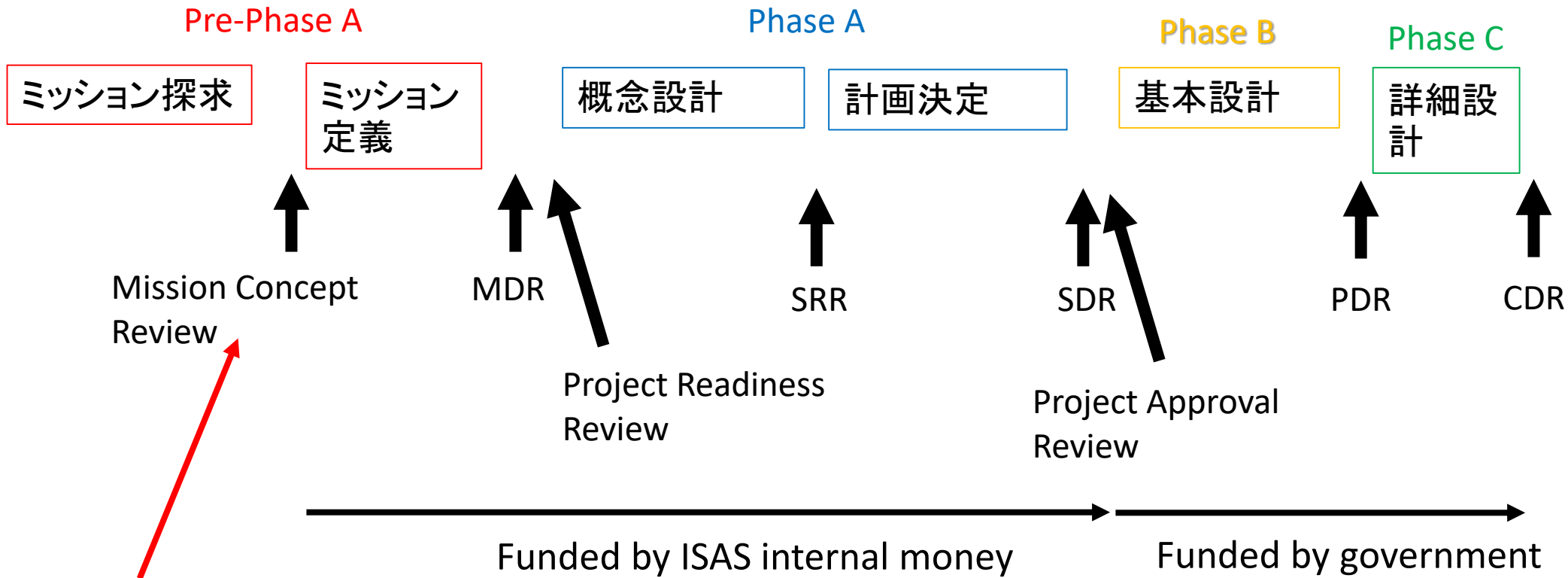
- ASTRO-H, XRISM の成果にもとづき、**Athena の科学成果創出**に関わり、科学的成功へと導く。
  - Science関係WGで、日本人研究者6人がチェア。
- Athena を確実に実行可能にするために、**ハードウェア開発**に協力する。
  - **メイン: X-IFU冷却系**
    - 4K/2K Joule Tomson 冷凍機は、日本供給以外に解がない。→ 日本の担当が決定
    - 詳細は山崎典子氏 「CC-CTP の現状説明」
  - その他
    - SPO mirror
      - Ir の反射率 (光学定数) をカロリメーターのエネルギー分解能に見合う精度で測定。1月17日からSPring-8 BL20B2 で実験予定。
      - SPO mirror 責任者 Marcos Bavdas氏 セミナー 1/21 11:00am@宇宙研

# Athenaスケジュール



- 2021終盤に、Mission adoption。ここで Athena 全容が決定。日本のハードウェア寄与も決定。
- 打ち上げは2030年初頭。

# Athena WG の状況



いまこの段階。

「小規模プロジェクト」から「戦略的海外共同計画」の候補へ  
冷凍機関係だけは、Cooling-Chain Core Technology Program で支援を受けている (with LiteBIRD, SPICA)



# 以降は山崎さんスライド

---

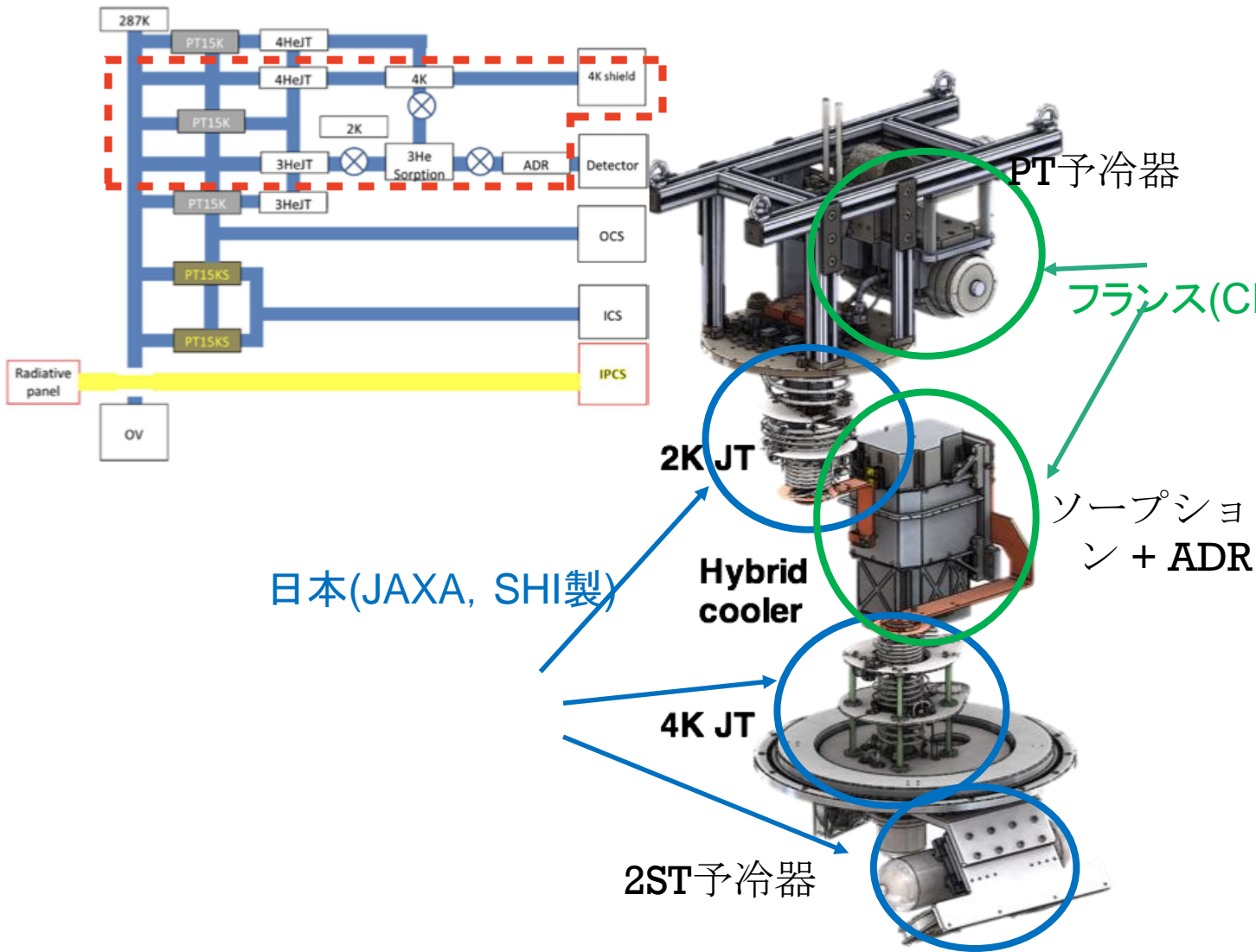
# Cryo-Chain Core Technology Program

- 2015年2月にAthena WGが、ESA Cosmic Vision 大型計画L3のAthenaへの日本の参加をISASの小規模プロジェクトに提案。
- 理学委員会は進めるべき計画としてISASに推薦したが、小規模プロジェクトとしては予算規模が大きいことから、ISASは実施については小規模プロジェクトの見直し後に再検討することとした。⇒戦略的国際共同候補
- ESAのMission Adoptionまでは時間がある一方で、CNESが主導するAthena X-IFU検出器の冷却システムの開発はESAのCore Technology Programの一つとして別出しされた。これには日本の協力が必須であること、同様にESAと協力するSPICA/LiteBIRDと技術的共通性が高いことから、ISASは冷凍機開発研究プロジェクトをAthena から切り離して進めることにした。
- 2015年8月にISAS所長からCNESにLOIを送り、CC-CTPの国際チームに正式参加。2015年12月が宇宙研所長決定チームとしてISASのCC-CTPチームを設定、研開第1/第2Uとも密接に協力して開発をすすめている。

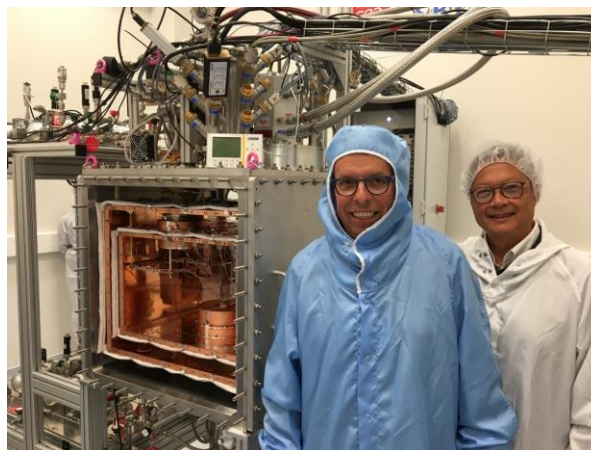
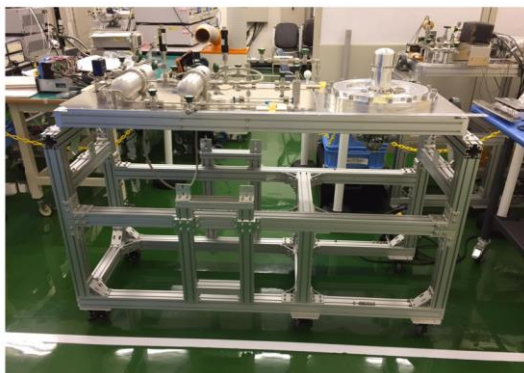
# CC-CTPの目的と経緯

- 宇宙空間で**無寒剤の冷却システム**で検出器を50mKまで冷却する技術をミッション横断的に確立する。
- 日本は4K ジュールトムソン(JT)冷凍機 (20K2段スターリングサイクル(2ST)予冷用冷凍機を含む)と、1K JT冷凍機を供給、フランスCEAが20Kパルスチューブ冷凍機、<sup>3</sup>Heソーブションと断熱消磁冷凍機(ADR)を組み合わせた50mK冷凍機を供給。
- 試験は2段階で実施。第1段階では、試験用DewarもフランスCEAが提供。
- 第一段階試験(Cryostat#1)では冷凍機を組み合わせ、疑似負荷により、50mK冷凍機システムの様々な負荷状態での動作条件を調べ、動作を実証する。2017年3月から2018年2月まで、フランスCEAで実施し、目的を達成。
- 第二段階試験(Cryostat#3)では、Athena X-IFU用BBM Dewar (スペインが提供) を用い、X線センサと極低温回路のBBM (フランス、オランダ、米国が提供) も搭載し動作を実証する。現在はDewarの設計中で、組み立て・試験は2020年から。
- 上記のフランスでの活動と並行して、国内では、ミッション横断の冷凍機の課題として、振動擾乱抑制(目標: アイソレータを必要としないレベルまで)、長寿命化をめざした研究開発を実施している。
- 研究全般で第2Uと協力。振動擾乱抑制は、研開第1Uがリード

# 第一段階実験(Cryostat#1)のセットアップ



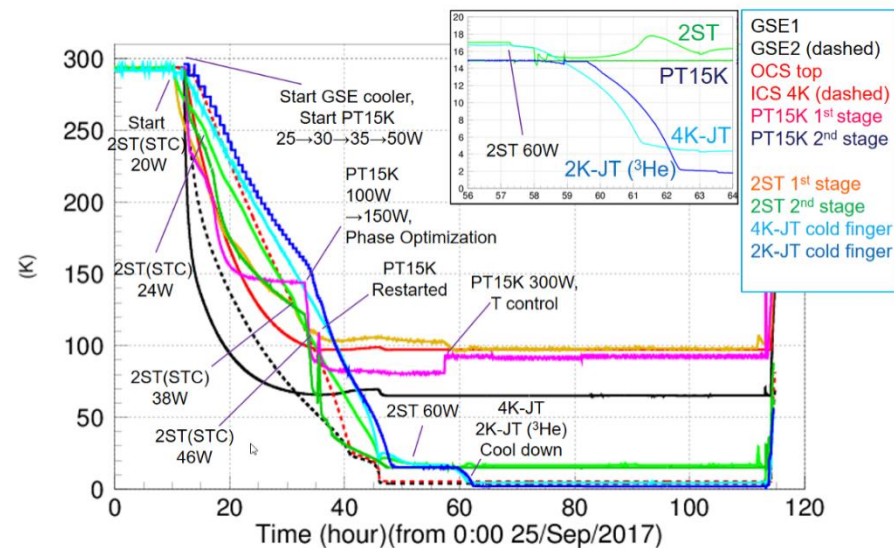
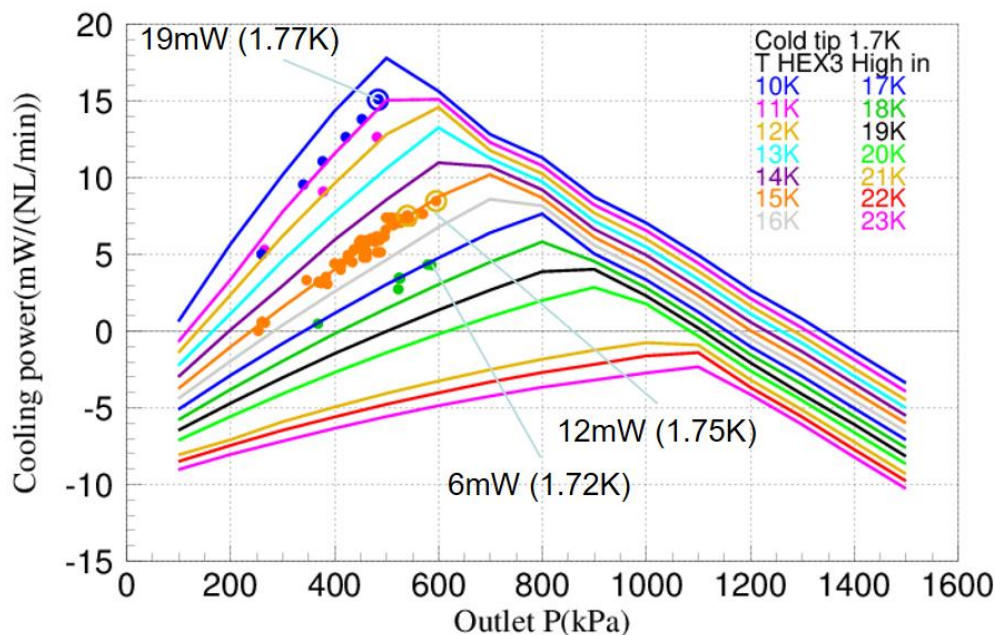
# フランス実験



試験は新居浜で22日,フランスで126日(休日除く)。SPICA招聘職員の東谷さん,プロジェクト研究員山本さん,研開2U篠崎さん,KEK研究員南さんなど,原則2人以上の体制で,のべ500人日の出張となった。

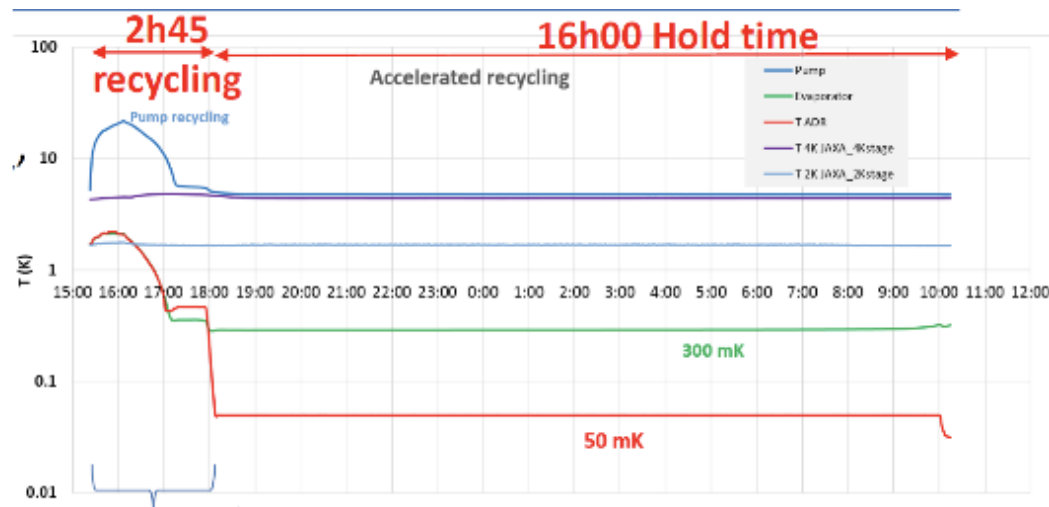
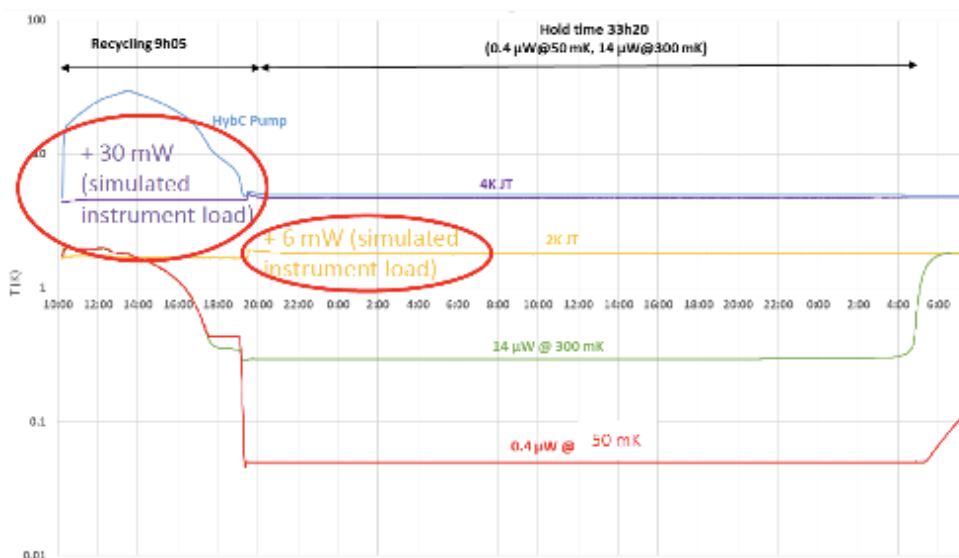
# 成果

- JT冷凍機をフランスのPTを予冷器として,冷凍能力実証  
3D CAD/mockupでのI/F調整  
予冷温度,圧力の関数としての冷凍能力を確認



- 無寒剤での室温から50mKへの冷却の達成
- Athena/SPICA/LiteBIRDを想定したリサイクルパターンに耐える  
変動する熱負荷でもJTがドライアウトせず,温度を保つ

# リサイクル動作の例



50mK冷却は、連続的ではなく、リサイクルが必要。  
そのパターン（長さ、熱負荷）をX-IFUだけでなく、SPICA/LiteBIRDも  
想定し、日仏の冷凍機の協調動作を確認した。

# JTの動作原理と開発ポイント

- JT効果：多孔質を通して気体を膨張させる等エンタルピー断熱過程

$$\Delta T \simeq \mu_{JT} \Delta P, \mu_{JT} \equiv (\partial P / \partial p)_H$$

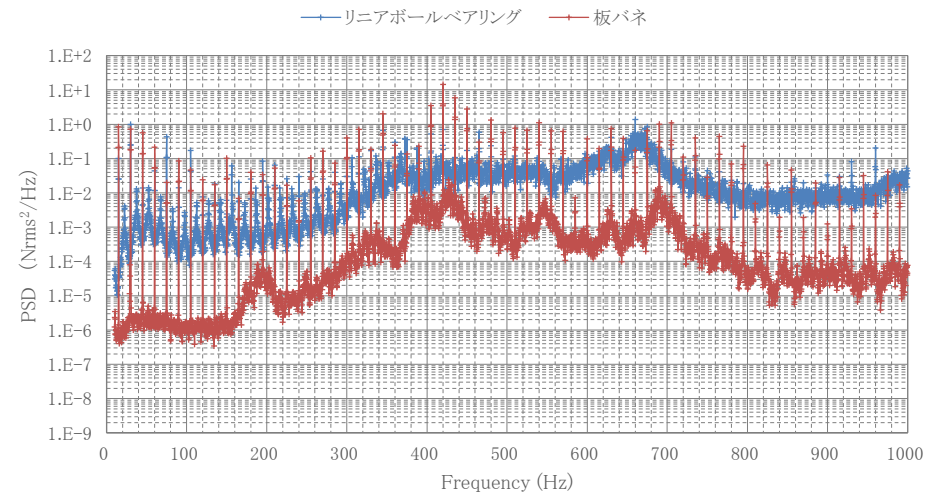
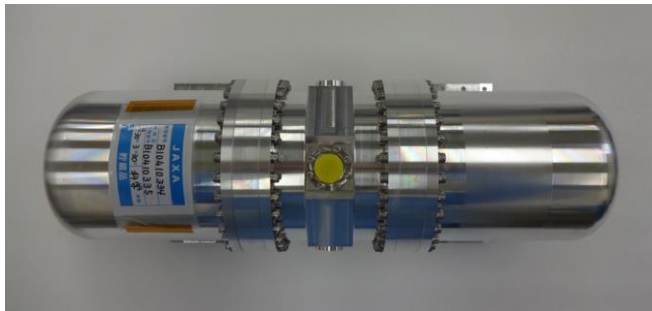
van der Waals力に対する仕事⇒理想気体ではおきない。

- JT冷凍機は、多孔質オリフィスに、予冷機で冷したガスを送り込む。JT効果で冷えたガスは液化し、低温ステージ温度は圧縮機の吸込み圧～飽和蒸気圧となる温度で決る。冷却能力は、オリフィスに入るガスのエンタルピー（圧力、温度の関数）と流量で決る
  - 4KJT: 動作ガス 4He, 吸込圧100kPa, 吐出圧2MPa(圧縮比20), 流量2NL/minを2段圧縮機で。吐出圧,流量をあげるか,予冷温度を下げると冷却能力は増える
  - 2KJT:動作ガス 3He,吸込圧7kPa, 吐出圧0.7MPa (圧縮比100),流量1NL/minを4段圧縮機で。吐出圧はほぼピーク,流量をあげるか予冷温度を下げると冷却能力は増える。
- EOLで、吐出圧を保つための電力が増加する（5年で40%程度）⇒これまでの開発は5年が目標、劣化原因はまだ明確ではない。圧縮機内で圧力差を保つシール部の劣化等を疑い、調査、対策を検討。  
Athena/X-IFUは10年寿命での設計をGoalとしている。

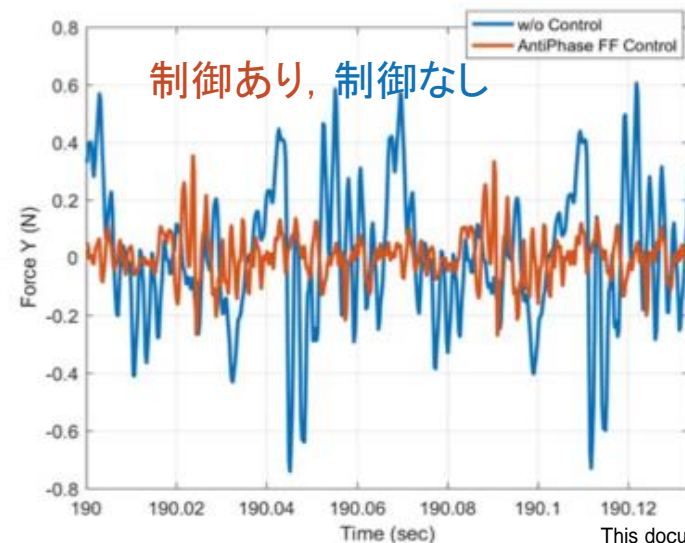
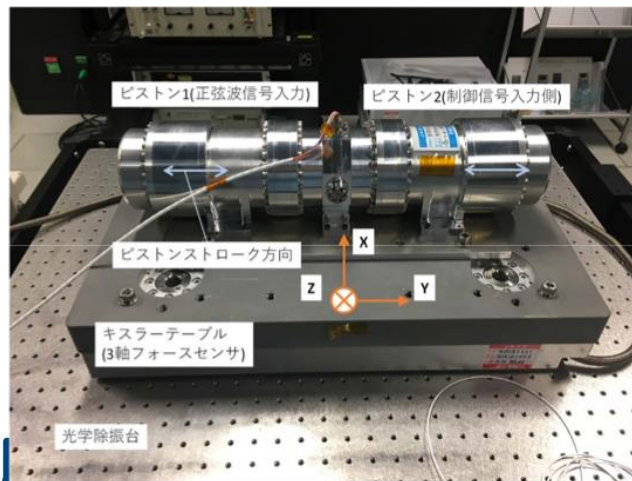


# 冷凍機の長寿命化と低擾乱化

- 2ST圧縮器のボールベアリングを板ばねへ  
JT圧縮機は板ばねを使用しているが、2STはストロークが長いいため、ボールベアリングのままだった⇒軸と垂直方向の剛性をあげた新設計



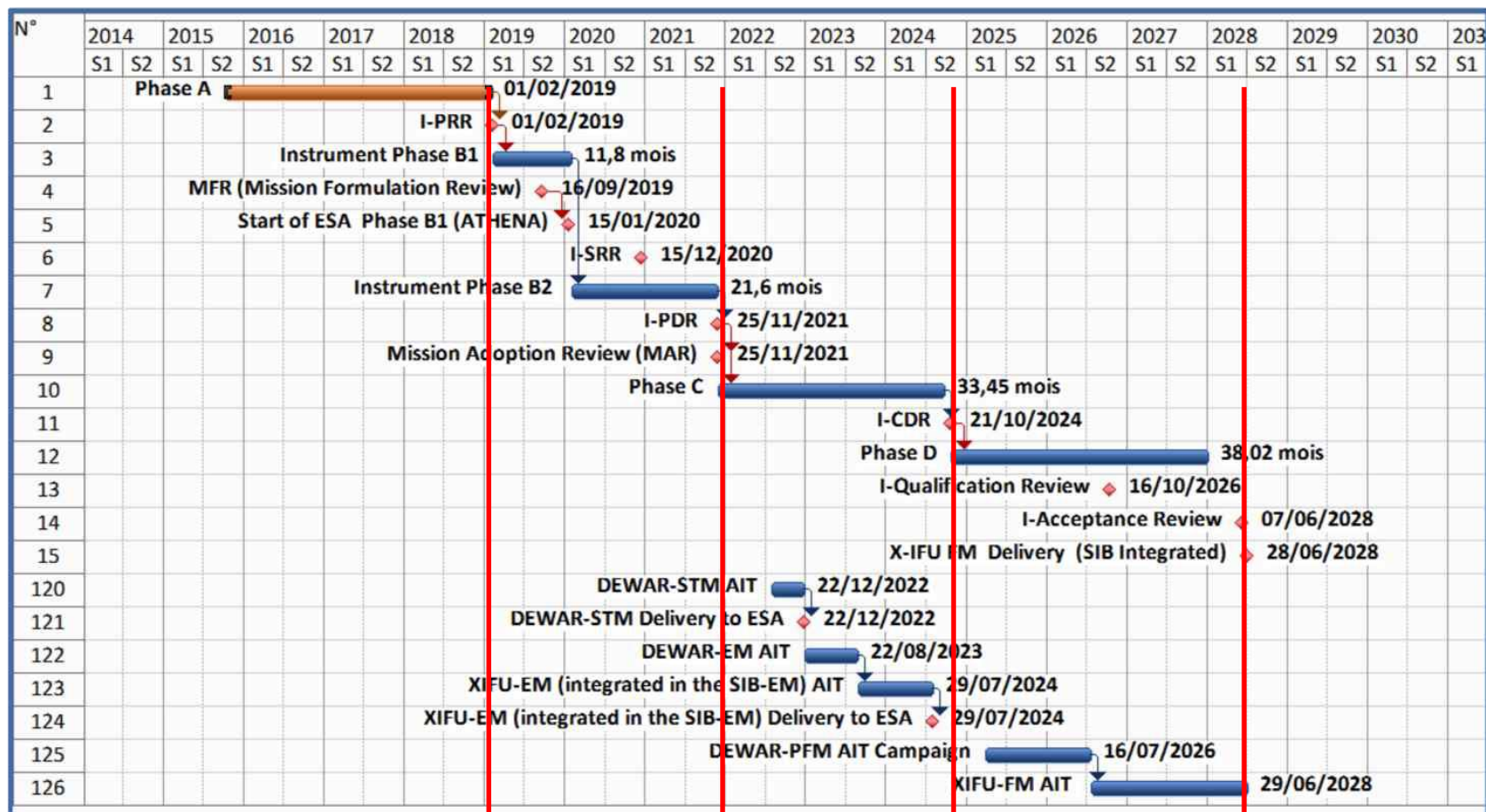
- 研開第1Uと協力し、2STからの擾乱（加速度）を低減する制御手法を開発



# Athena/X-IFU へ

- CC-CTP実験等を踏まえ,Athena/X-IFUの2KJTは日本の物がbaselineになった。
  - CC-CTP開始時は, ESA(RAL) がbaseline だったが,実験に供されなかった
  - 2018/6/29と9/24にSA/JAXA/CNESでKey Decision Meetingを行い,決定した。
- ESAは,Athenaのミッション機器を担当するグループを決めるためのInstrument Consortia Consolidationを実施,10/1締め切り
  - X-IFU proto-consortiumは応募,12/12に採用され,正式なConsortiumになった
  - **日本の役割**も提出文書内で定義された
  - ICCの要求の1つとして,ISASはESAにPhase Bまでの活動へのLetter of Supportを送った。
- 日本の役割
  - 2KJT x2, 4KJT x2, ドライバを供給する。
  - 軌道上寿命は4.25年だが,**10年を設計寿命とすること。**
  - センサ読み出し用SQUIDのbackup
  - Calibration teamへの貢献
  - Science Advisory teamへの貢献

# Athenaの今後の予定



現在進行中

PhaseB

PhaseC

PhaseD

iPRR

PDR

CDR

Delivery to  
ESA

Phase Bで冷却システムの基本設計と、長寿命化をすすめる。

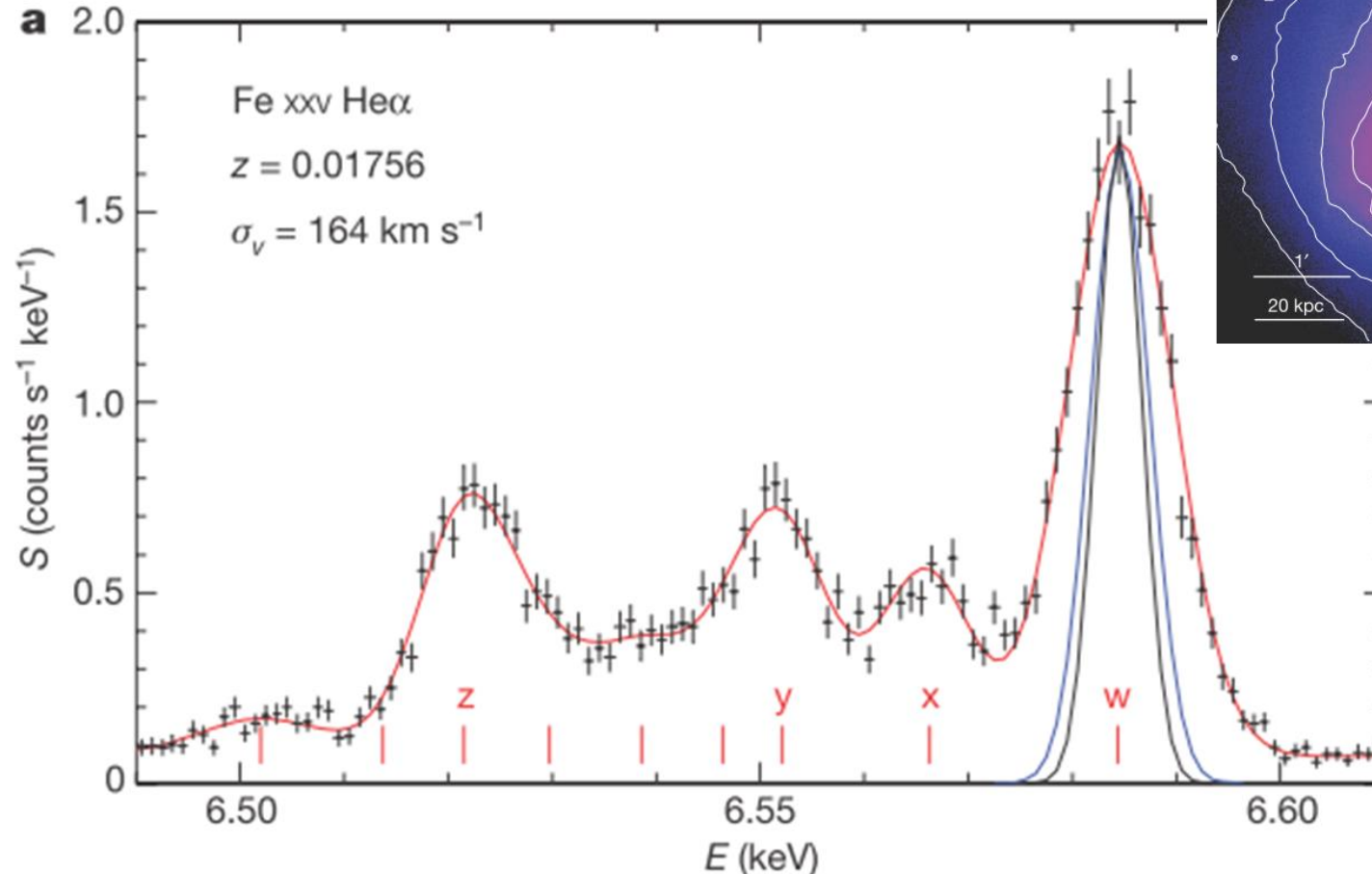


# 松本予備スライド

---

# ASTRO-Hの成果

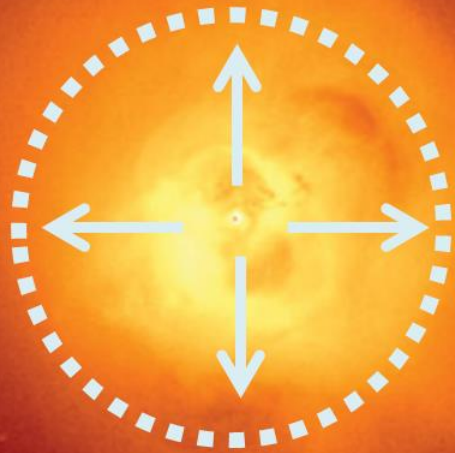
## ペルセウス座銀河団



# 高温ガスの乱流測定に成功

# ASTRO-Hが開いた謎

20万光年が20億年で冷却



・乱流が全て熱に散逸すると仮定すると(非自明な仮定だが)

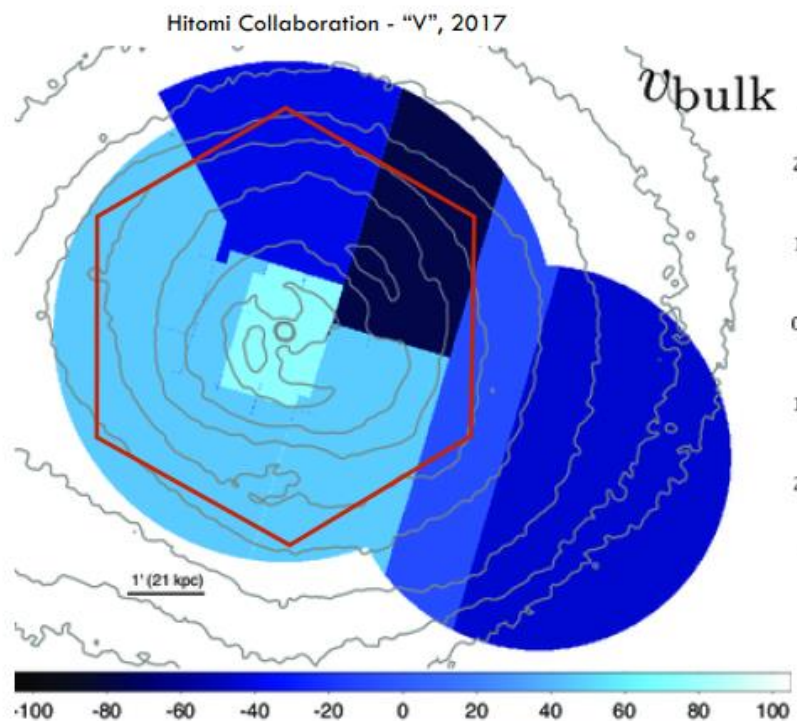
乱流エネルギー～熱エネルギーの4%  
→20億年×4%=8000万年毎にエネルギー注入  
→8000万年×160 km/s = 4万光年  
<< 20万光年

どうやって  
全体を温めているのか？

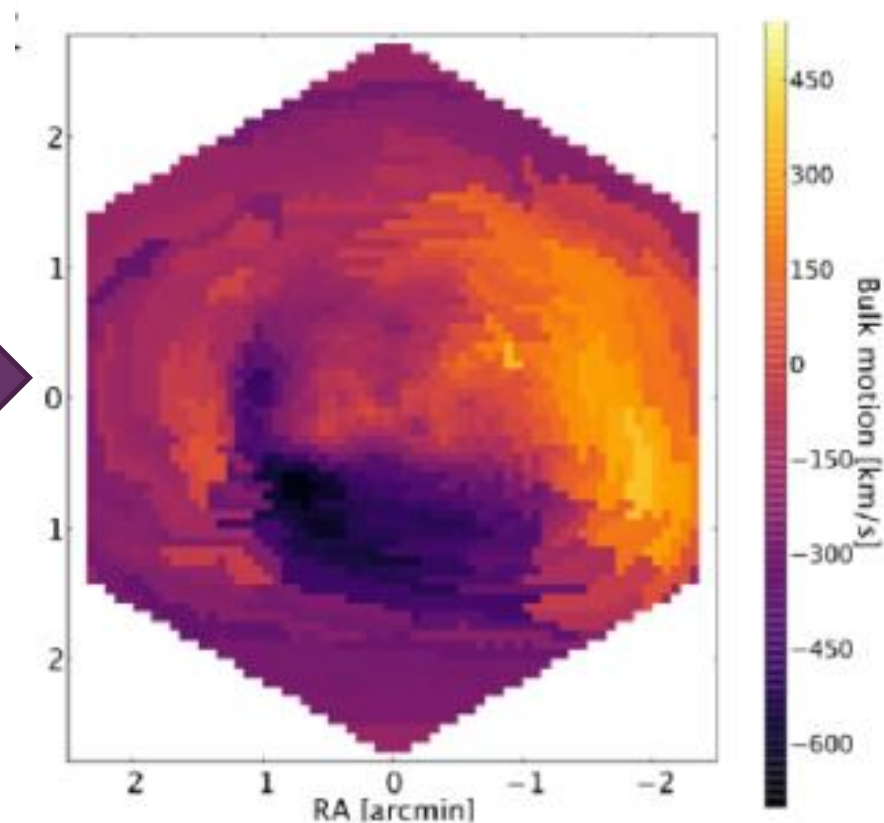
ガスのダイナミクスを空間分解観測

# ASTRO-H, XRISM → Athena

## ASTRO-H Perseus



## Athena simulation



PASJ 2018, Volume 70, Issue 2, 1 March 2018, 9

ひとみ、XRISM…近傍の明るい銀河団を粗く分解

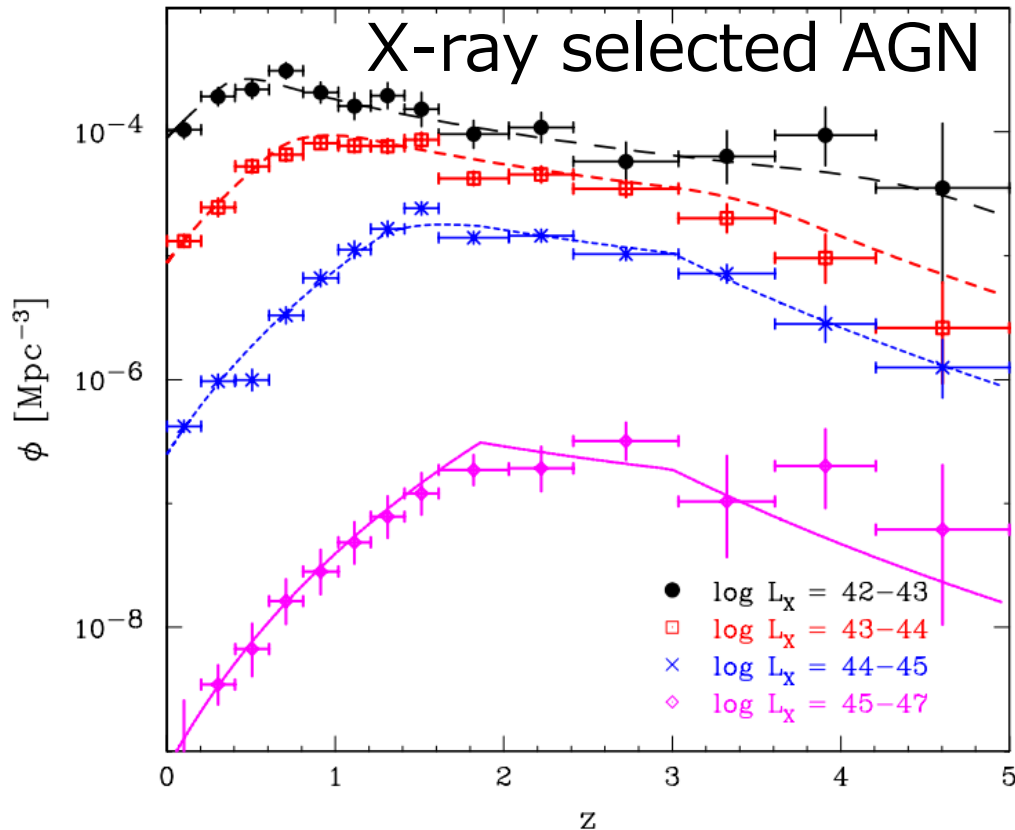
Athena … 暗く、遠い銀河団まで詳細空間分解



2019/Jan/8-9. 宇宙科学シンポジウム

# 巨大BHの成長

## AGN ダウンサイジング

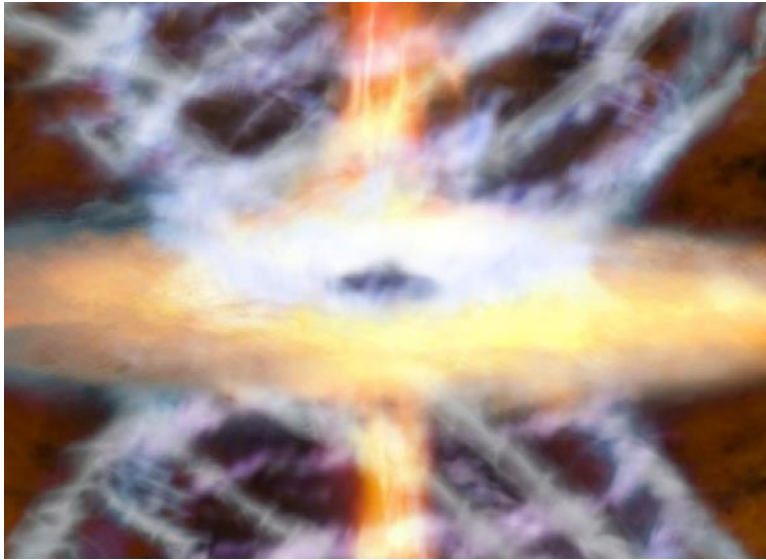


なぜ、巨大BHほど先に成長を止めたのか？

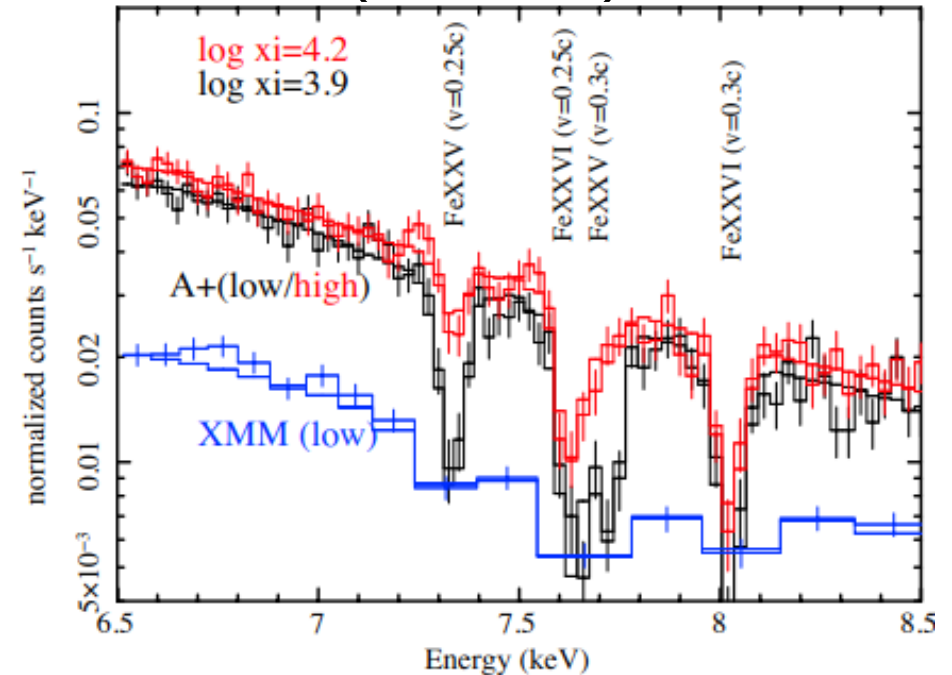
AGNからのフィードバックでガス供給が止まる？  
光度によってフィードバックのメカニズムが異なる？



# 巨大BHから周辺へのフィードバック



PDS456 ( $z = 0.184$ )

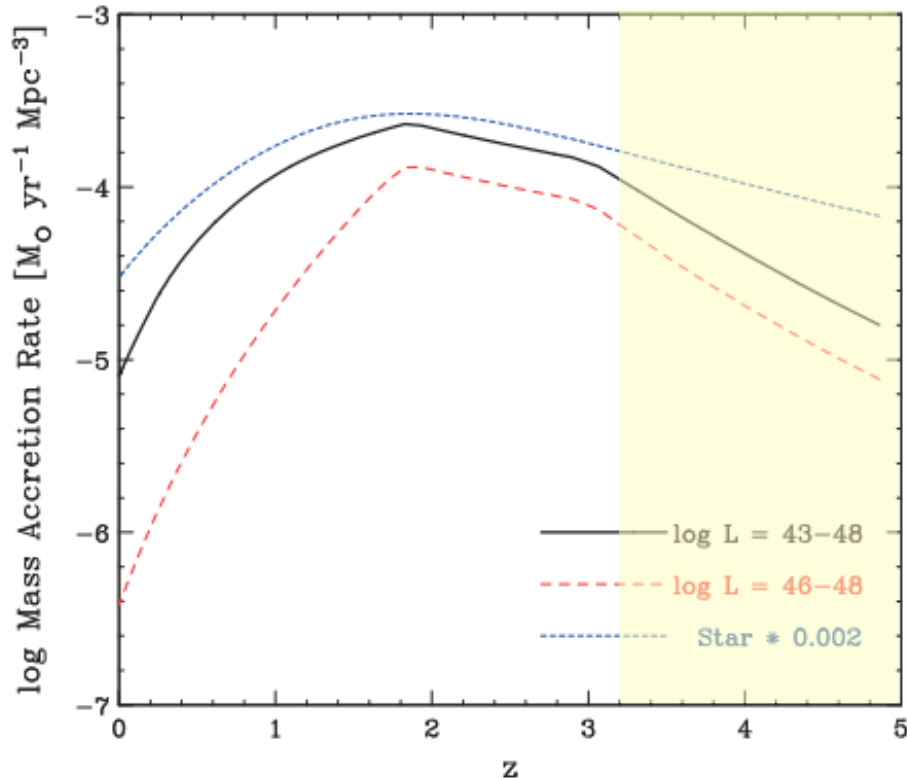


AGN風で周囲に影響？ Wind 速度、電離状態、密度  
→力学エネルギー測定

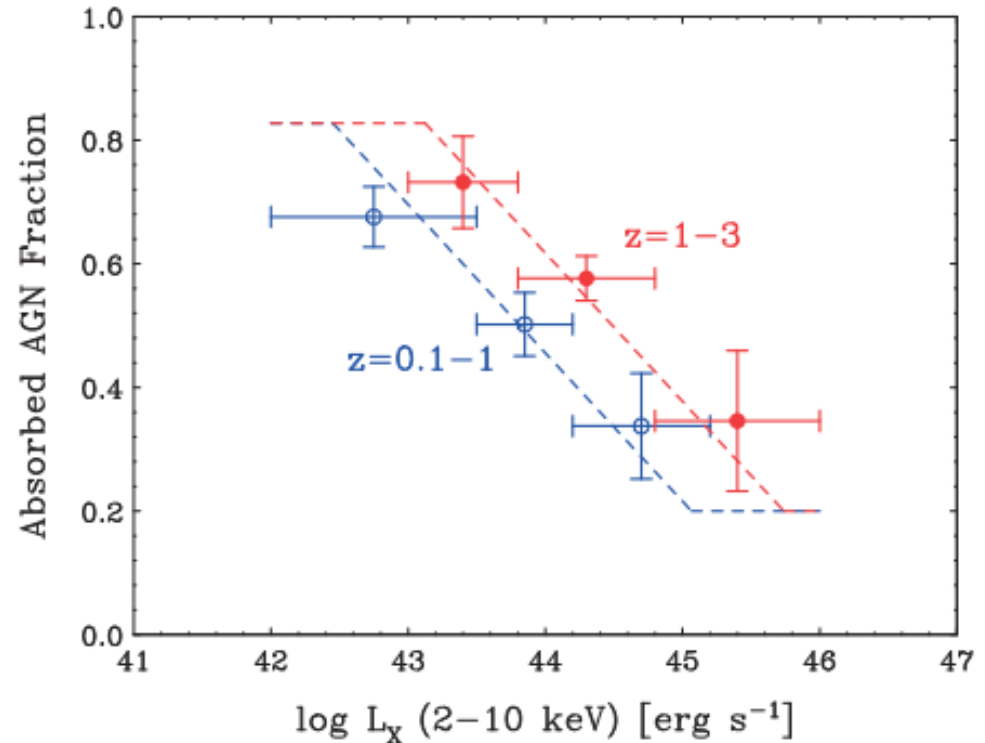
高赤方偏移までWindを観測し、そのエネルギーが、銀河の物質を飛ばすに足るのかどうかを決定する。

# 星形成と巨大BH

Ueda et al. 2015



Ueda et al. 2014



- $z > 3$ でBH成長と星形成率に違い?  $\rightarrow z > 3$ のAGNサンプルが完全でないのかも。
- Hi-zでは埋もれたAGN多 $\rightarrow$ 硬X線観測
- 赤方偏移で硬X線は軟X線にくる  $\rightarrow$  Athenaでサーベイ

# ASTRO-H, XRISM から Athena へ

---

## 圧倒的な性能向上

面積 30倍、角度分解能 16倍、視野×面積 100倍

