

大型X線天文台Athena

松本浩典（大阪大）

山崎典子, 山口弘悦, 前田良知, 海老沢研(ISAS/JAXA), 満田和久(NAOJ), 篠崎慶亮(JAXA), 太田直美(奈良女子大), 馬場彩(東京大), 上田佳宏(京都大), 寺島雄一, 栗木久光(愛媛大), 坪井陽子(中央大), 江副 祐一郎, 石川久美(都立大), 三石郁之(名古屋大), 深沢泰司(広島大), 鶴剛(京都大), 常深博(大阪大学), 佐藤浩介, 寺田幸功(埼玉大), 他 Athena 所内検討者一々

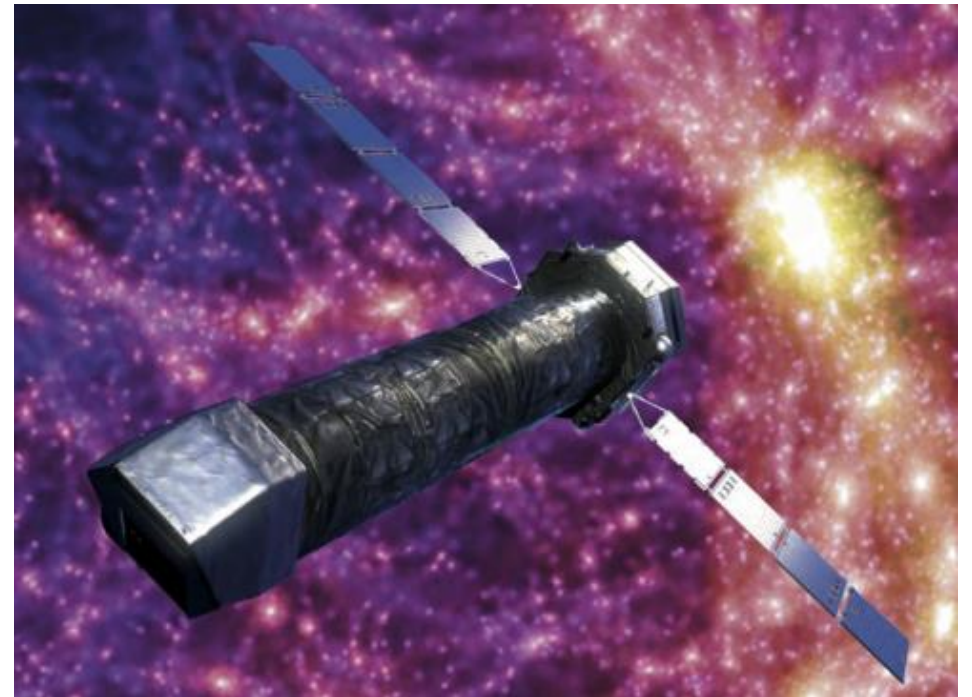
Athena とは

2

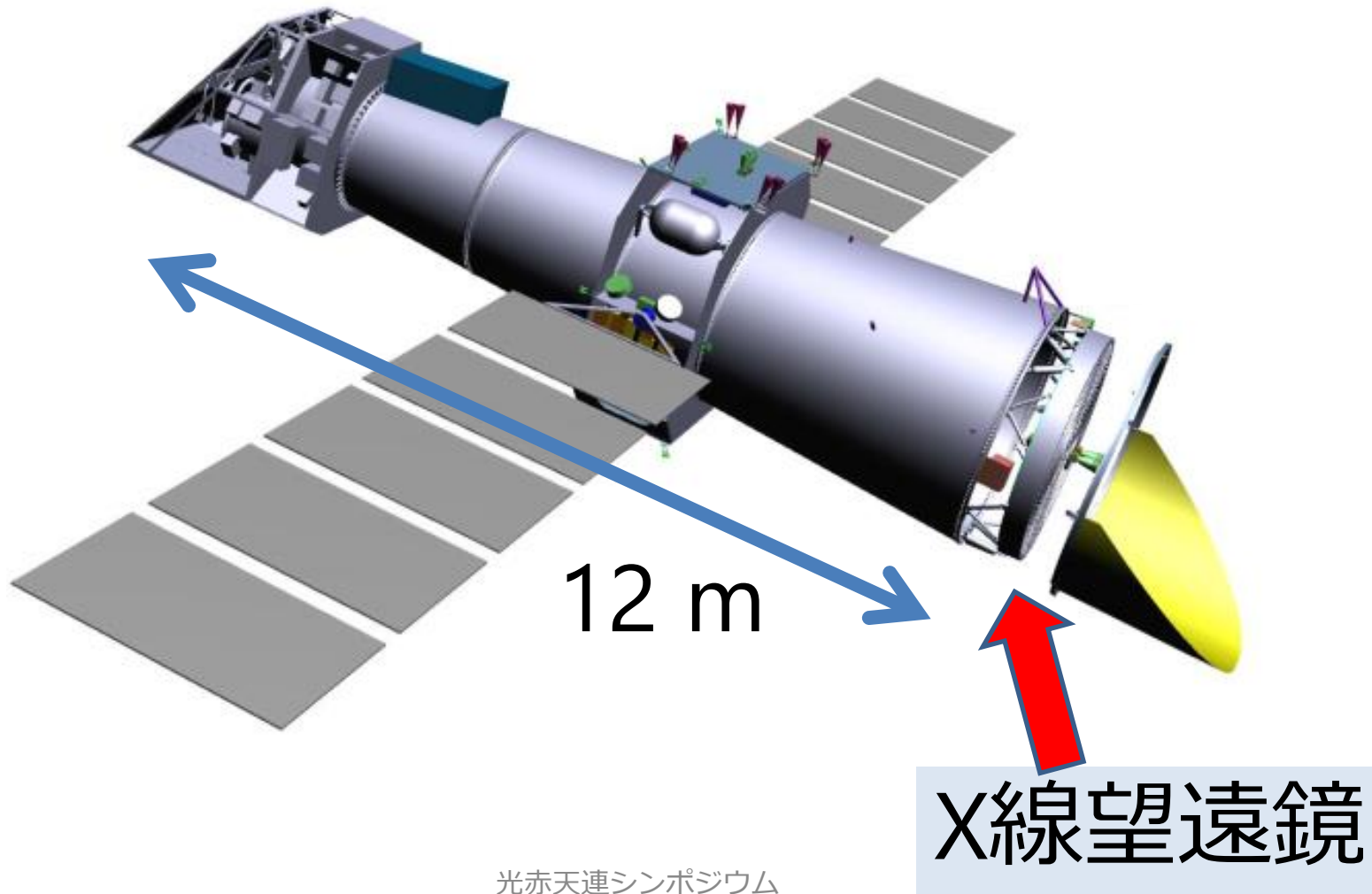
X線天文衛星: ESA 大型計画2号機に採択 (2014)

2030年代
初頭打上げ

開発
欧州主導+日米



Athena



X線望遠鏡

Silicon Pore Optics



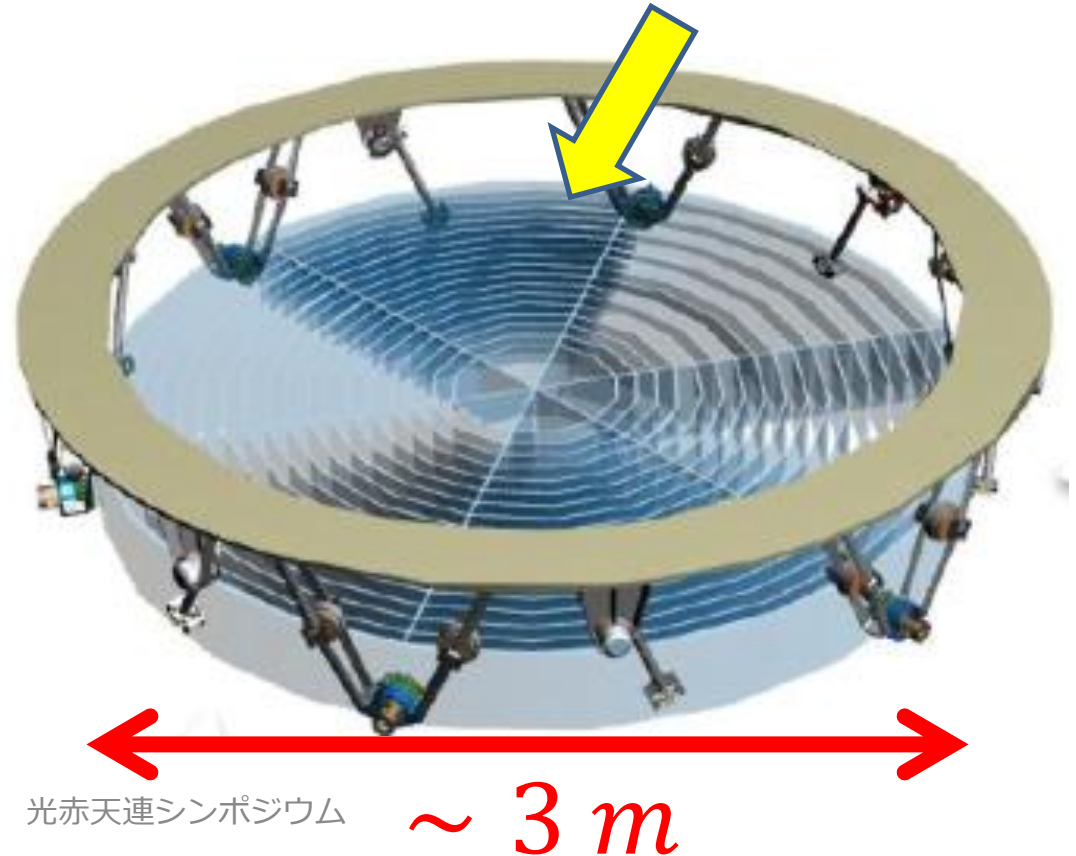
×678

大有効面積
 $> 1.4 \text{ m}^2$

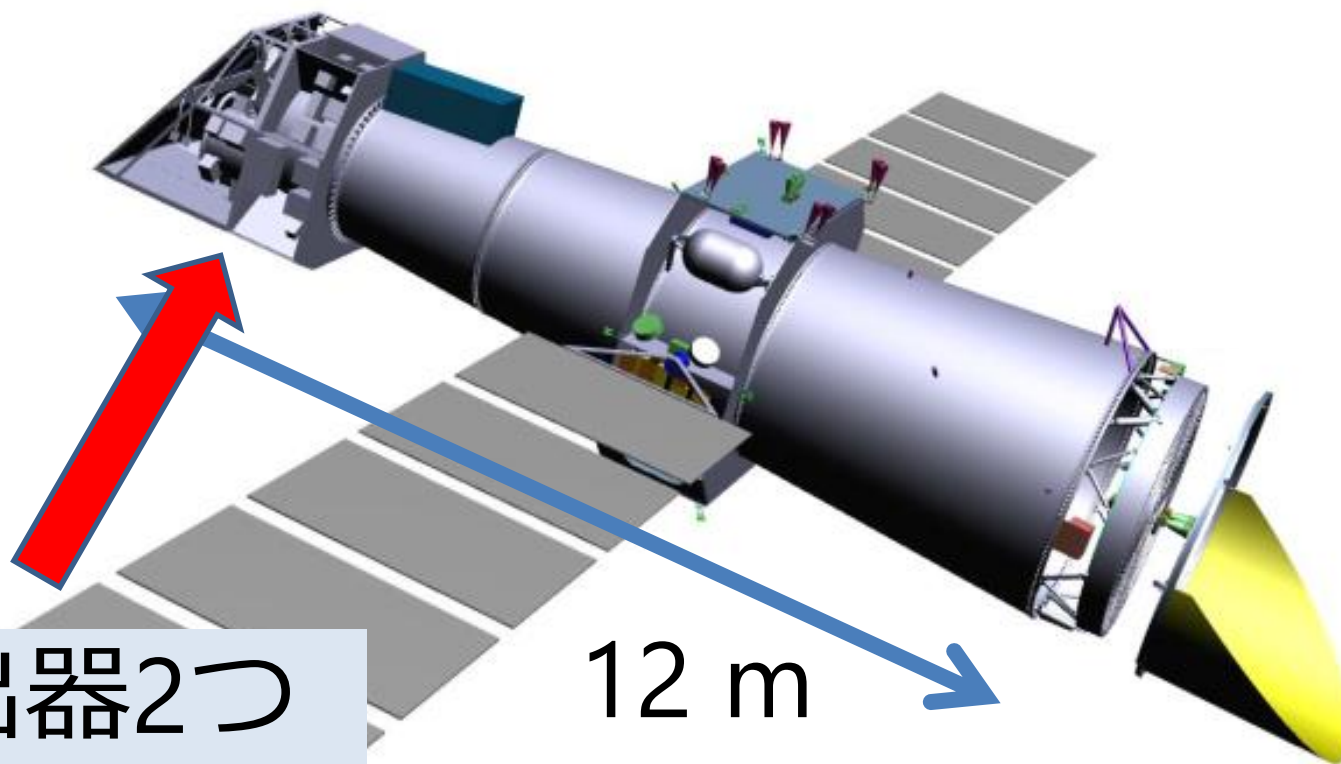
高角度分解能
5秒角

(ひとみ、XRISM ~1分角)

2021/9/7



Athena



検出器2つ
X-IFU & WFI

X-IFU: X線TESマイクロカロリメーター

6

X-ray Integral Field Unit (X-IFU)

冷凍機+デュワー

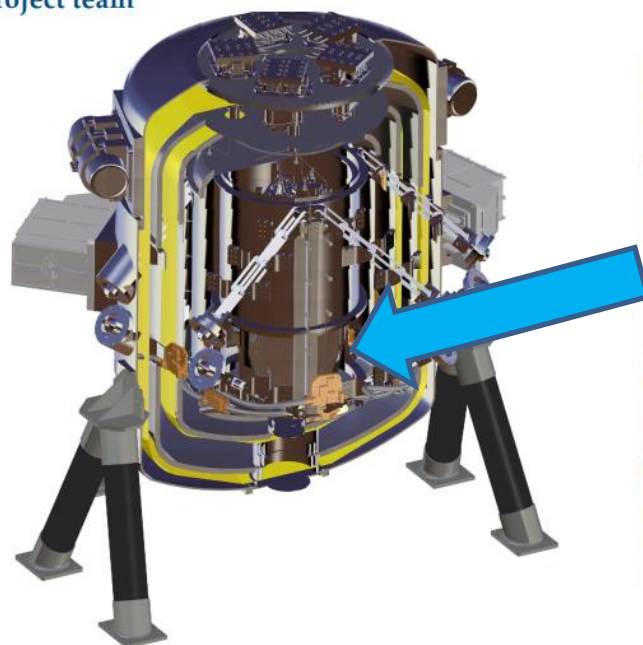
TESカロリメーター
アレイ

CNES project team

精密撮像分光

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

(ひとみ、XRISM
36 pix, 4 eV)



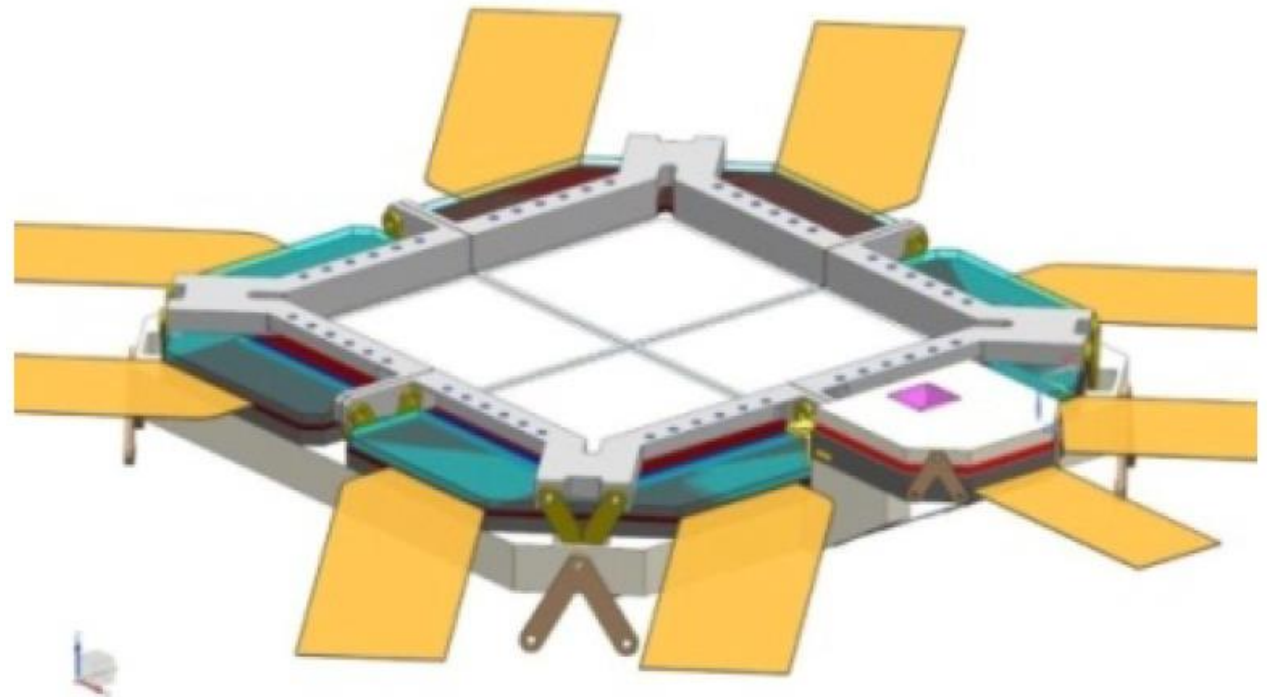
WFI:DEPFET Si検出器

7

Wide Field Imager (WFI)

広視野
40' × 40'

分光 $\Delta E \sim 130$ eV

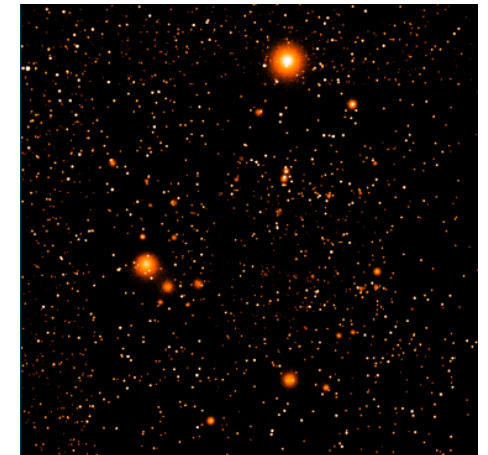
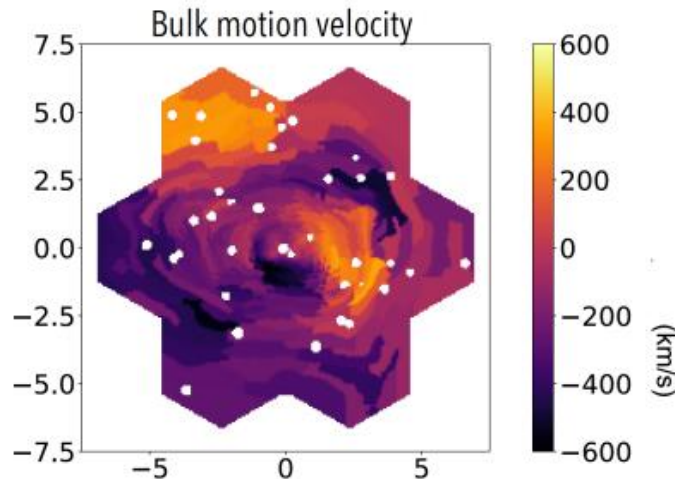
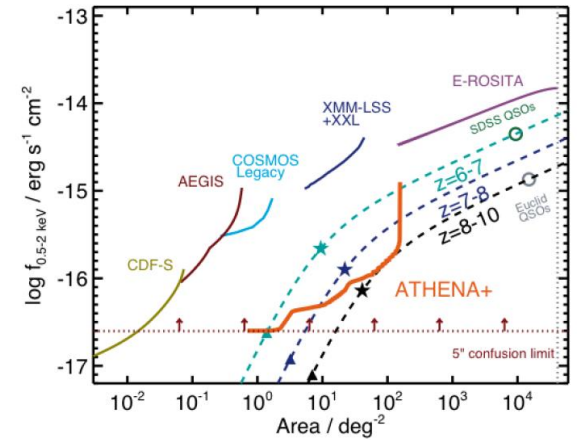
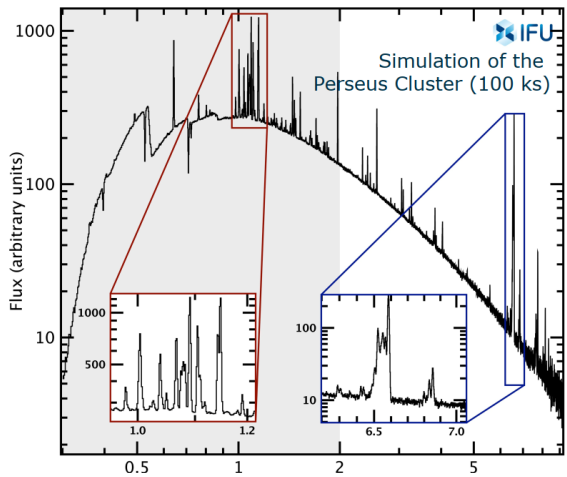
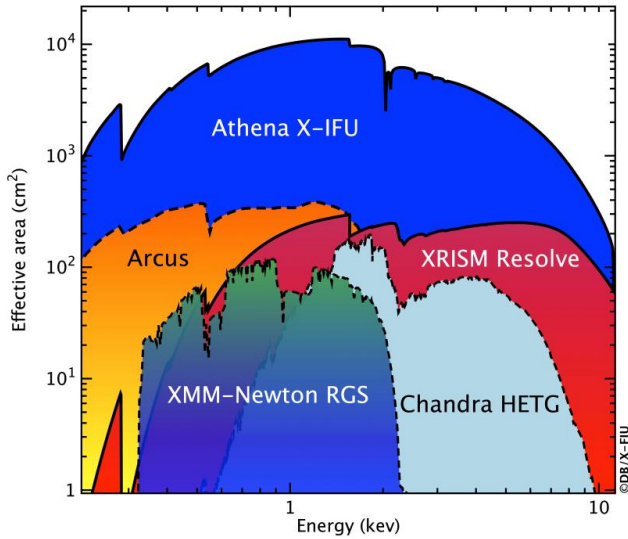


Athena's innovation

最も精密な
撮像分光観測

広く深い
X線サーベイ

大面積



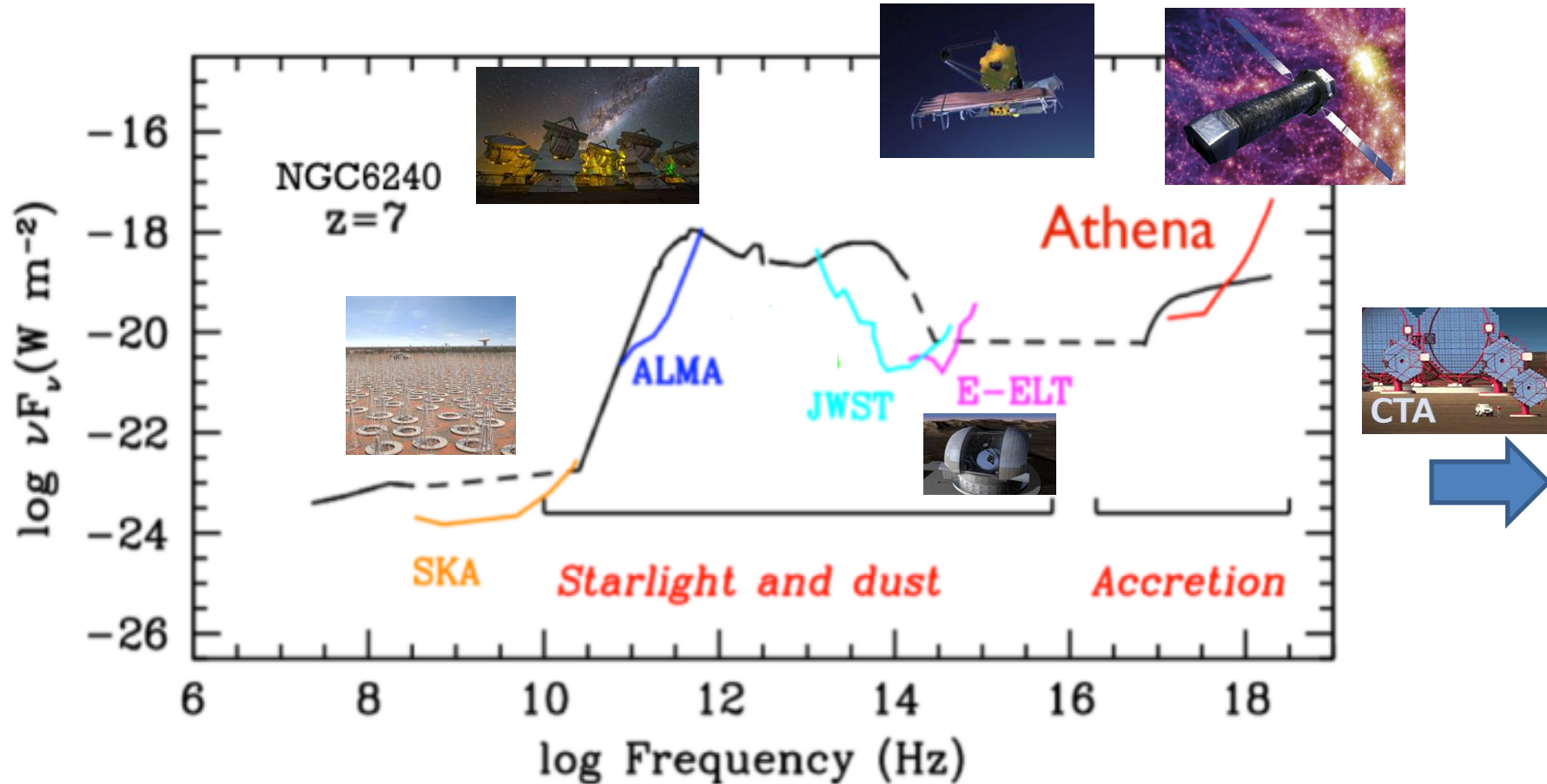
©D. Barret & M. Guainazzi

2021/9/7

學術的意義

THE ATHENA
MISSION

2030年代: 大型観測装置時代 ¹⁰



各波長の大型観測装置と比肩してX線観測を担当

世界で唯一の確定した大型X線天文台

サイエンステーマ

11

- キーサイエンス

- “Hot Universe” : 銀河団成長

- バリオンの大規模構造への集積

- “Energetic Universe” : 巨大BH成長

- 巨大ブラックホールの成長と周辺へのフィードバック

- 2030年代のX線 Observatory

- その時代Chandra, XMM-Newton(はない)

バリオンの進化を解明する 12

$z \sim 0$ 現在の銀河団

$z \sim 2$ 最初の銀河団

集積

お互いに制御

再電離

12

20

Cosmic "Dark Ages"

$z = 11.1$

Big Bang

First stars?

Present day

$T = 1.39 \text{ Gyr}$
 $z \sim 1 - 4$

2021/9/7

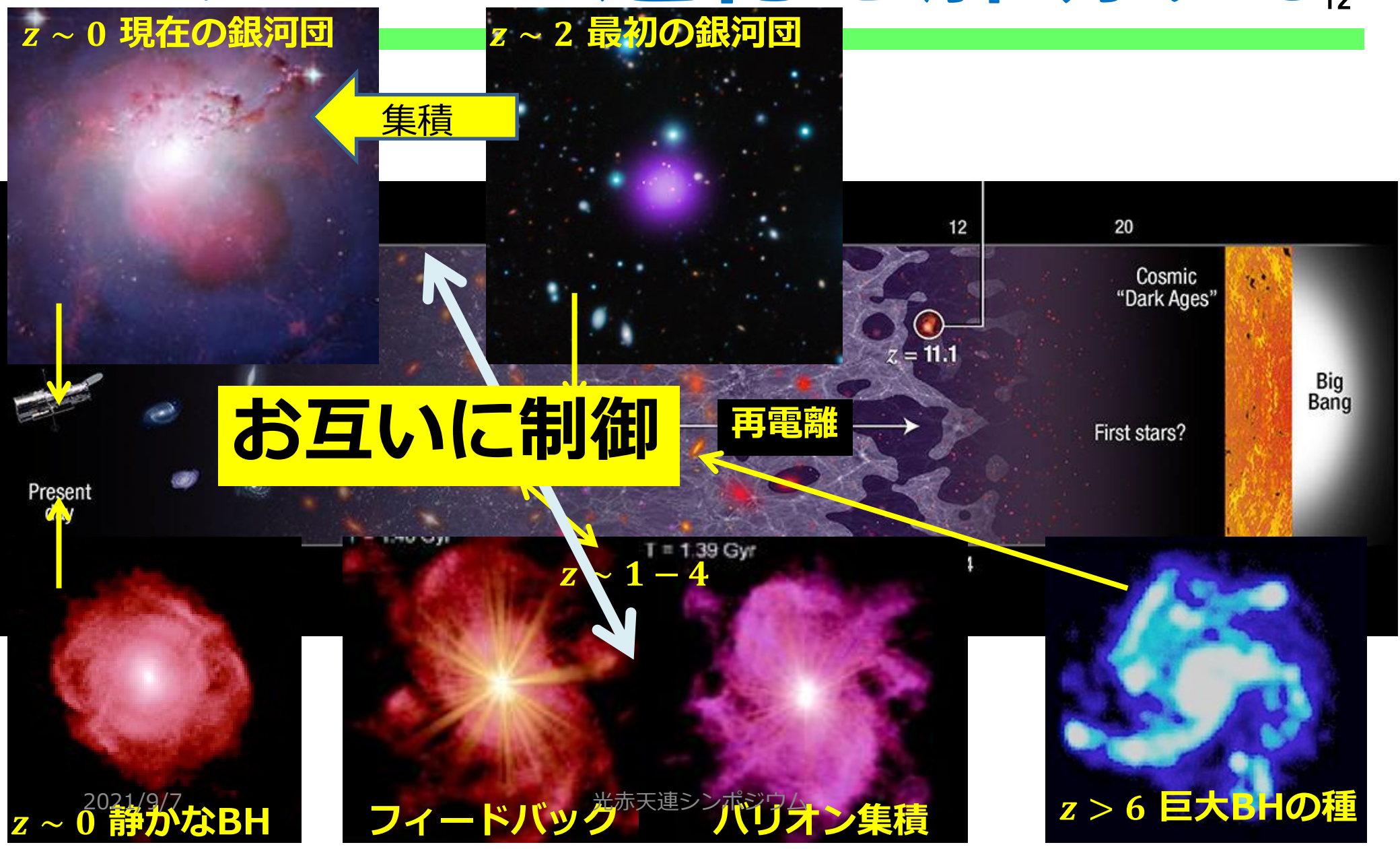
$z \sim 0$ 静かなBH

フィードバック

光赤天連シンポジウム

バリオン集積

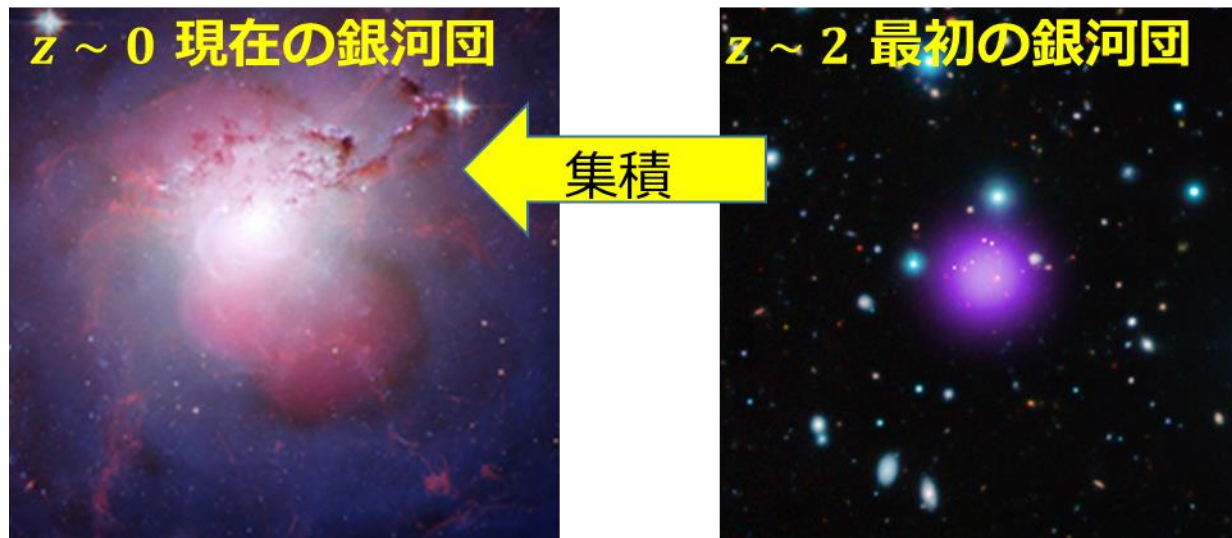
$z > 6$ 巨大BHの種



銀河団

重力束縛された最大の構造

銀河団バリオンの主成分はX線ガス



どのように高温になった？

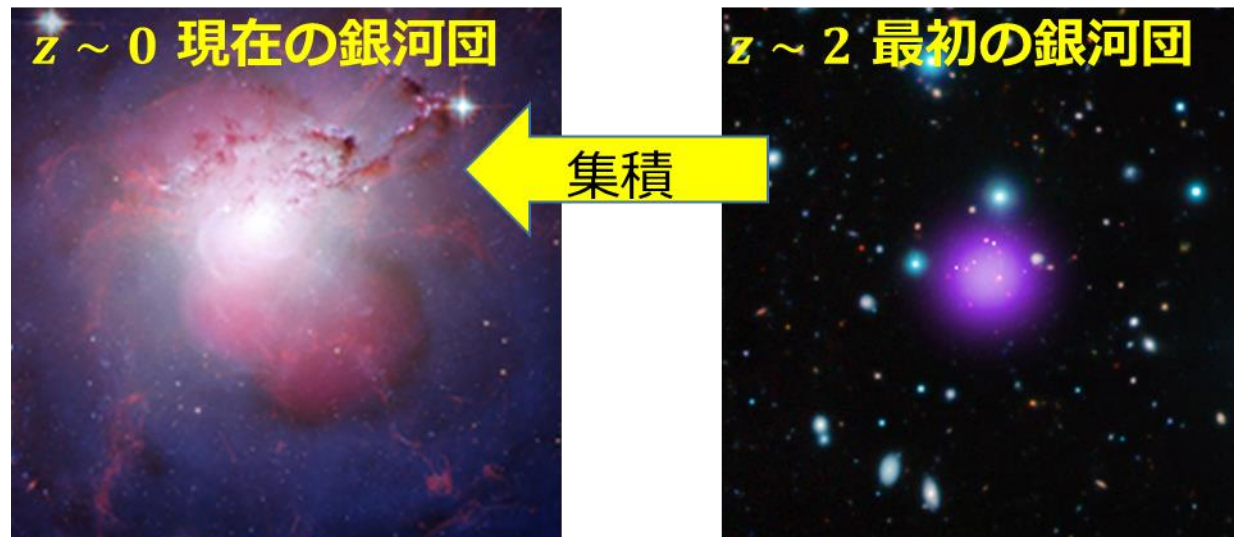
14

エネルギー生成史の解明

熱エネルギー (温度)

非熱的エネルギー (乱流、バルク運動)

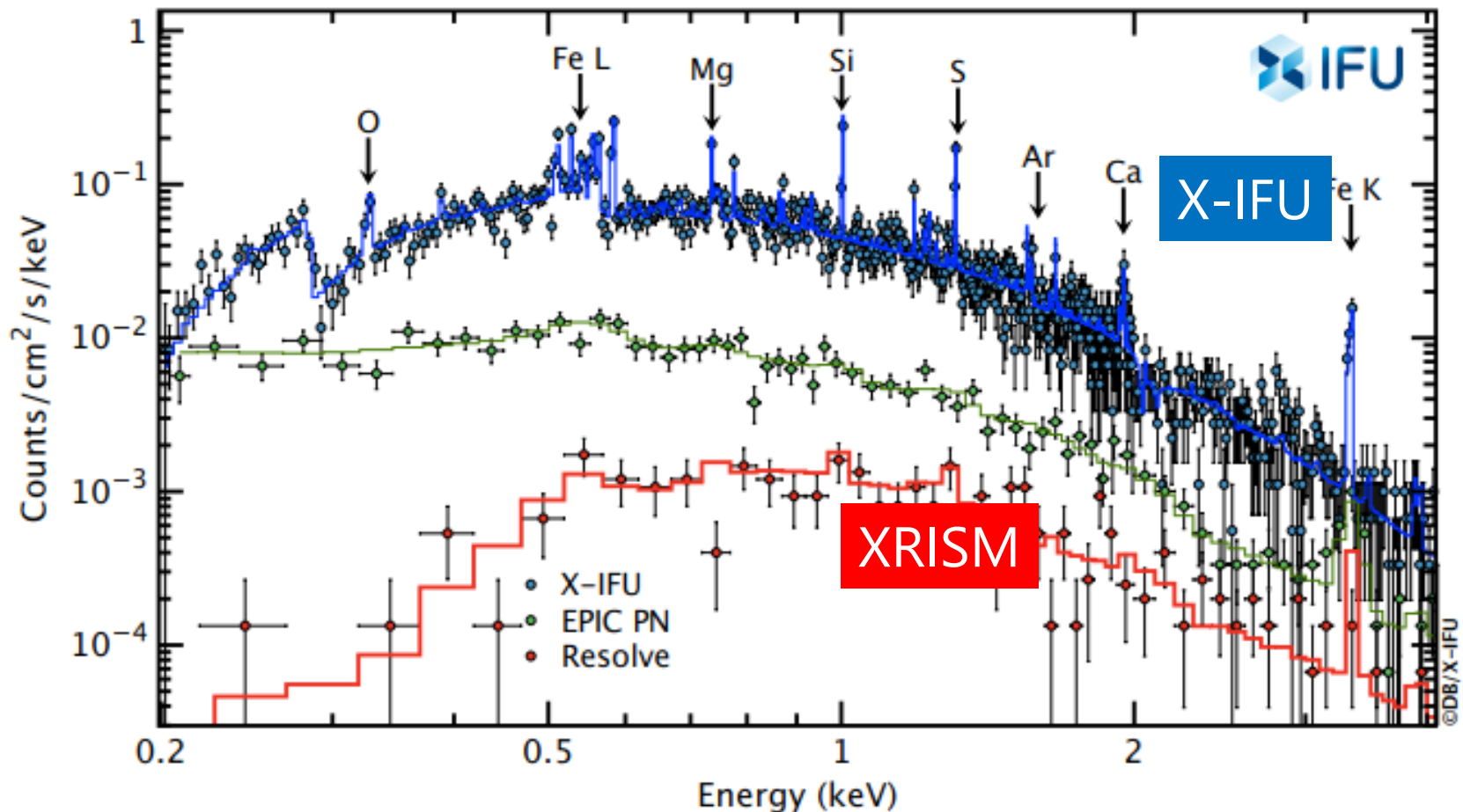
超新星による注入 (重元素組成)



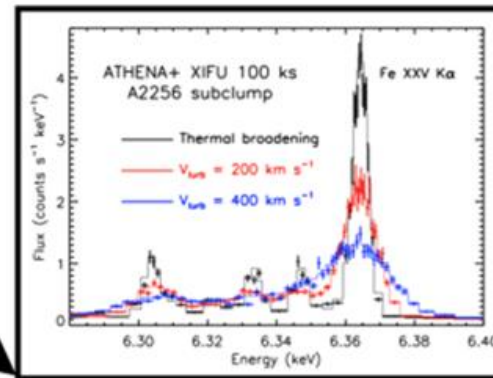
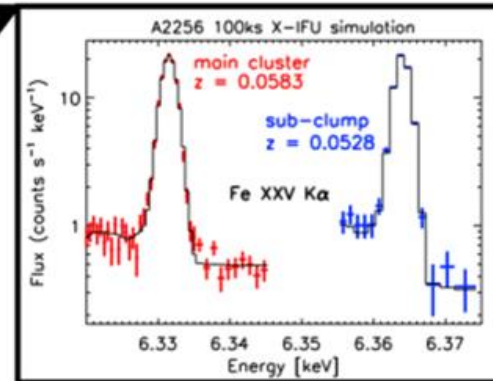
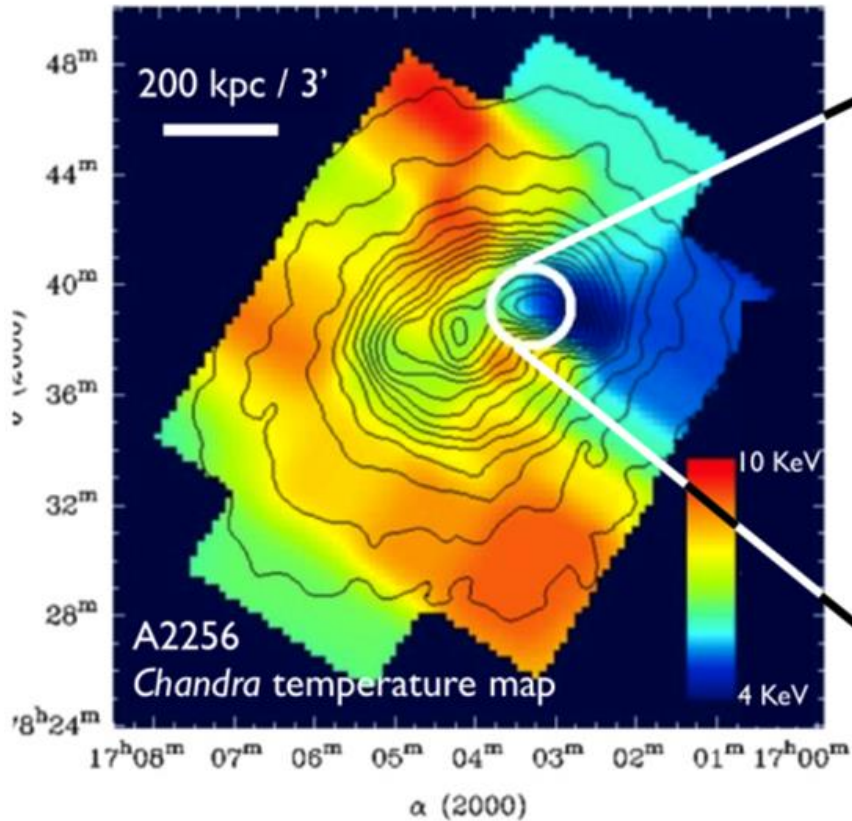
精密分光→ガスの温度、密度、重元素

15

$L_X = 10^{44} \text{ erg/s}$, $kT = 3 \text{ keV}$, $z = 1$, 観測150 ks



精密分光→非熱的運動



バルク運動

乱流

ミッシングバリオン

17

バリオン割合

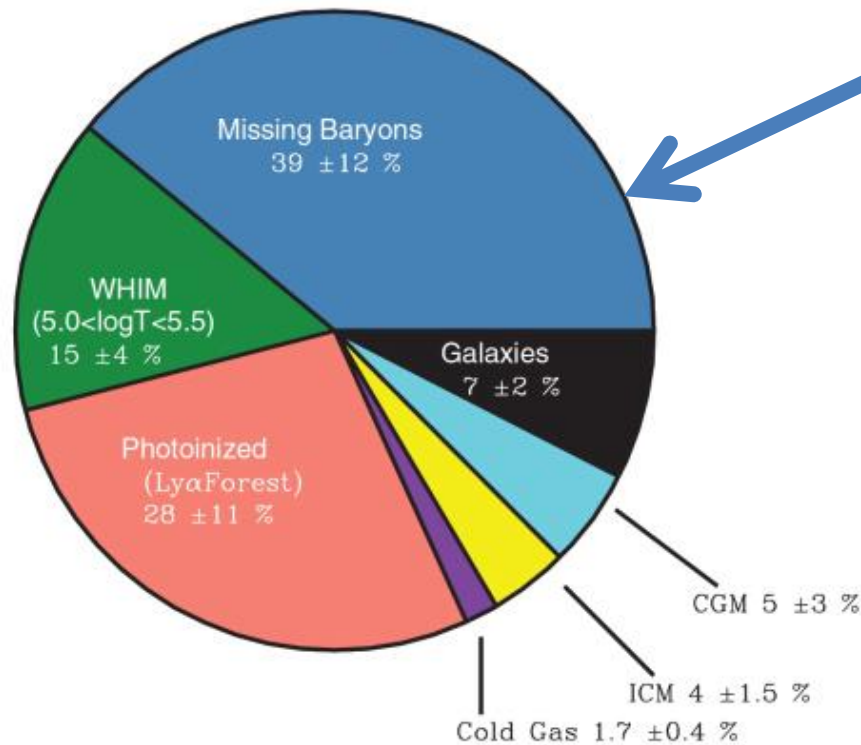


FIGURE 1 Baryon budget in the Universe, at $z=0$. The actual percentage of baryons still missing (blue slice) could be as high as $\approx 50\%$.

温かいガス？
(WHIM)

Warm-Hot Intergalactic Medium

$10^5 \sim 10^7 K$

$10^{-6} \sim 10^{-4} cm^{-3}$

銀河団周辺

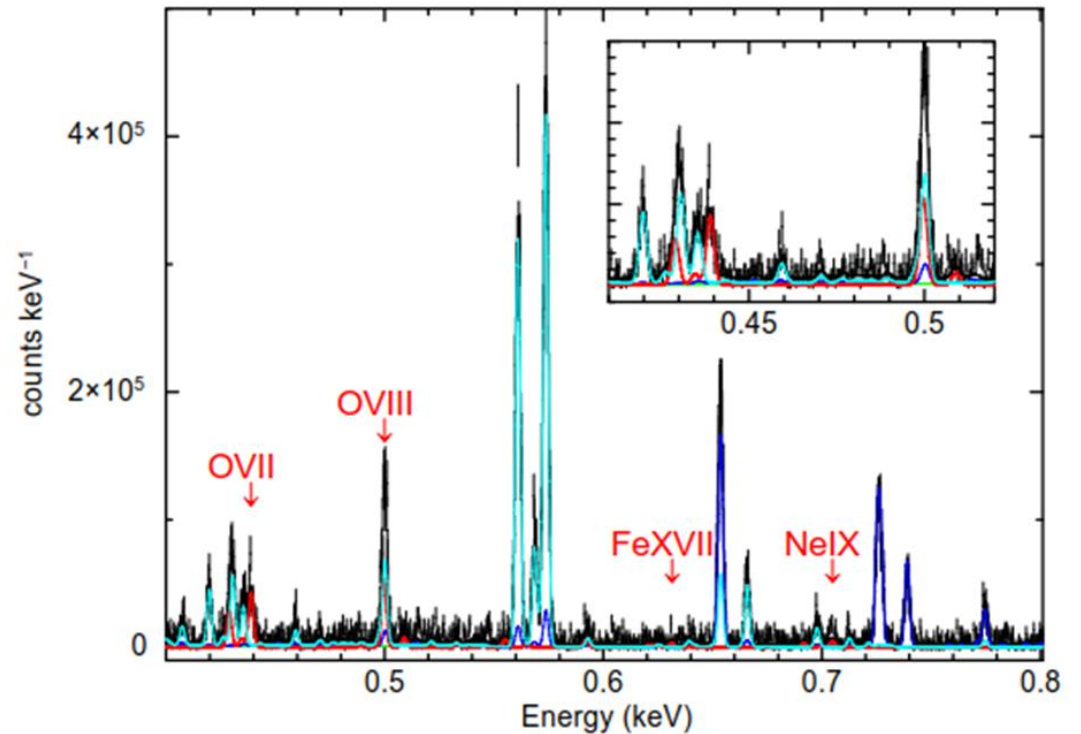
精密分光→低密度の極限へ

18

WHIM,
ローカルホットバブル、銀河系ハロー

WHIMが存在
→酸素特性X線

物理状態を決定



Hattori et al. 2017, PASJ, 69, 39

光赤天連シンポジウム

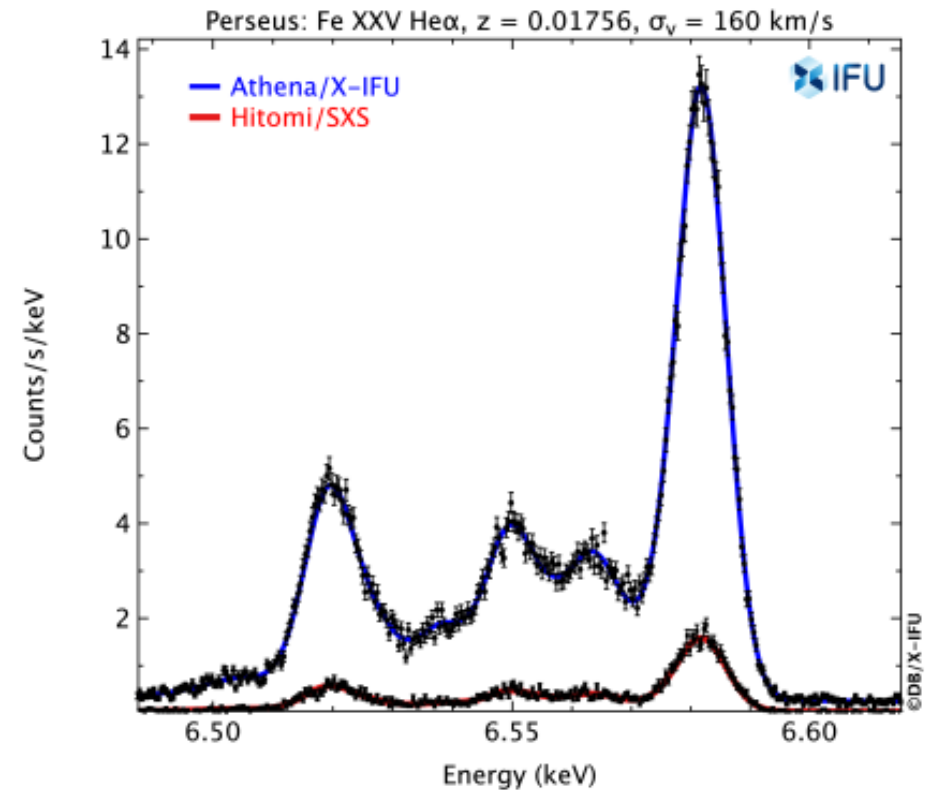
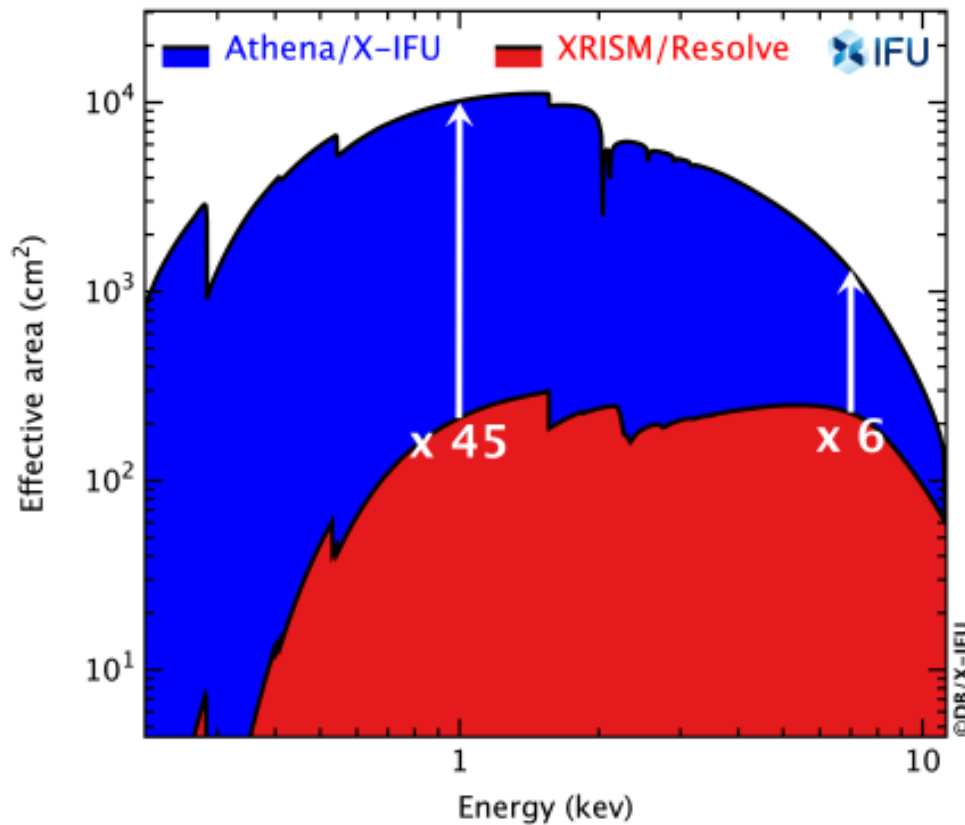
A satellite with two long solar panel arms is shown in space, orbiting a planet. The satellite is dark with a prominent lens-like structure. The planet is partially visible on the left, showing a blue and white atmosphere. The background is a dark blue space with some light spots.

ひとみ、XRISM

THE ATHENA
→ Athena
MISSION

ひとみ、XRISM→Athena²⁰

大有効面積化



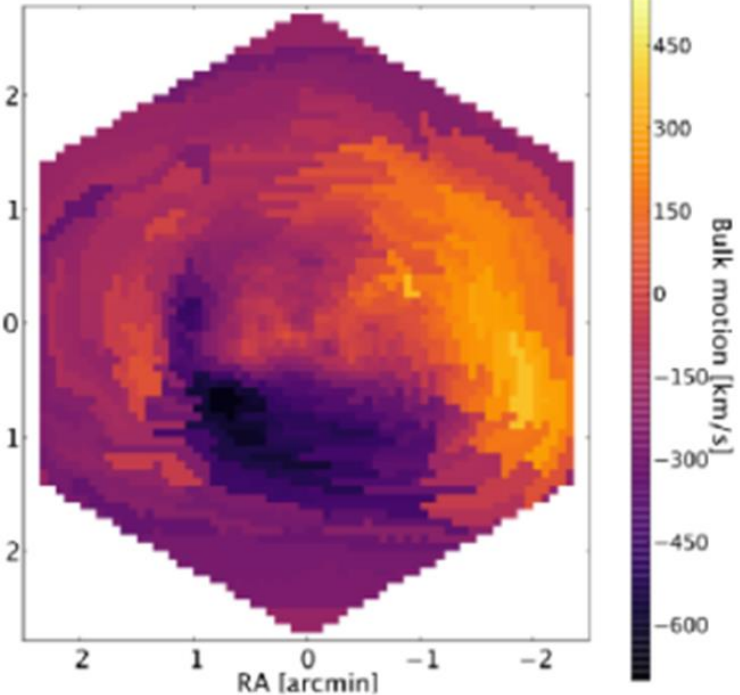
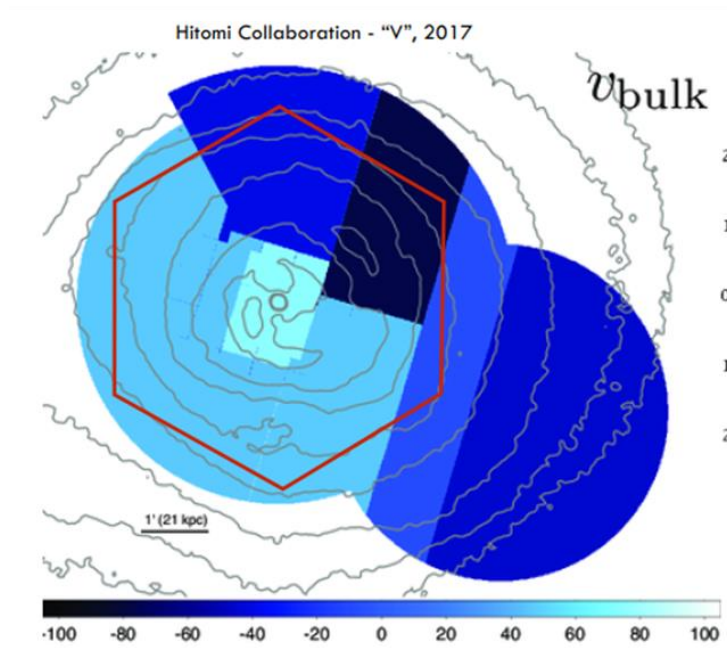
ひとみ, XRISM → Athena₂₁

角度分解能 16 倍向上

ひとみ、XRISM

Athena X-IFU

Barret et al .2016





ひとみ、XRISM
近傍の明るい天体



Athena
遠方の暗い天体

Athena で“時間軸”を加える

日本の参加

THE ATHENA
MISSION

日本の参加の目的

- ひとみ、XRISMの成果に基づき、Athenaの科学成果を最大化する
- ハードウェア開発に協力し、Athenaを確実に実現する

XRISM で

X線精密分光学の基礎を築く

例: 解析手法の確立、原子過程計算精度向上など

例 Hitomi collaboration, 2018, PASJ, 70, 12

新しいサイエンスを創出する

そしてAthenaで発展させる

Athena Science Study Team & WG

26

ESA Athena Science Study Team (ASST)

M. Guainazzi (Chair), D. Barret (X-IFU PI), K. Nandra (WFI PI), M. Cappi, E. Costantini, J. Croston, A. Decourchelle, J.W. den Herder, L. Piro, N. Rea, T. Reiprich, N. Werner, R. Smith (NASA), **松本 (JAXA)**.

SWG1

Hot Universe

Fabian, Reiprich, **太田(奈良女)**

SWG1.1

Evolution of galaxy group and clusters

Allen, **佐藤(埼玉大)**,

Pointecouteau

SWG1.2

Astrophysics of galaxy group and clusters

Ettori, Pratt, Eckert

SWG1.3

AGN feedback in galaxy group and clusters

Croston, Sanders, McNamara

SWG1.4

Missing baryons and warm-hot intergalactic medium

Kaastra, Finoguenov

SWG2

Energetic Universe

Nandra, Cappi, Brenneman

SWG2.1

Formation and growth of earliest SMBH

Aird, Comastri

SWG2.2

Understanding the build-up of SMBH and galaxies

Georgakakis, Carrera, **上田(京大)**

SWG2.3

Feedback in local AGN and star forming galaxies

Ponti, Ptak, **寺島(愛媛大)**

SWG2.4

Close environments of SMBH

Dovciak, Matt, Miniutti

SWG2.5

Physics of accretion

Done, Miller, Motch

SWG2.6

Luminous extragalactic transients

Jonker, O'Brien

SWG3

Observatory

Decourchelle, **松本**, Smith

SWG3.1

Solar System & exoplanets
Branduardi-Raymont, Güdel

SWG3.2

Star formation and evolution
Rauw, Sciortino

SWG3.3

End points of stellar evolution
Bozzo, Schwobe

SWG3.4

Supernova remnants & Interstellar medium

馬場(東大), Sasaki

SWG3.5

Multiwavelength synergy

Combes, Salvato

TWG4

Telescope

Willingale, Pareschi

栗木(愛媛大)、前田 (ISAS)

MWG5

Mission Performance

den Herder, Piro, Rau

MWG5.1

Science ground segment
Watson, Webb

MWG5.2

Background

Laurent, Molendi

MWG5.3

Inter-calibration

Burwitz, Pajot, Sembay

MWG5.4

End-to-end simulations

Peille, Wilms

MWG5.5

Advanced analysis tools

Fiore, Haberi

MWG5.6

Targets of opportunity

Basa, Troja

2021/9/7

光赤天連シンポジウム

日本人チェア

ASST: 1名

SWG chair: 6名

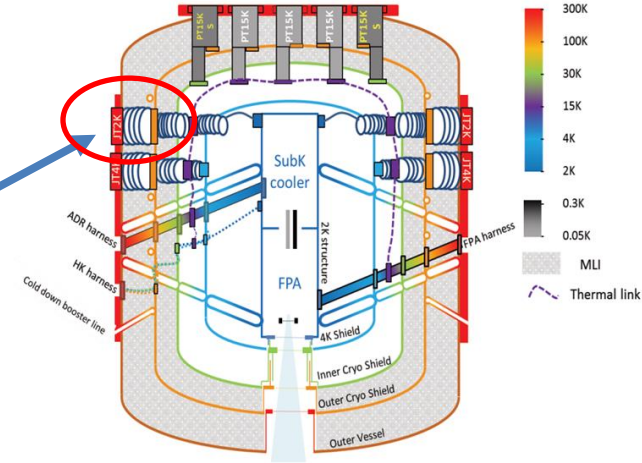
(米国とほぼ同数)

ハードウェア開発

27

メイン:
X-IFU冷却系

2K ジュールトムソン冷凍機
日本担当以外に
技術的成立解無し



Athena は日本の参加無くして実現しない

その他:

WFI エレキ

望遠鏡コーティング

TES カロリメーター読み出し など

(科研費などで活動)

2021/9/7

光赤天連シンポジウム



- X線精密分光

- てんま、あすか、すざく、ひとみ、XRISMと日本が発展させたX線分光の決定版

- 2030年代の科学者がXRISMの成果をもとに世界に飛躍するチャンス

- 観測時間日本枠

- 具体的交渉はこれから。特に Key Science への参加権利。
 - XRISMの成果を生かせるように。
- 2K JTが重要コンポーネントであることをもとに、金額以上の枠をとるべく努力。

• 冷凍機開発

– 衛星上で無冷媒極低温冷却系を使用した、高感度低ノイズ観測

- LiteBIRD, SPICAにも共通した日本の強み

– 2K JT冷凍機は、日本しかできない

- 日本がやらなければ、2030年代のX線観測がなくなる。

高エネルギー宇宙物理連絡会

2014年3月高宇連討論会

「Athena と同じ規模のものを単独の国が立ち上げることは困難であり、自分たちが行うべきサイエンスのある部分は Athena で実現される。このことから、**Athena がその成果を最大限にあげられるように、わが国としても貢献すべきである**」

2018年6月高宇連将来計画検討 (第二期答申)

「高宇連の旗艦ミッションであるXARMと、それに引き続く Athenaは、**高宇連の最優先課題**として開発・検討が進められている。」

MP2020: 重点大型計画ヒアリング対象

A satellite with solar panels is shown in space, orbiting Earth. The Earth is visible on the left side of the frame, showing a blue and white horizon. The satellite is positioned in the center, with its solar panels extending outwards. The background is a dark blue space with some light spots.

ステータス

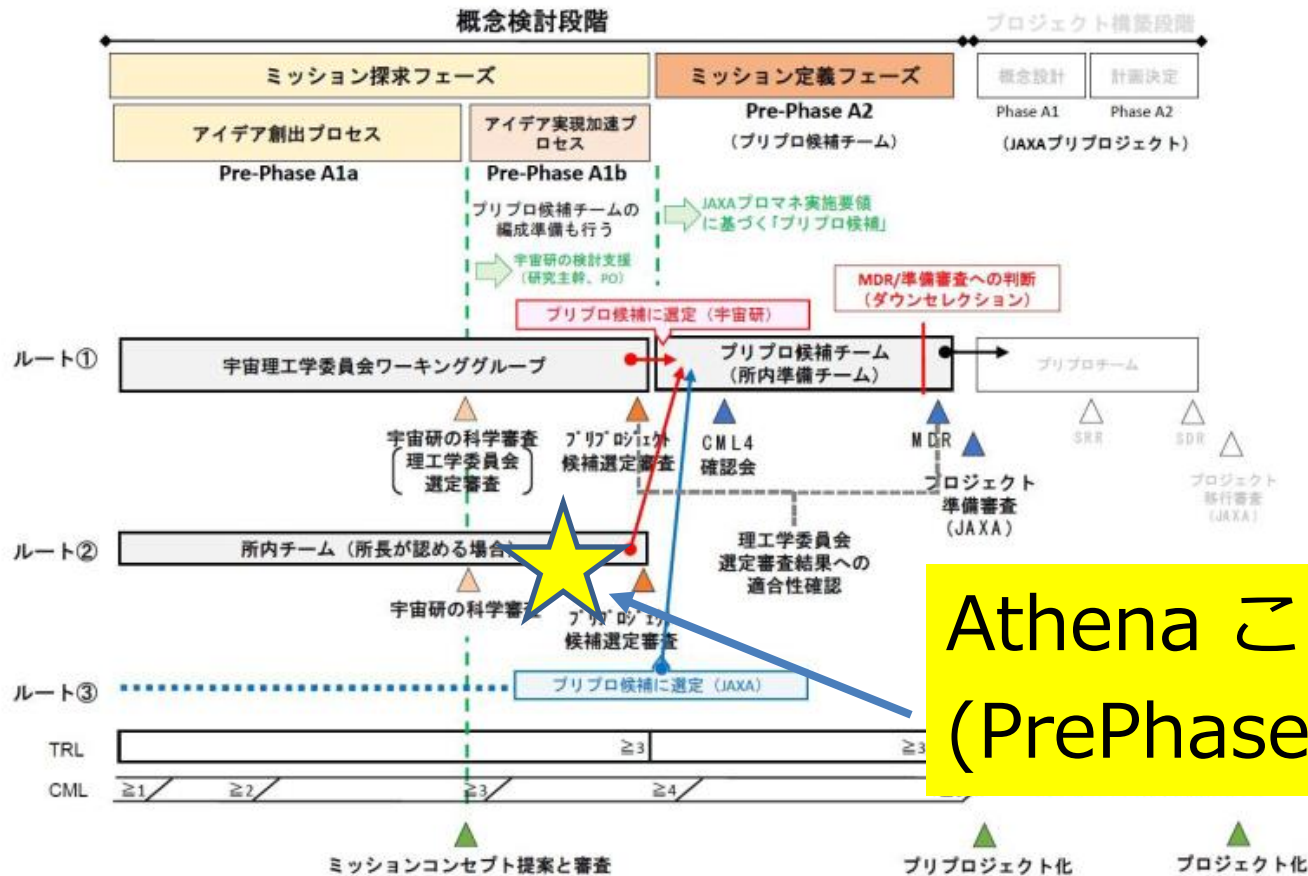
THE ATHENA
MISSION

Athena status と 今後

32

Jan. 2021	Spacecraft Interim Review
2021 後半	Science Instrument Module (SIM) Review
2022 前半	Payload and SIM System Requirement Review (SRR)
2022 後半	Mission and Spacecraft SRR
2022 夏	Definition Study Report (aka Red book)
2022 終盤	Mission Adoption Review
2023以降	Implementation phase (約10年)
2030年代前半	Launch

日本側のstatus



Mission Adoption in 2022

34

2022年終盤

ここでAthenaの全容決定

日本のハードウェア貢献も決定

それ以降 implementation

これからが日本のフェーズアップ・予算
獲得に向けて最も大切な時期

所要経費

35

Athena 全体

ESA 1B€、ESA加盟国350M€

+ 米国 100M€、**日本30~50M€**

日本の担当が2K-JTのみなら ~ 30億円
(他 WFI エレキ等も含めると~50億円)

2023年~2028年に、本格的な製作

松本の個人的感想

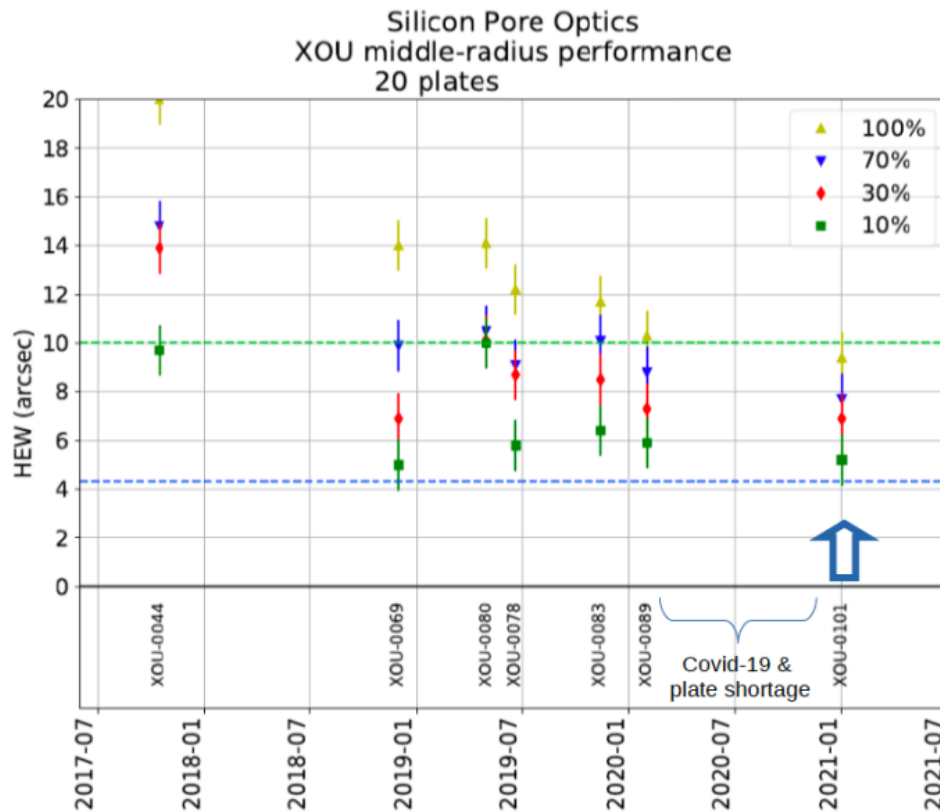
THE ATHENA
MISSION

- 縦割り行政感が強い
 - 科学者・機器開発者・計画マネジャー側(ESA)がほぼ分離。
 - サイエンスと機器開発の現状のギャップ
 - 例：X線望遠鏡の角度分解能問題
 - どれだけの人全体を把握しているのか？
 - 例：質量オーバー問題

望遠鏡角度分解能問題

38

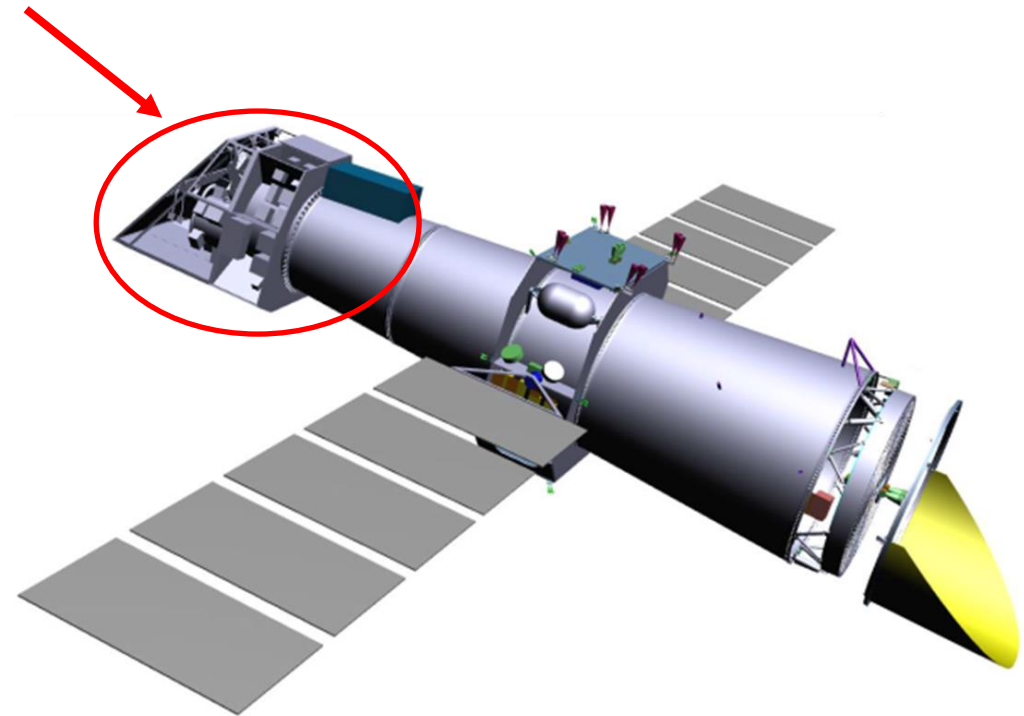
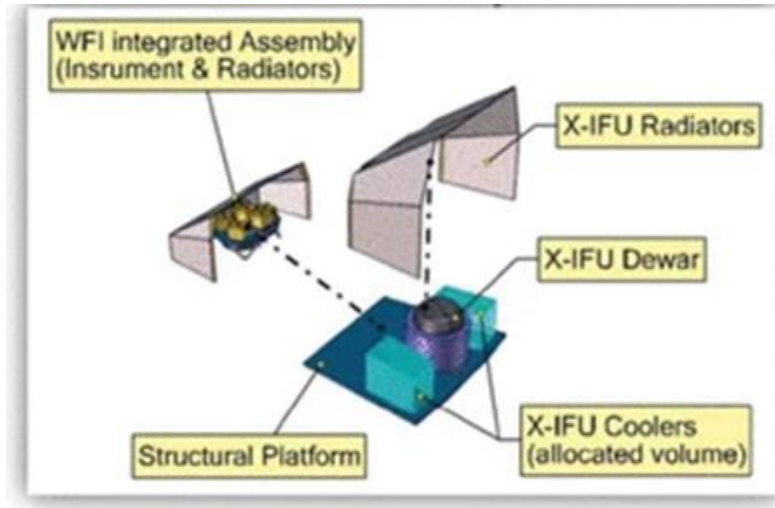
小さなモジュールの分解能



- 望遠鏡全体で5秒角実現の目途は立っていない。
- しかしこれまで、サイエンス側は、5秒角の要求を緩めなかった。
 - 望遠鏡は完全にESAの管轄。科学者側に望遠鏡開発現場を良く知る人が少なく、逆もまた然り。
 - 科学者側は、Science Study Team meetingで開発の報告を聞いていたが、常に楽観的だった。
- Mission Adoptionが近づいてきたいま、ようやく要求値を緩和させる可能性を議論中

SIM質量問題

Science Instrument Module (SIM) ~2500 kg



先日 SIM review があり、質量超過が問題になった

SIM質量問題

ESA側から各consortium宛に、質量削減案が投げかけられた

- X-IFU 327 kg から74 kg減
- WFI 307 kg から 32 kg減
- JT 2K 166 kg から 13 kg現

ただし、削減案の根拠などの十分な説明はなし。
各consortiumは困惑している模様。

個人的には、全体を見渡してみんなでどうにかしよう、という
雰囲気をおあまり感じない。

国内コミュニティ

- 重要なミッションだが、日本のものではない。
- ハードウェア開発で、多くの人がうるおうミッションではない。
 - ハードウェアで若手を育てる場にはなりにくい
 - 一方で、サイエンス的には日本の方向性とマッチ
- 「2030年代」をいまだに遠く感じる人も多い。
 - Athenaが採択された2014年ではそうだったが… implementation phase が目の前に来ているが。
- コミュニティの中では、重要性は理解されている。しかし、「我が事」であるという雰囲気は十分とはいえない。
 - ひとみやXRISMと同時に走っていることも大きな要因の一つ。

