

# X 線分野の将来計画と その策定の枠組み

田中孝明 (京都大学; 高宇連会長)

# 高宇連とは

高エネルギー宇宙物理連絡会(高宇連; こううれん)は、**高エネルギー宇宙物理学の研究の発展を目的**として、1999年8月に設立が提案されました。**提案者の母体は主に飛翔体を用いてX線やガンマ線で天体観測している研究者**ですが、**関連する分野の研究者の方々にも広く入会**して頂き、密接な議論の元に分野の発展に貢献することを目指します。

現在、高エネルギー宇宙物理学の研究プロジェクトは巨大化を続けており、一つのプロジェクトを進めるためにも巨額の資金を必要とします。一方で、小グループでの独自の小規模研究を進めることができます。当会の**目的は、巨大化するプロジェクトを研究者の議論の元に総意として提案する機関となること**です。さらに、**推進するプロジェクトに対して、広い研究分野での新しい発想、技術を余す所なく検討し、最大の科学成果を上げられるように、提言していくこと**です。また、小グループでの独自の研究も、研究者相互の風通しを良くして、よい研究を見落とさずに擁護できる体制を作ることです。

さらに、飛翔体や観測所を利用する立場から、飛翔体や観測所への要求も明確にする必要があります。共同利用研等に対する、**飛翔体等の開発方針や運営方針に対しても、意見できる機関としての役割**を担うことを目指します。

# 高宇連の組織と活動

## 運営委員

任期: 2018/4–2020/3

任期: 2019/4–2021/3

田中孝明 (京都大; 委員長)  
尾崎正伸 (ISAS/JAXA)  
馬場彩 (東京大)

北本俊二 (立教大)  
高橋弘充 (広島大)  
森浩二 (宮崎大)

<http://heapa.astro.isas.jaxa.jp/>

会員数: 184名 (2019/8/23 現在)

会員による選挙で選出 高宇連の活動を運営

## 第三期将来計画検討委員

任期: 2018/10–2020/9

深沢泰司 (広島大; 委員長) 谷津陽一 (東工大)  
赤松弘規 (SRON) 山口弘悦 (ISAS/JAXA)  
堂谷忠靖 (ISAS/JAXA) 田中雅臣 (東北大; 外部委員)  
中澤知洋 (名古屋大) 本間希樹 (NAOJ; 外部委員)

## 事務局

内山秀樹 (静岡大) (2017/10–2019/9)  
内田裕之 (京都大) (2017/10–2019/9)  
勝田哲 (埼玉大) (2018/10–2020/9)  
小高裕和 (東京大) (2019/10–2021/9) (予定)

事務担当

諮詢機関 2013 年に第一期を発足

高宇連のロードマップの策定・改訂

- 毎年 3 月に研究会 (非会員の方の参加も大歓迎) と総会を開催
- 必要に応じて将来計画に特化した研究会やタウンミーティングを開催して議論を行い、高宇連としての総意をまとめていく

# 高エネルギー宇宙物理の課題

高宇連第二期将来計画検討  
委員会報告書をもとに作成

宇宙の物質・空間の  
あり方と起源

ダークマター  
ミッシングバリオン (WHIM)

**XRISM, Athena, S-DIOS**

宇宙における多様性の発現

宇宙再電離  
銀河とブラックホールの共進化  
宇宙の化学進化  
粒子加速

物理学の根本原理の追求

ブラックホール近傍の極限重力場  
中性子星の状態方程式

**FORCE**

**Hi-Z GUNDAM**  
**PhoENiX**

**IXPE**

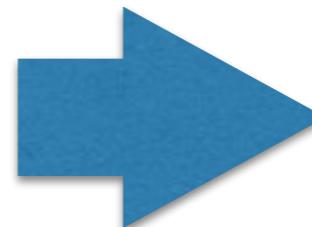
# XRISM, Athena に加えて何が必要か？

表 3 : XARM や Athena ではできない科学テーマ

次元軸		科学テーマ	手段
波長	分解能	プラズマ診断・運動学	超高精密度分光
	帯域	隠された AGN、非熱的放射	硬 X 線・ガンマ線
空間	解像度	宇宙最初の AGN	高解像度撮像
	視野	銀河間ガス、CXB	拡散放射、logN-logS
		突発天体・GRB・超新星	広天監視
	探査域	全天 X 線源目録	全天監視
時間	分解能	中性子星表面・内部	超高速計時
	時間尺度	AGN、X 線星の長期変動	長期監視
	運用時期	重力波等の X 線対応天体	多波長、マルチメッセンジャー
偏光	偏光度・方位角	磁場、幾何構造	偏光

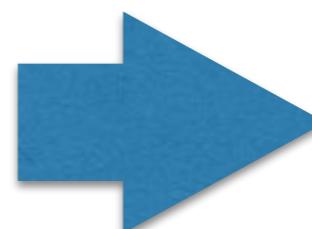
# JAXA 宇宙科学プロジェクトの枠組み

戦略的に実施する中型計画(300億程度)  
世界第一級の成果創出を目指し、各分野のフラッグシップ的なミッションを日本がリーダとして実施する。  
多様な形態の国際協力を前提。



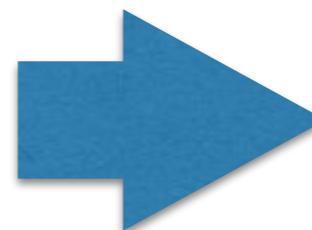
**XRISM**

公募型小型計画(50億–150億程度)  
従来の公募小型計画の推進方策に加え、地球周回軌道からのサイエンスを適正規模のミッションでタイミング一に実現する一方で、衛星探査機の小型化・高度化技術などの工学課題の突破から惑星探査への展開も図り、高頻度な成果創出を目指す。



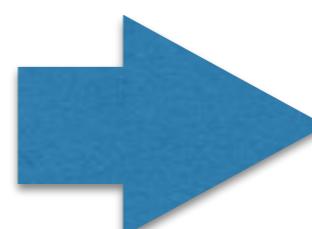
**FORCE**  
**Hi-Z GUNDAM**  
**PhoENiX**  
**Super DIOS**

戦略的海外共同計画(10億/年程度)  
海外ミッションへのパートナとしての参加や国際宇宙探査の観測機器の搭載機会等を活用するなど、多様な機会を最大に活用し成果創出を最大化を図る。



**Athena**

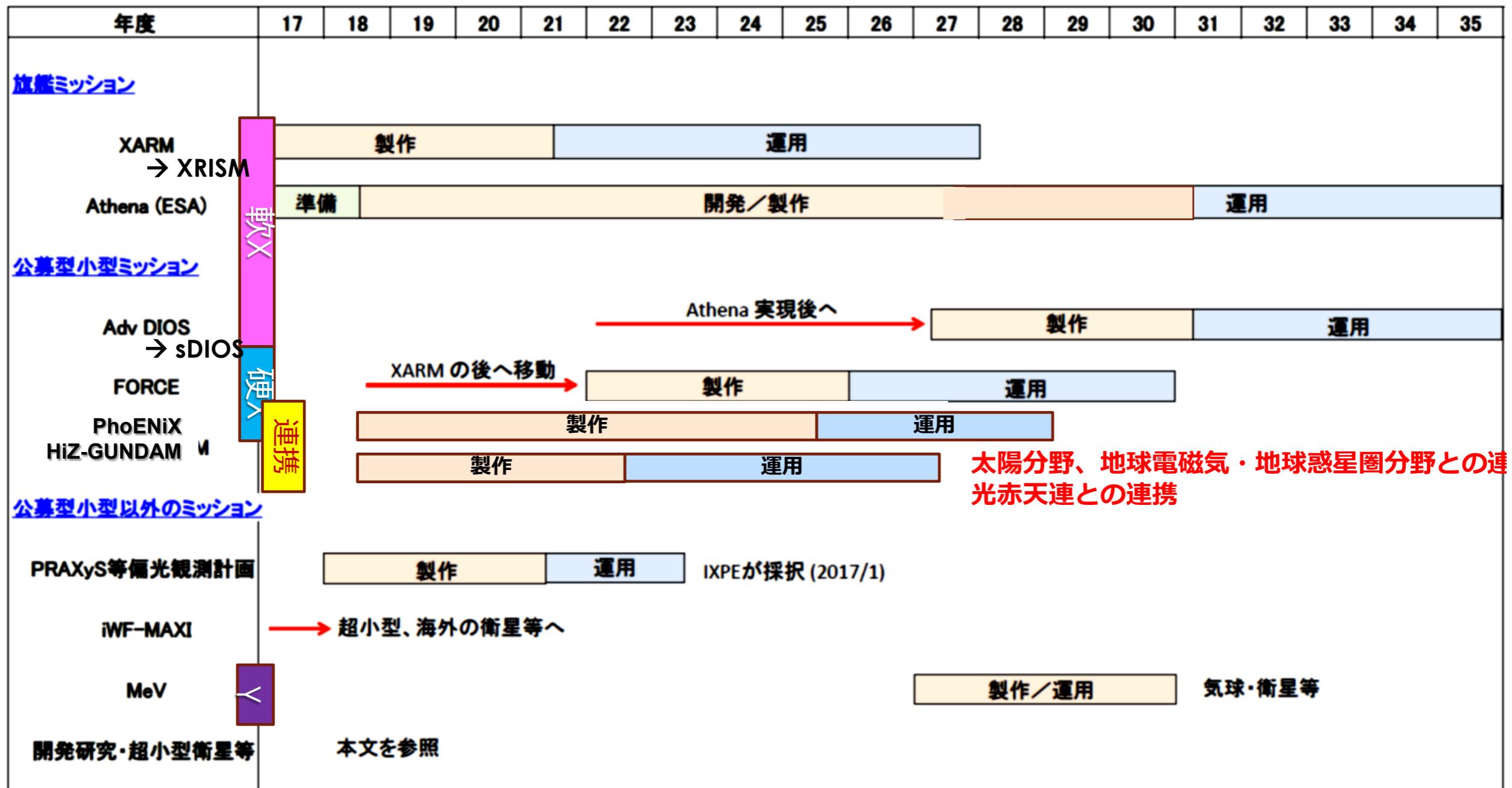
小規模計画(数億/年程度)  
国内外の研究者の幅広い提案を公募し、海外の観測ロケット・大気球、国際宇宙ステーション(ISS)などの飛翔機会を利用するなどした計画を推進。



**IXPE**

# 高宇連ロードマップ

2018/3 時点での情報



高宇連第二期将来計画検討委員会報告書をもとに作成

# 高エネルギー連が関係する計画

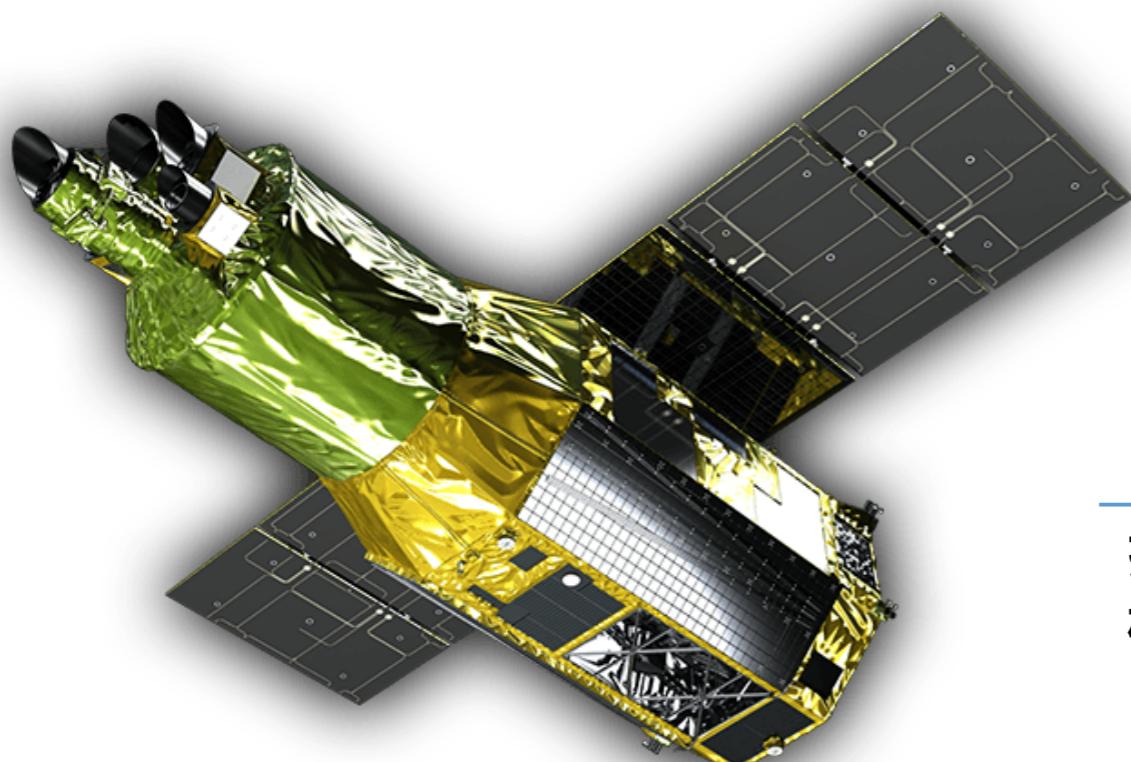
- XRISM (PI: 田代信也 @ 埼玉大)
- Athena (Japan PI: 松本浩典 @ 大阪大)
- FORCE (PI: 森浩二 @ 宮崎大)
- Hi-Z GUNDAM (光赤外分野との分野横断) (PI: 米徳大輔 @ 金沢大)
- PhoENiX (太陽分野との分野横断) (PI: 成影典之 @ 国立天文台)
- IXPE (Japan PI: 玉川徹 @ 理研)
- Super DIOS (PI: 佐藤浩介 @ 埼玉大)
- ...

各計画に関するスライドは PI の皆様にご準備いただきました

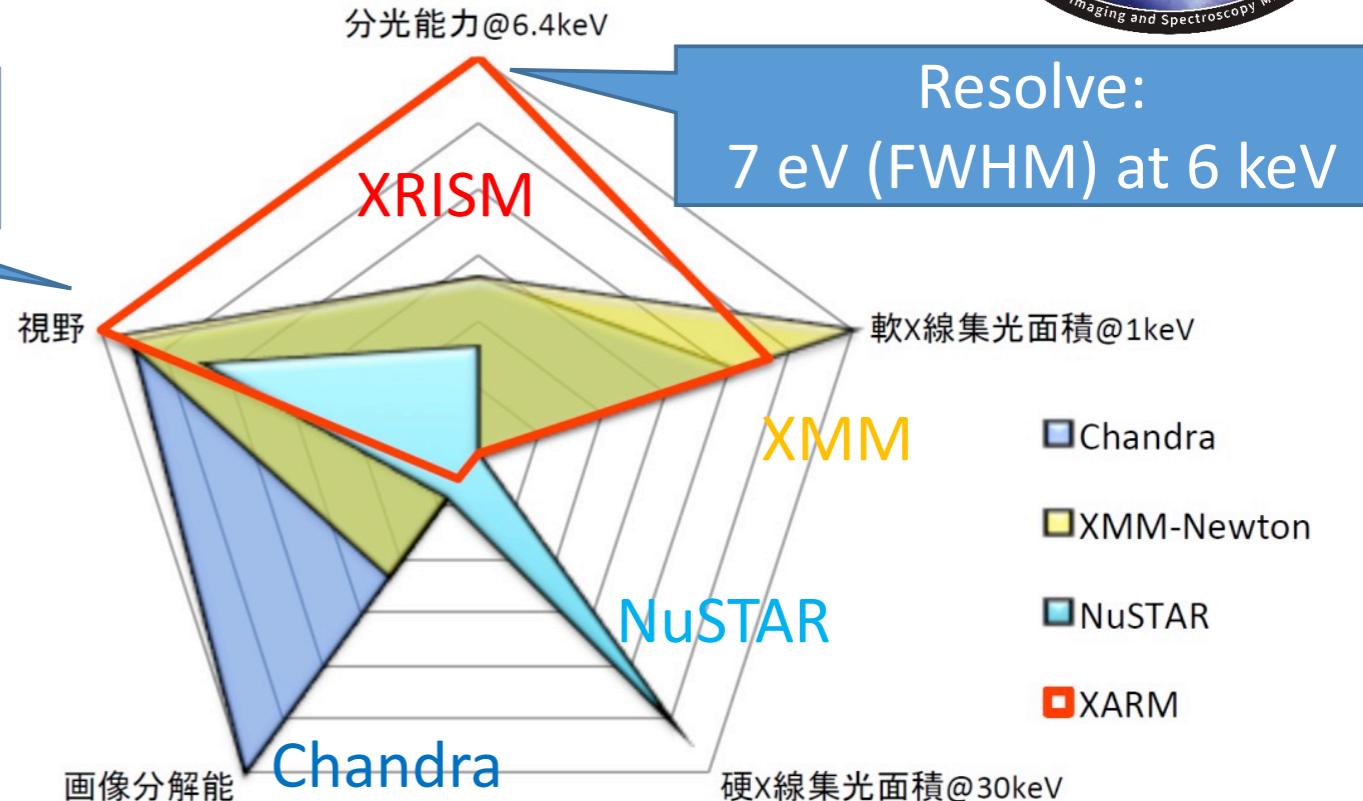
# 高エネルギー連が関係する計画

- **XRISM (PI: 田代信也 @ 埼玉大)**
- Athena (Japan PI: 松本浩典 @ 大阪大)
- FORCE (PI: 森浩二 @ 宮崎大)
- Hi-Z GUNDAM (光赤外分野との分野横断) (PI: 米徳大輔 @ 金沢大)
- PhoENiX (太陽分野との分野横断) (PI: 成影典之 @ 国立天文台)
- IXPE (Japan PI: 玉川徹 @ 理研)
- Super DIOS (PI: 佐藤浩介 @ 埼玉大)
- ...

# XRISM衛星の概要



Xtend:  
 $38 \times 38 \text{ arcmin}^2$



搭載ミッション  
機器

軟X線分光(撮像)器 Resolve  
XMA + X線マクロカロリメータ  
軟X線撮像(分光)器 Xtend  
XMA + X線CCD

質量

2.3 t

サイズ

H 7.9 m x W 9.2 m x D 3.1 m

運用期間

3年 (L-He寿命)+ 無冷媒運用

軌道

高度  $575 \pm 15 \text{ km}$ ,  
軌道傾斜角 31度

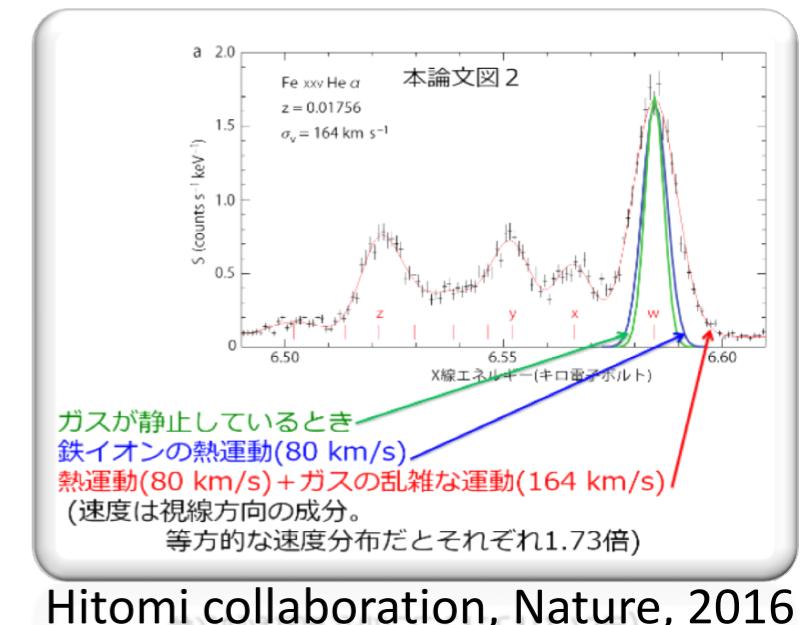
打ち上げ予定

2021年度

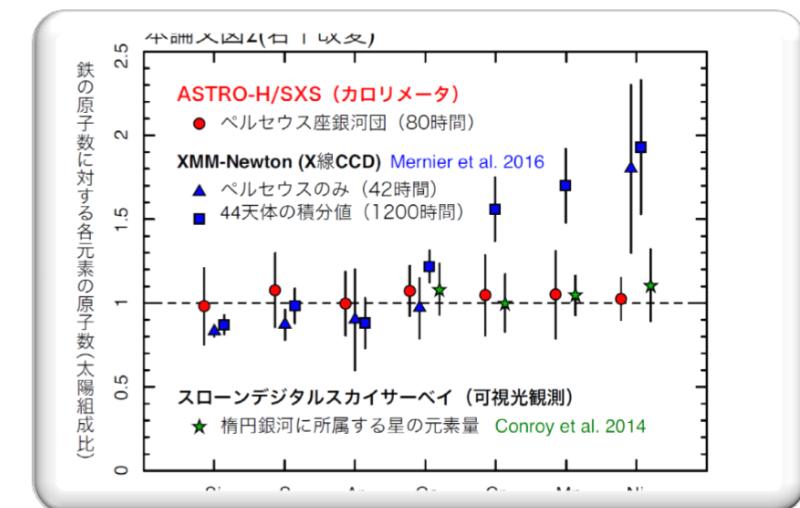
# 科学目的



- 宇宙の構造形成と銀河団の進化---銀河団の構造形成
  - 銀河団における熱的エネルギーと非熱的エネルギーの分布と散逸過程を観測
  - 銀河団の成長のようすを熱力学と動力学的の両面から直接観測
- 宇宙の物質循環の歴史---重元素の進化と輸送
  - 恒星や超新星爆発による元素合成から、星間空間・銀河間空間に至るさまざまな階層の元素循環をトレース
  - 宇宙の元素組成の進化を直接観測
- 宇宙のエネルギー輸送と循環
  - 高重力・電磁場・衝撃波中の物質/エネルギー輸送
    - 銀河と活動銀河核による物質とエネルギーフィードバックの機構を観測
    - 銀河中心巨大ブラックホールと銀河の共進化に対する寄与を明らかにする
- 超高分解能X線分光による新しいサイエンスの開拓---新世界へ
  - 画期的な分光性能で宇宙プラズマ精密観測にかかる診断方法の開拓
  - 鉄輝線・吸収線の重力赤方偏移の探査
  - X線天文学の新時代にふさわしい観測に取り組む

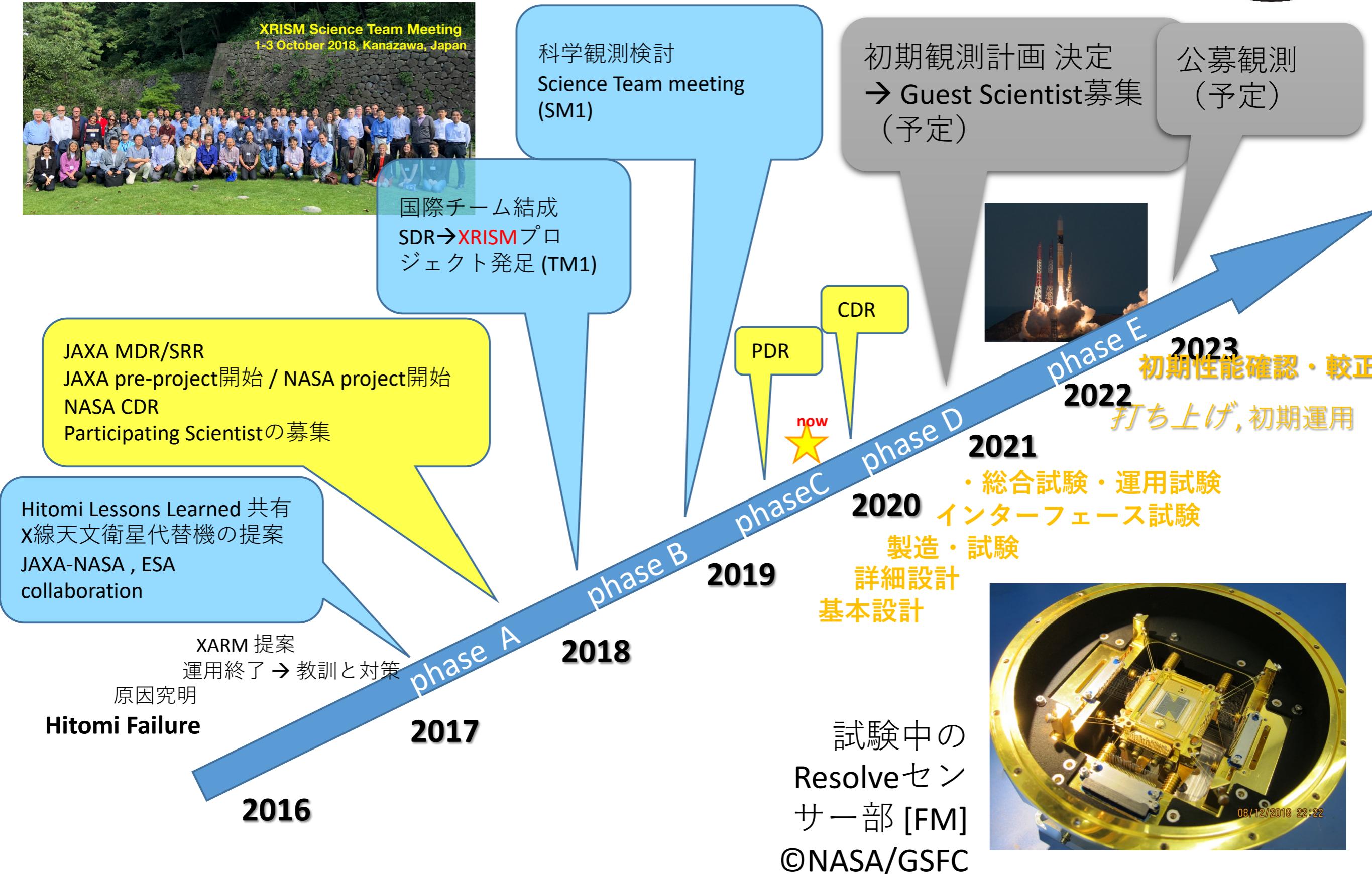


Hitomi collaboration, Nature, 2016



Hitomi collaboration, Nature, 2017

# 現状と今後



# 高エネルギー連が関係する計画

- XRISM (PI: 田代信也 @ 埼玉大)
- **Athena (Japan PI: 松本浩典 @ 大阪大)**
- FORCE (PI: 森浩二 @ 宮崎大)
- Hi-Z GUNDAM (光赤外分野との分野横断) (PI: 米徳大輔 @ 金沢大)
- PhoENiX (太陽分野との分野横断) (PI: 成影典之 @ 国立天文台)
- IXPE (Japan PI: 玉川徹 @ 理研)
- Super DIOS (PI: 佐藤浩介 @ 埼玉大)
- ...

# Athena とは

X線天文衛星: ESA 大型計画2号機に採択 (2014)

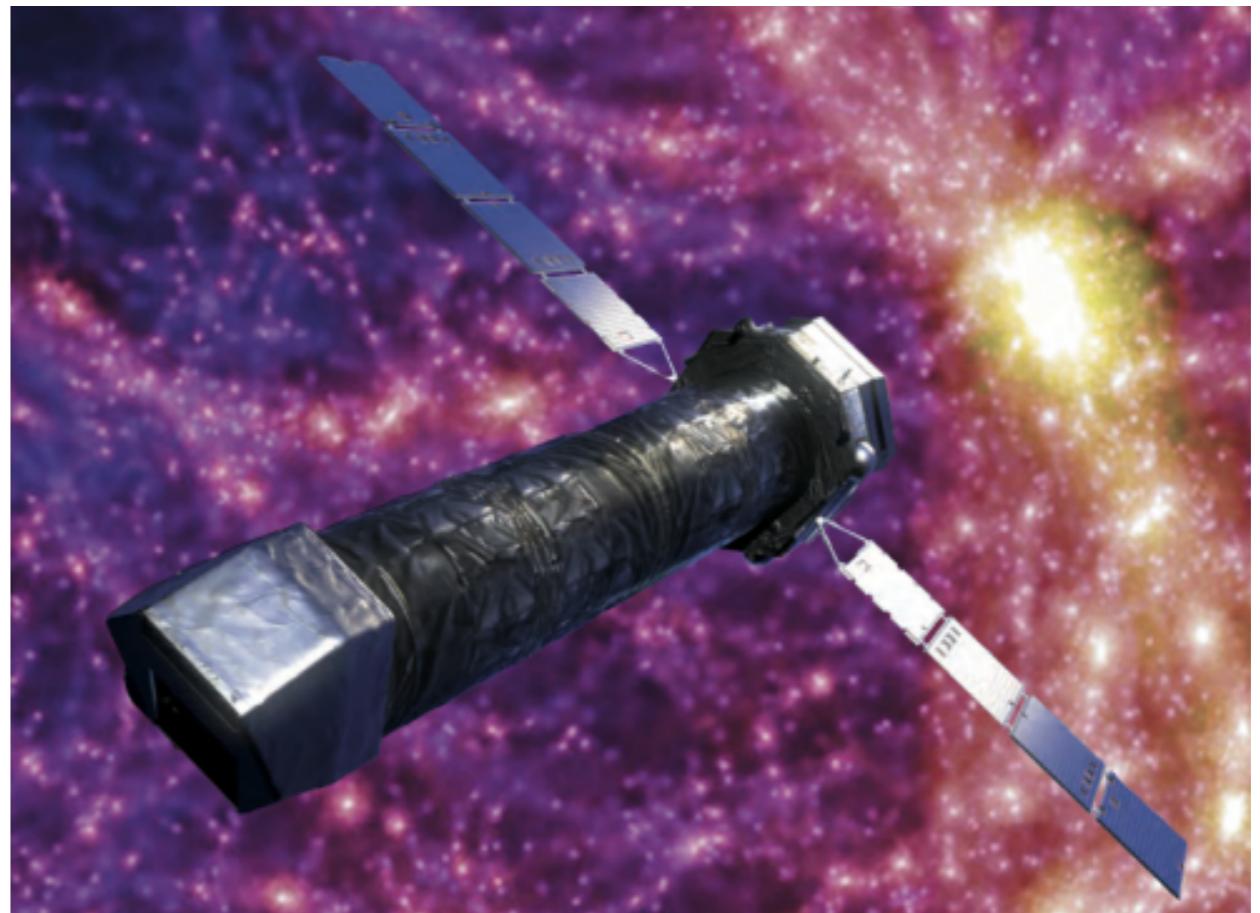
サイエンステーマ

“Hot Universe”: 物質の大規模構造への集積過程

“Energetic Universe”: BH 成長と構造形成への影響

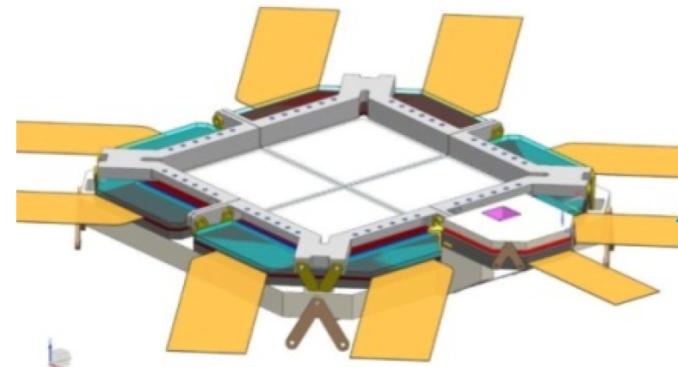
2030年代  
初頭打上げ

開発  
欧州主導+日米



# 搭載装置

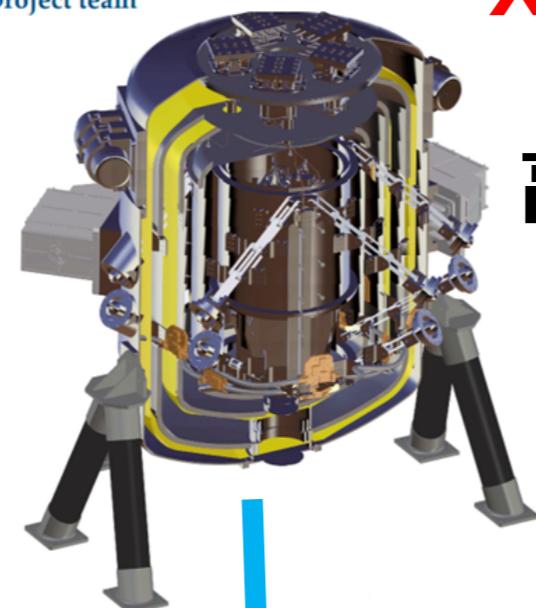
CNES project team



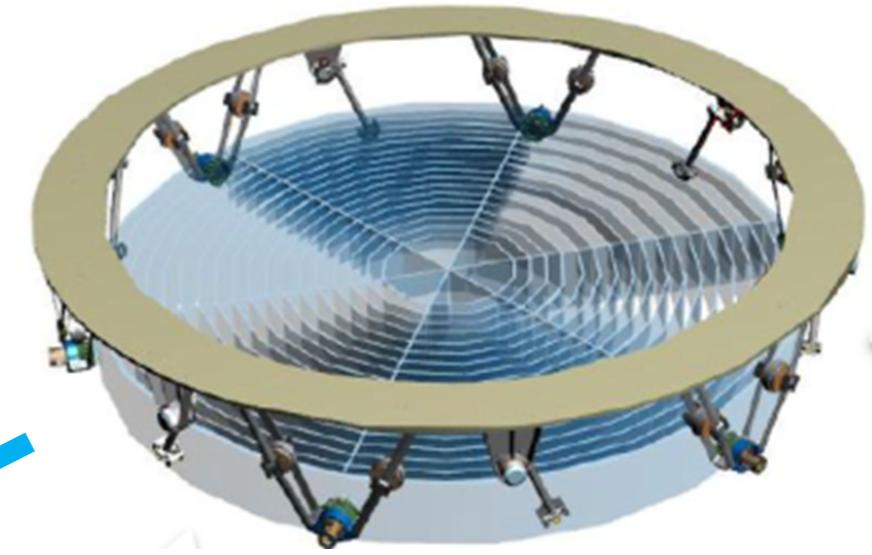
DEPFET X線撮像器  
(WFI)

広視野 (40分角)

2019/9/24



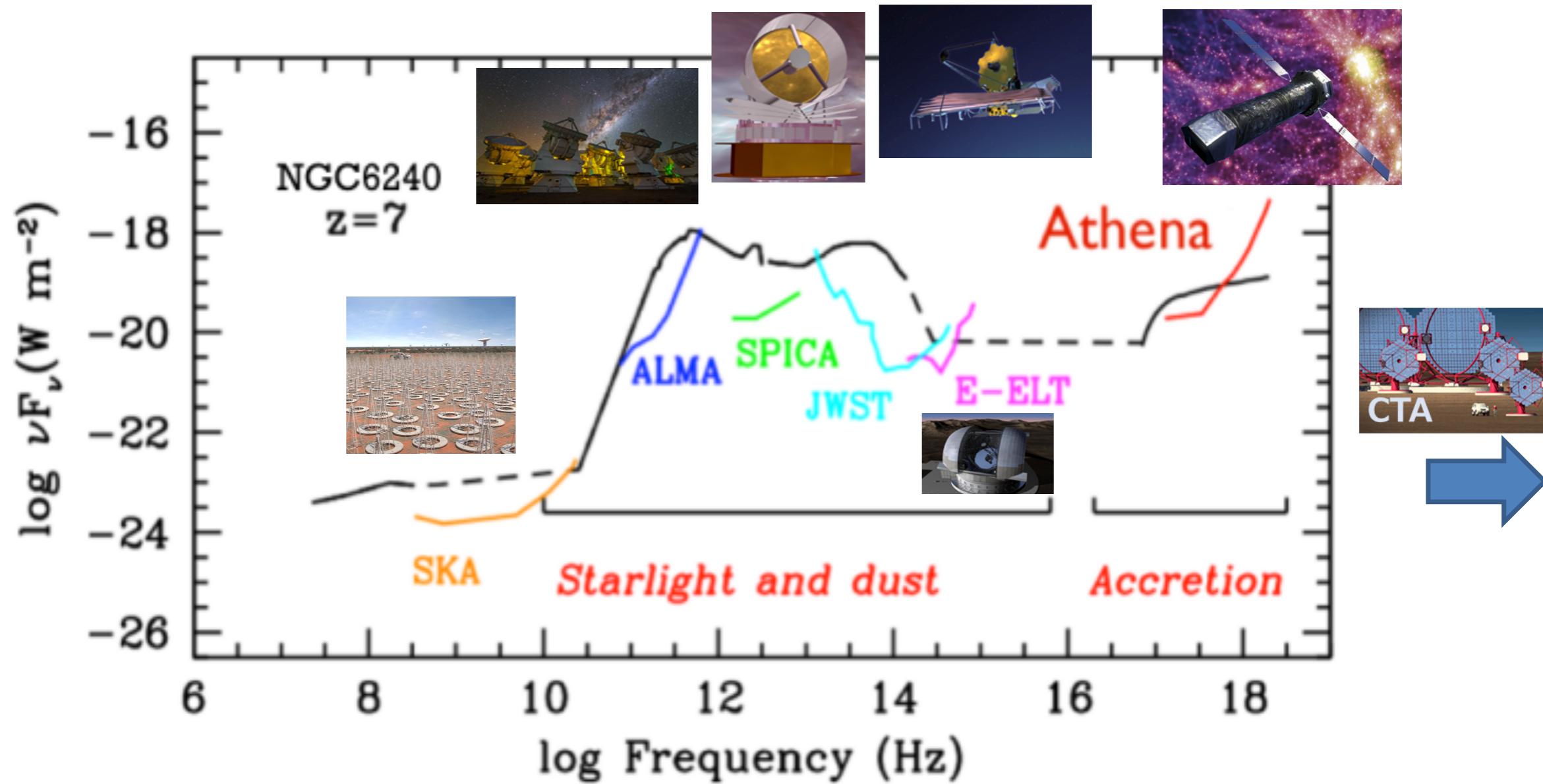
X線マイクロカロリメーター  
(X-IFU)  
高精度光子エネルギー測定  
( $\Delta E = 2.5 \text{ eV}$ )



大型X線望遠鏡(SPO)  
大集光能力  
( $1.4\text{m}^2 @ 1\text{keV}$ )



# 2030年代：大型観測装置時代



国際的に唯一の大型X線天文台

# コミュニティでの位置づけ

## 高エネルギー宇宙物理連絡会

2014年3月高宇連討論会

「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(現XRISM)と、  
それに引き続くAthenaは、**高宇連の最優先課題**」

宇宙科学研究所 宇宙物理学委員会

2015年時の評価：科学的意義は大きい

# 日本の役割

科学成果の創出  
XRISMの成果を武器に。

ハードウェア開発  
X-IFU用冷却系の開発  
望遠鏡開発  
その他(地上局?)

# 進捗

## Athena 全体

現在Phase A (~2019末)

Instrument Preliminary Requirements Review を経て、  
X-IFUとWFIのconsortiumが誕生。

## 日本側

### 宇宙科学研究所 Athena WG 状況

9月に、WG→所内検討チームへと移行の予定。

### 学術会議 「マスタープラン2020」

大型計画として応募中

### 冷凍機開発

ジュールトムソン冷凍機の開発。ただしつい最近、ESAより、JTからクラ  
イオスターへの変更の打診。現在検討中。

### 望遠鏡開発

Overcoating の可能性。Stray-light baffle。SP8での測定などを検討中。

# 高エネルギー連が関係する計画

- XRISM (PI: 田代信也 @ 埼玉大)
- Athena (Japan PI: 松本浩典 @ 大阪大)
- **FORCE (PI: 森浩二 @ 宮崎大)**
- Hi-Z GUNDAM (光赤外分野との分野横断) (PI: 米徳大輔 @ 金沢大)
- PhoENiX (太陽分野との分野横断) (PI: 成影典之 @ 国立天文台)
- IXPE (Japan PI: 玉川徹 @ 理研)
- Super DIOS (PI: 佐藤浩介 @ 埼玉大)
- ...

# FORCE 科学目的

© ESO/M. Kornmesser

埋もれた銀河中心巨大BH  
( $>10^4 M_{\text{sun}}$ )

© NASA

中間質量BH  
( $10^{2-4} M_{\text{sun}}$ )

© Ute Kraus

系内孤立BH  
( $<10^2 M_{\text{sun}}$ )

Big Bang

Afterglow  
light pattern

Recombination

Dark ages

© NASA

- 宇宙のあらゆる階層において未だ見つかっていない「ミッシングブラックホール」を探査し、それをプローブとして現在の宇宙を構成する天体の形成史を紐解くこと

# 科学目標と成功基準

- 科学目的から導かれる科学目標とその成功基準

表 1: 科学目的とそこから導かれる科学目標

上位となる科学目的	科学目標	
	フルサクセス	エクストラサクセス
巨大ブラックホールと 銀河の共進化の解明	1) 埋もれた AGN の光度関数を決 定し、AGN のダウンサイ징 進化の有無を明らかにすること	
中間質量ブラックホー ルの探査		2) 超高光度X線天体 (ULX) の正 体を明らかにすること
銀河系内ミッシングブ ラックホールの探査		3) 硬X線において、銀河中心付近 に存在する $L_X = 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ の点 源を捉えること

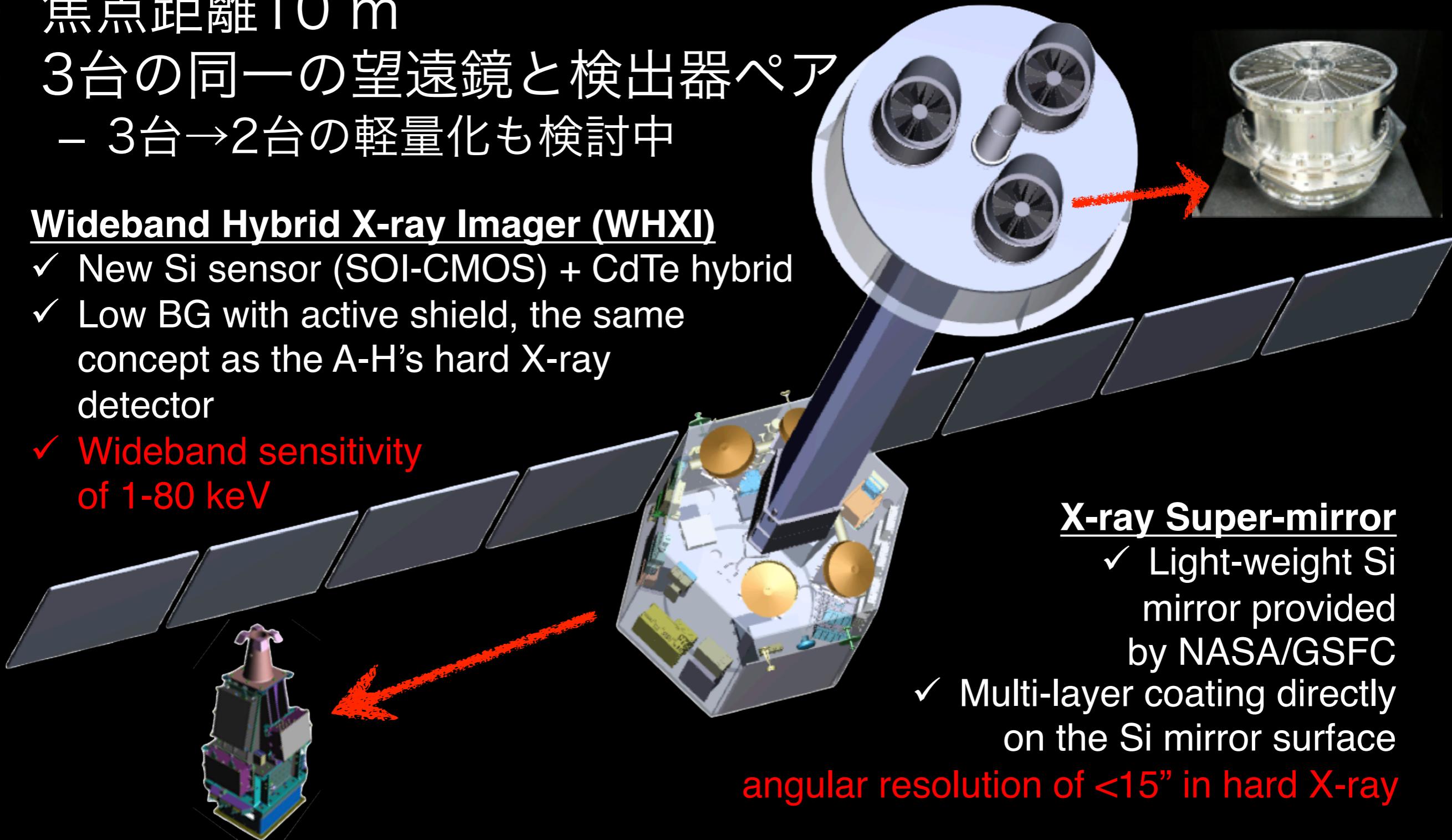
- 上記の mission science とは別に、FORCE の特性を活かした observatory science (超新星・超新星残骸からの非熱的放射の検出、銀河団の超高温ガスの探査など) の観測もおこなう

# 衛星の概要

- 焦点距離10 m
- 3台の同一の望遠鏡と検出器ペア
  - 3台→2台の軽量化も検討中

## Wideband Hybrid X-ray Imager (WHXI)

- ✓ New Si sensor (SOI-CMOS) + CdTe hybrid
- ✓ Low BG with active shield, the same concept as the A-H's hard X-ray detector
- ✓ Wideband sensitivity of 1-80 keV

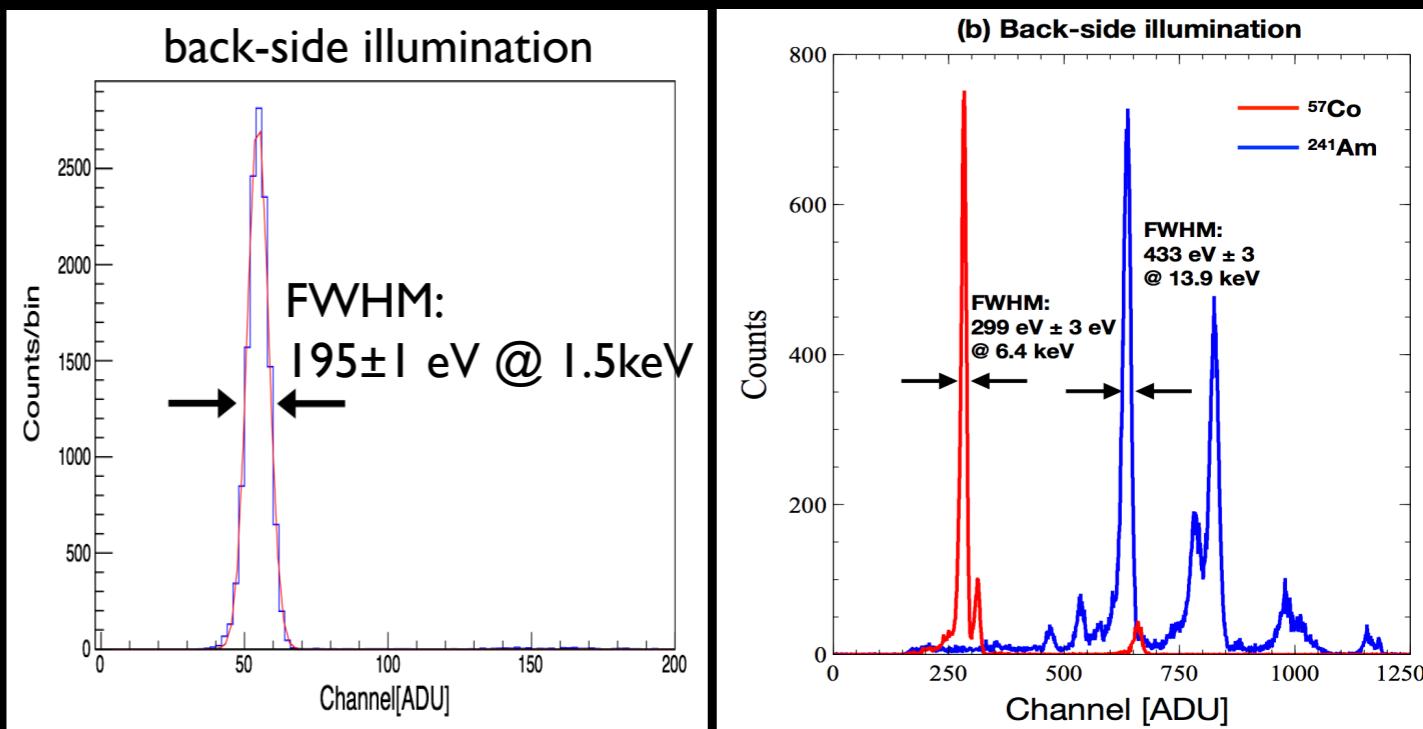


## X-ray Super-mirror

- ✓ Light-weight Si mirror provided by NASA/GSFC
- ✓ Multi-layer coating directly on the Si mirror surface
- angular resolution of <15" in hard X-ray

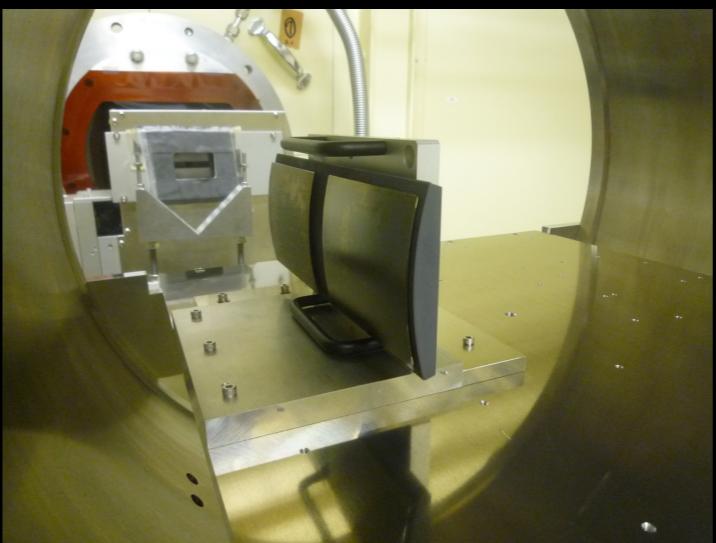
# 搭載機器開発の進捗

- 広帯域 X 線検出器
  - Si 検出部である SOI-CMOS が新規開発
  - 最大の難関であったイベント駆動モードでのエネルギー分解能で、要求性能達成の目処を得た
  - 低エネルギー側の感度の向上、フライトに向けたADC内蔵素子開発、読み出しシステムの検討が今後の重要課題

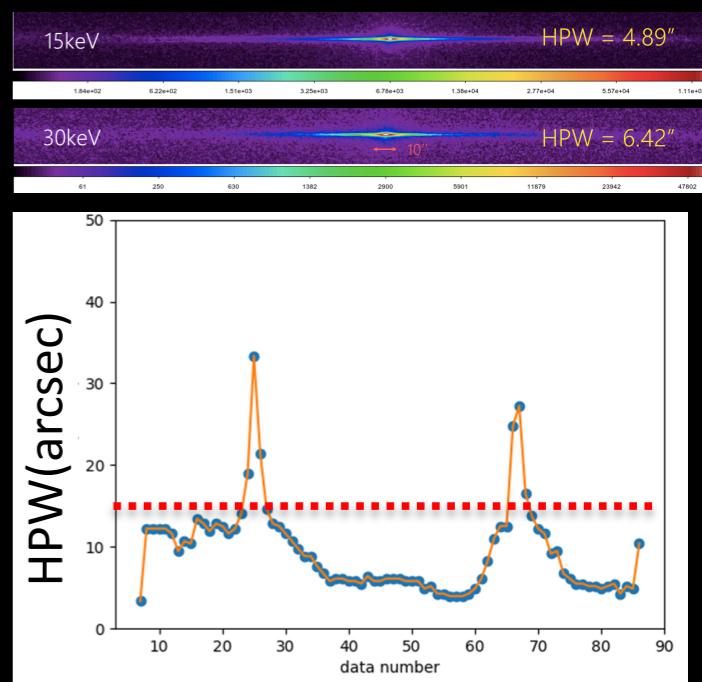


XRPIX6E, 裏面照射, -60°C, イベント駆動,  
single pix event, 48×48pixel, ゲイン補正なし, STORE OFF~10 us

- X 線スーパーミラー
  - NASA/GSFC で製作した2回反射1ペアモジュールの角度分解能を SPring-8 で実測(左図)
  - モジュールのどの位置でも、HPDが15秒角以下であることを見証。特に中央部では6秒角を達成していた(左図)



SPring-8 measurement at 30 keV

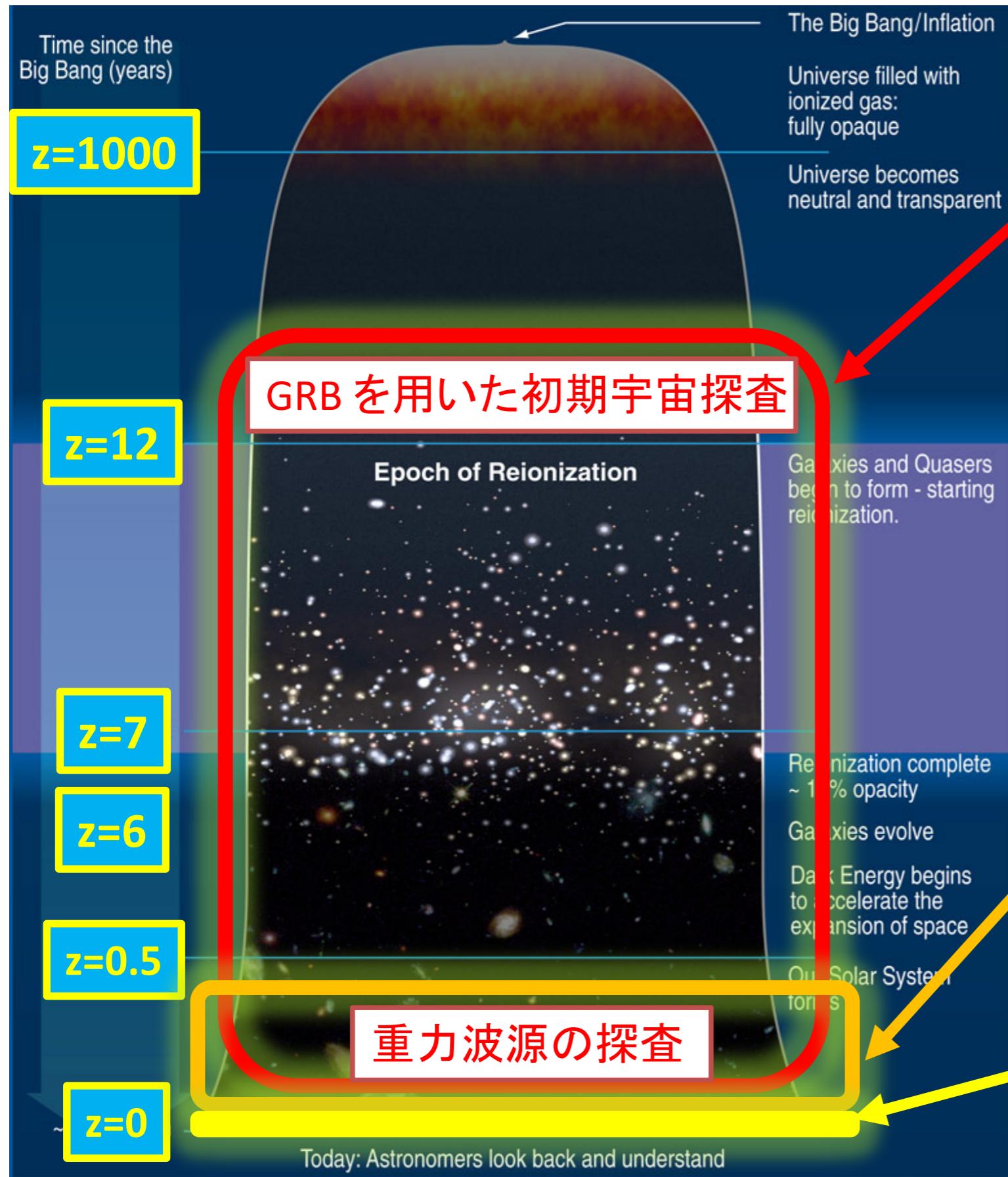


X-ray image measured (top),  
Half Power Width of various position at 30 keV (bottom)

# 高エネルギー連が関係する計画

- XRISM (PI: 田代信也 @ 埼玉大)
- Athena (Japan PI: 松本浩典 @ 大阪大)
- FORCE (PI: 森浩二 @ 宮崎大)
- Hi-Z GUNDAM (光赤外分野との分野横断) (PI: 米徳大輔 @ 金沢大)
- PhoENiX (太陽分野との分野横断) (PI: 成影典之 @ 国立天文台)
- IXPE (Japan PI: 玉川徹 @ 理研)
- Super DIOS (PI: 佐藤浩介 @ 埼玉大)
- ...

# Time Domain Astronomy (時間領域天文学)

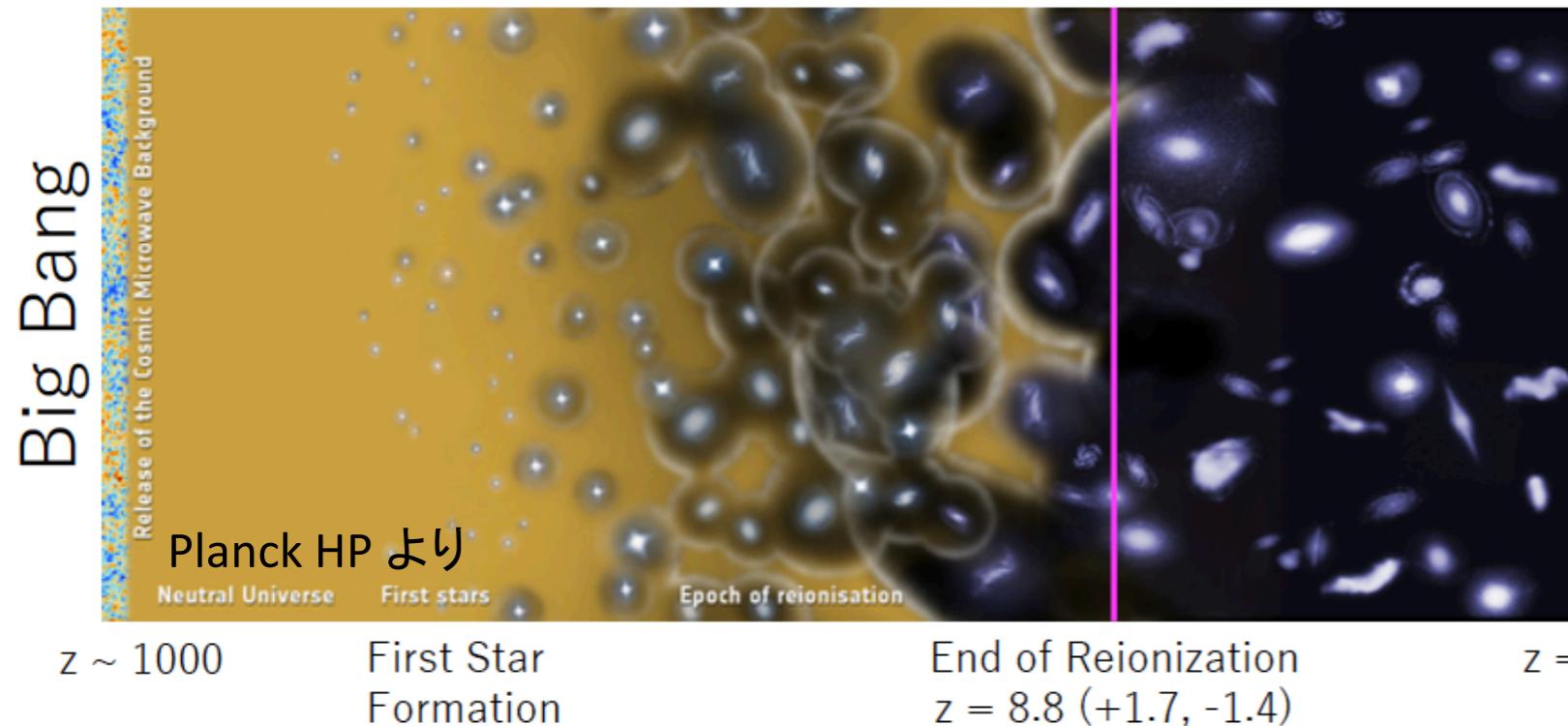


- ・ガンマ線バースト(GRB)  
初代星 (Pop-III)  
宇宙再電離  
重元素合成
- ・重力波 (Short GRB?)  
NS-NS, NS-BH, BH-BH  
macronova/r-process
- ・TeV/PeV ニュートリノ  
LLGRB/Hypernova
- ・SN Shock Breakout
- ・Tidal Disruption
- ・Fast Radio Burst
- ・AGN
- etc.
- ・恒星スーパーフレア
- ・銀河系内突発天体

# HiZ-GUNDAM計画:科学到達目標とミッションへの要求

## Key Science 1: GRB による初期宇宙探査

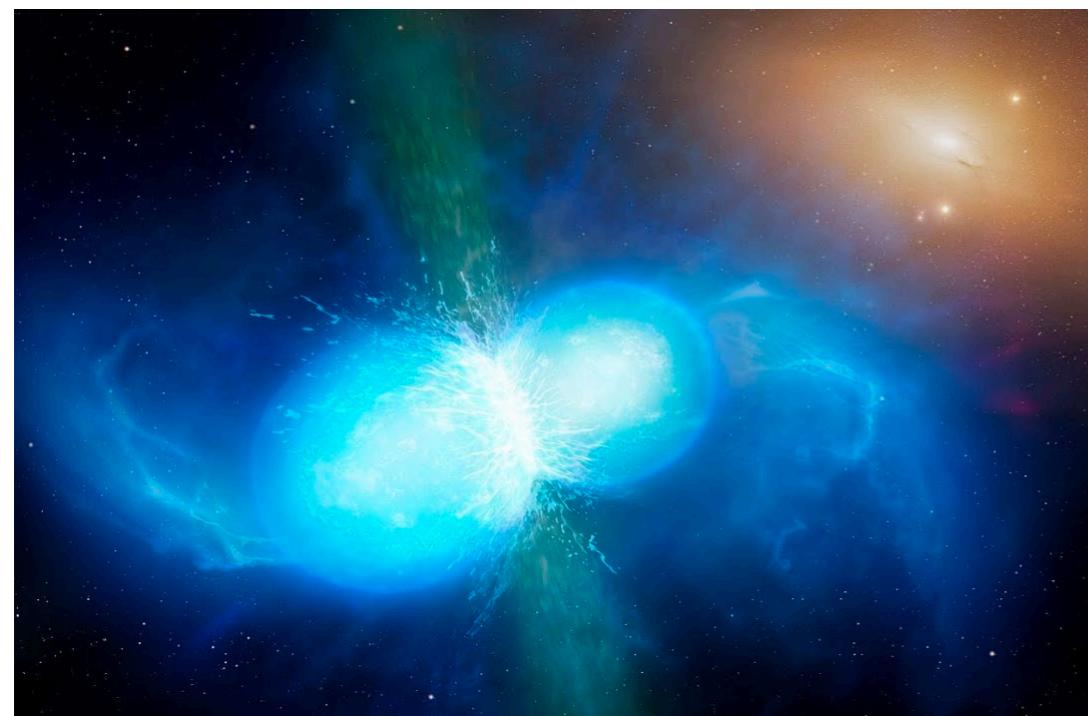
高宇連+光赤天連の分野横断型



High-z GRBの迅速な特定と  
大型望遠鏡による分光観測

- (1) 赤方偏移  $z > 7$  の GRB 発生率
- (2) 宇宙再電離時期の特定と  
その変遷の理解
- (3) 宇宙最初期の重元素探査
- (4) 初代星を起源とする GRB 探査

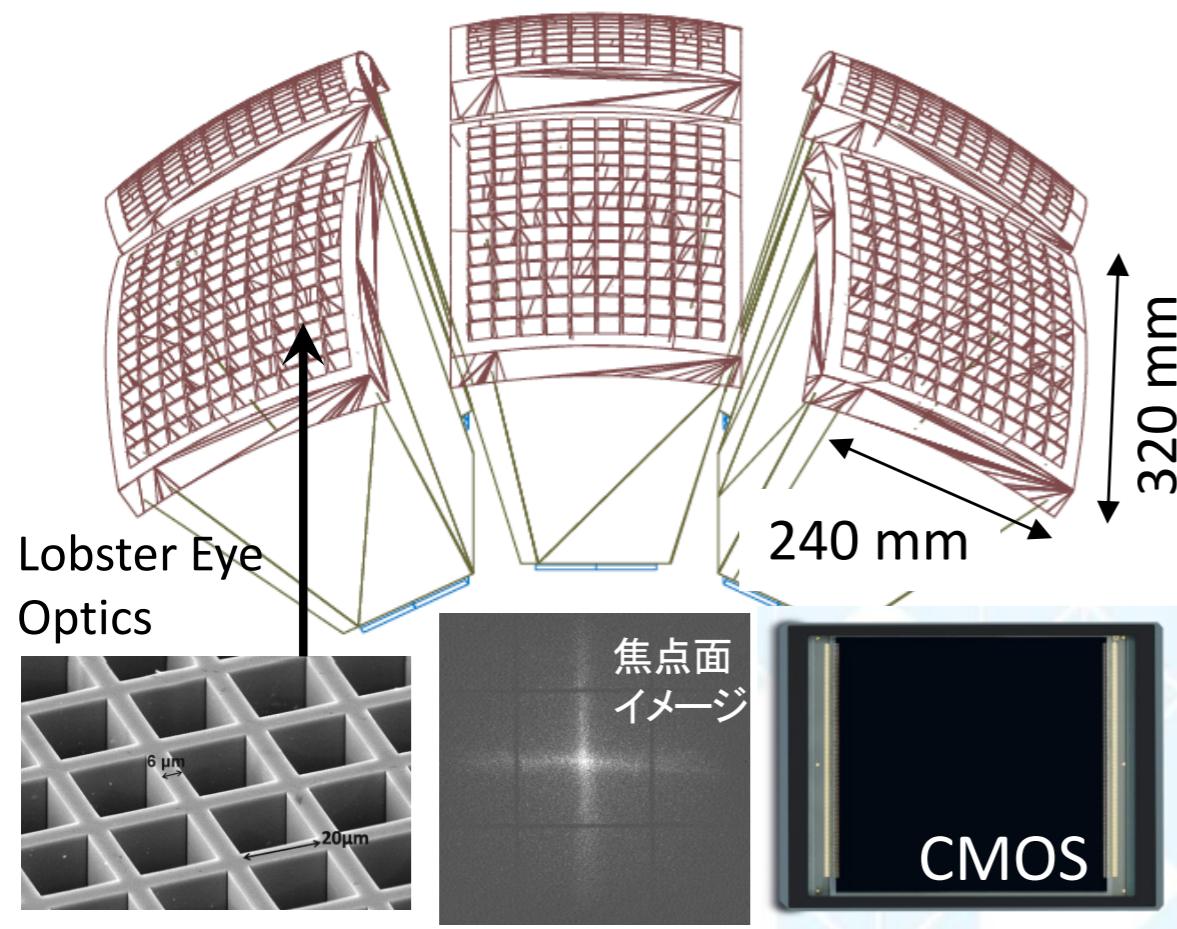
## Key Science 2: 重力波と同期したX線突発天体の観測による極限時空の理解



- (1) 重力波と同期したX線突発天体/SGRB の発見
- (2) 相対論的ジェットの存在の検証
- (3) 早期の可視光／近赤外線観測による  
エネルギーの変遷の解明  
(ジェット→コクーン→マクロノヴァ)
- (4) マクロノヴァの多様性の検証

いずれもX線によるGRB/SGRB の発見と  
迅速な近赤外線追観測が重要

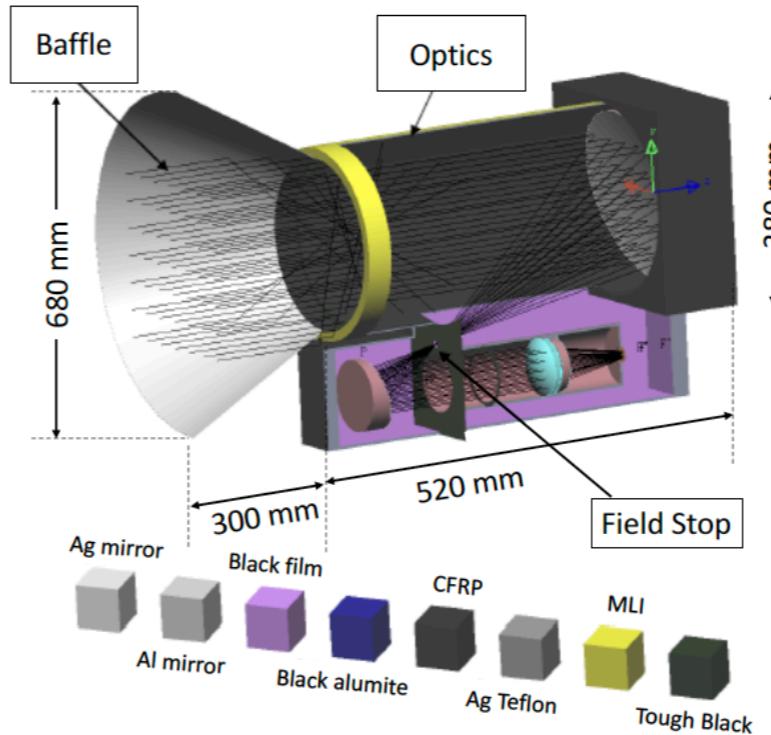
# 広視野X線モニター



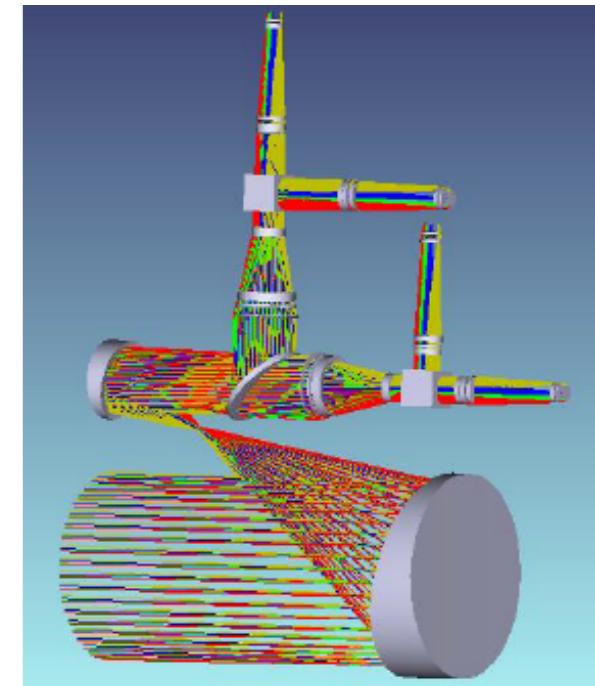
Items	Parameters
Energy band (keV)	0.4 – 4 keV
Telescope type:	Lobster Eye Optics
Optics aperture	240 x 320 mm <sup>2</sup>
Number of Unit	6
Field of View	~ 1.2 str (6 units)
Focal length	300 mm
Focal plane detectors	CMOS array
Number of CMOS	24 (4 CMOS x 6 units)
Sensitivity	1e-10 (erg/cm <sup>2</sup> /s) For 100 sec
Point Spread Function	3 arcmin
Angular accuracy	~ 60 arcsec

# 近赤外線望遠鏡

KASIとの共同開発



4バンド同時測光



Items	Parameters			
Telescope type	Offset Gregorian			
Aperture size	30 cm			
Focal length	183.5 cm			
F number	F6.1			
Field of view	34 arcmin × 34 arcmin			
FoV per pixel	2 arcsec × 2 arcsec			
Image size	3 pixel × 3 pixel			
Integration time	10 minutes (2 minutes × 5 frames)			
Observation Band (μm)	0.5–0.9	0.9–1.5	1.5–2.0	2.0–2.5
Band width	0.4 μm	0.6 μm	0.5 μm	0.5 μm
Limiting Magnitude mag (AB)	21.4	21.3	20.9	20.7
Focal detector	HyViSi	HgCdTe	HgCdTe	HgCdTe

(1) X線による突発天体 (GRB /SGRBなど) の検出

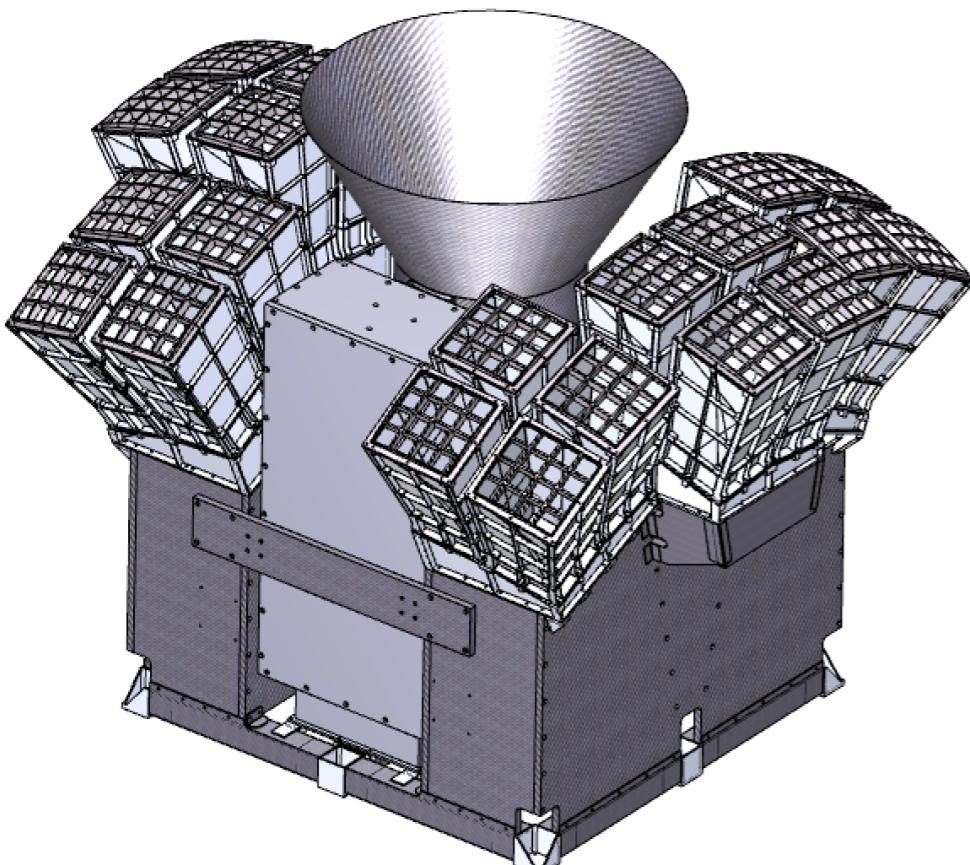
(2) 自律制御で姿勢変更を行い、約300秒後から

可視光・近赤外線望遠鏡で残光・マクロノヴァを追観測

(3) 「詳細な方向」「測光赤方偏移」「明るさ」を1時間以内にアラート

(4) GRB発生から 1.5 時間以内に大型望遠鏡による詳細な分光観測

TAO, すばる, VLT, Keck, Gemini, JWST, E-ELT, GMT, TMT, etc.



ミッション部構造

ミッションペイロード包絡域  
及び質量重心特性等を満足

ミッション機器:

広視野X線モニター: 136.3 kg (6 units + 支持構造)

近赤外線望遠鏡 : 35.6 kg

その他構造 : 18.1 kg

衛星バス : 約 250 kg Total: 約 440 kg

HiZ-GUNDAM	
打ち上げスケジュール	2026 – (公募型小型4号機)
衛星軌道	太陽同期極軌道 (twilight)
姿勢変更速度	1 deg/sec
衛星質量	約 440 kg
ミッション期間	> 3 years
アラート送信方式	イリジウム SBD, VHF (SVOM地上局)

# 高エネルギー連が関係する計画

- XRISM (PI: 田代信也 @ 埼玉大)
- Athena (Japan PI: 松本浩典 @ 大阪大)
- FORCE (PI: 森浩二 @ 宮崎大)
- Hi-Z GUNDAM (光赤外分野との分野横断) (PI: 米徳大輔 @ 金沢大)
- PhoENiX (太陽分野との分野横断) (PI: 成影典之 @ 国立天文台)
- IXPE (Japan PI: 玉川徹 @ 理研)
- Super DIOS (PI: 佐藤浩介 @ 埼玉大)
- ...

**粒子加速** 高エネルギー粒子（加速された粒子）は宇宙の至る場所で発見されているが、「高エネルギー粒子の起源は何か？」という問題は宇宙科学における未解決の難問である。一方、磁気リコネクションは加速環境（電場、衝撃波、乱流など）を生み出しやすく、実際、地球磁気圏、太陽フレアなどにおいて、リコネクションに伴う加速電子が観測されている。しかし、その加速過程は未解明であり、今後の研究の進展が待たれている。



# PhoENiX

<https://www.phoenix-project.science/>

(Physics of Energetic and Non-thermal Plasmas in the X-region)

## Science Goal (本ミッションの前提となる大目標)

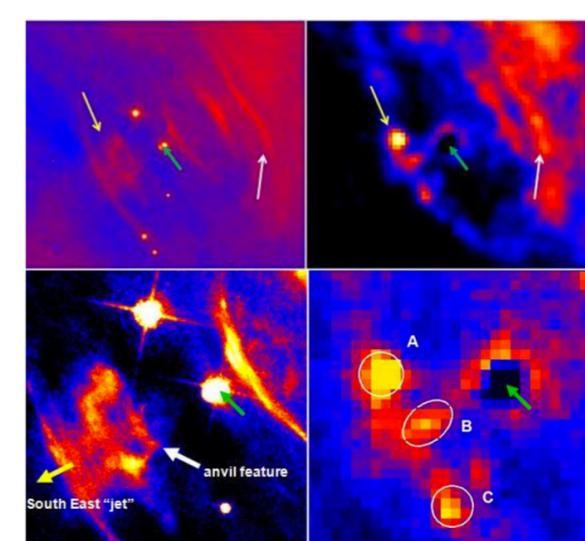
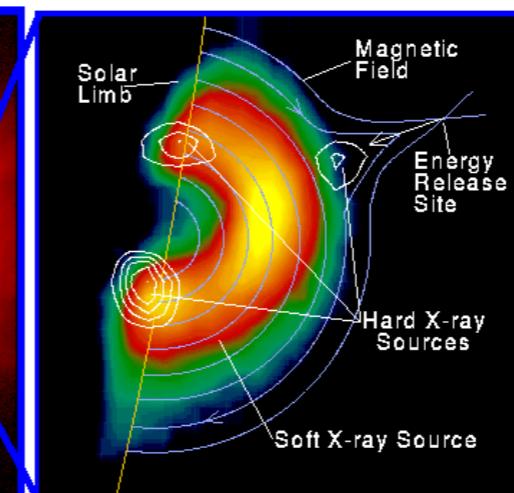
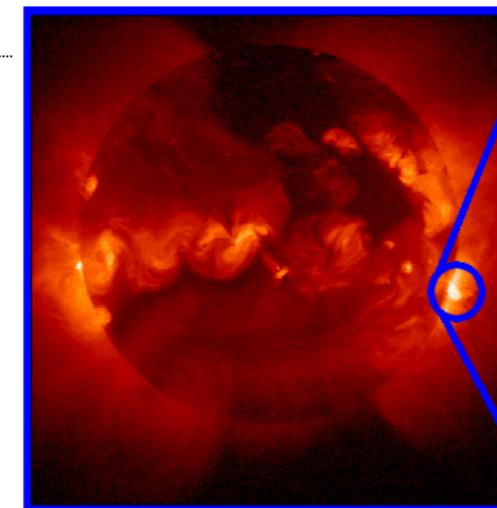
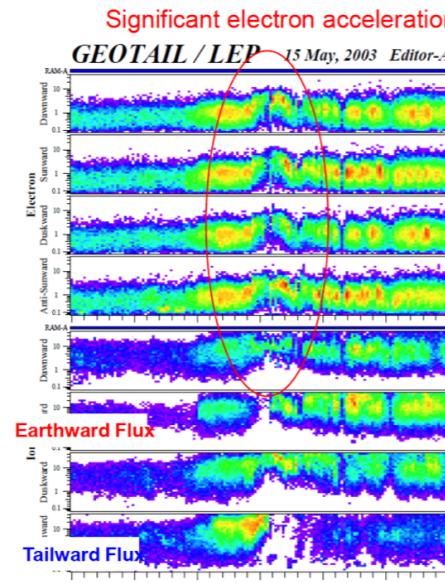
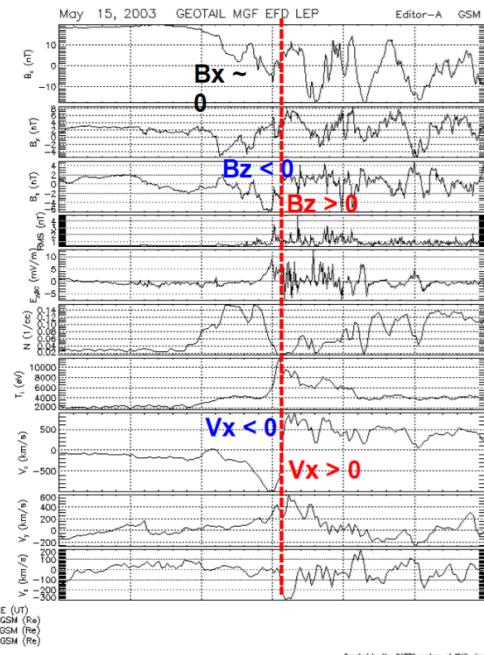
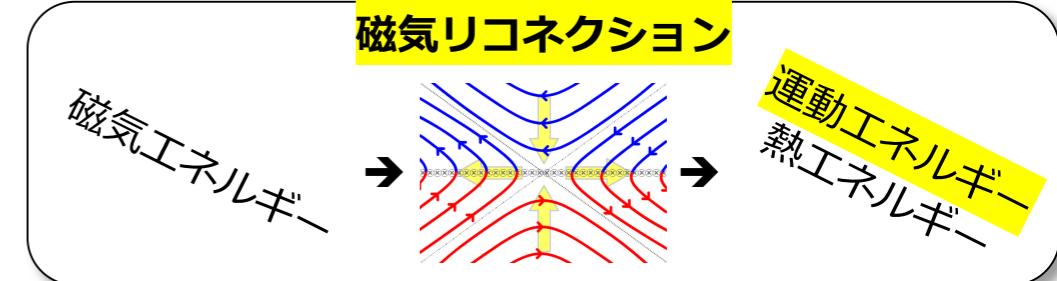
磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解

## Science Objectives (本ミッションの科学目的)

太陽フレアを対象に、磁気リコネクション中の加速場所を絞り込む [where]

太陽フレアを対象に、磁気リコネクション中の加速粒子の時間発展の調査 [when]

太陽フレアを対象に、磁気リコネクション中の加速粒子の特徴の把握 [how]



地球磁気圏 X-line での加速電子

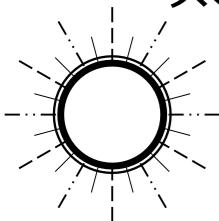
太陽フレア

かに星雲のガンマ線フレア



# 科学目標達成のための観測手法：

太陽フレアに対する X線・集光撮像分光観測 + 軟ガンマ線・偏光分光観測



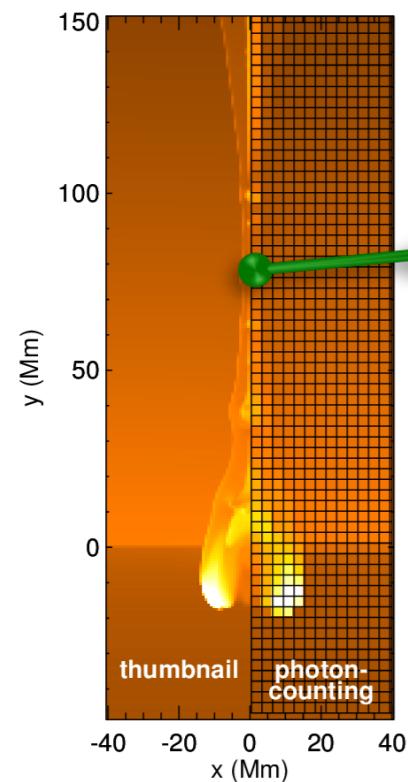
## PhoENiXの科学目的

① 粒子加速場所の特定

② 加速の時間発展の調査

③ 加速の特徴の把握

### PhoENiXの観測

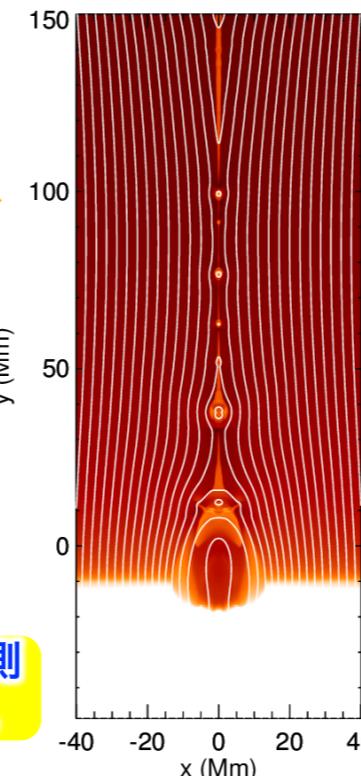


X線撮像分光観測  
熱的成分    非熱的成分

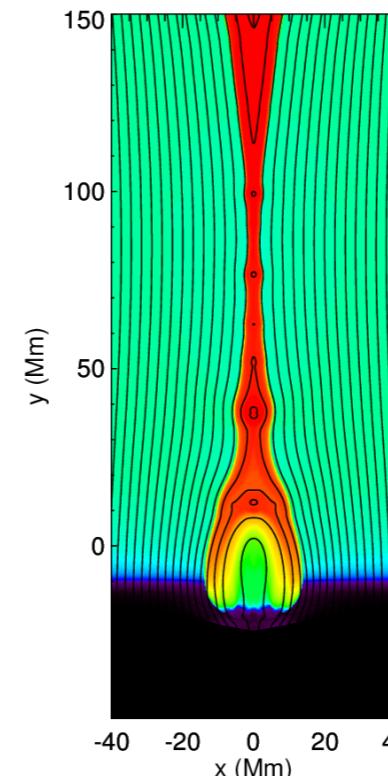
いくつかのキー技術は  
観測口ケット実験FOXSI、  
「ひとみ」衛星で実証済

**FOXSI 4回目の飛翔でフレア観測  
を計画中。11月にNASAに提案。**

加速に関連する  
物理量の導出

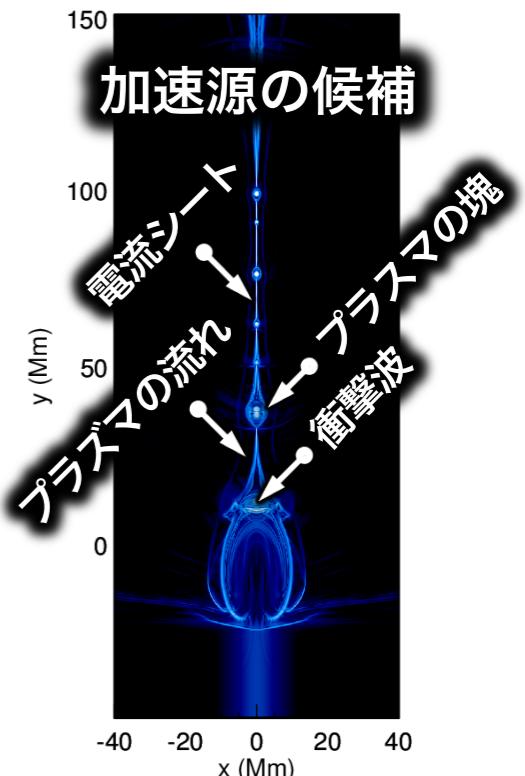


密度分布  
と時間変化



偏光情報の時間変化

温度分布  
と時間変化



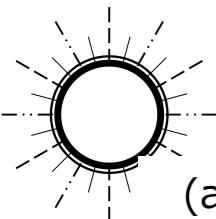
軟ガンマ線  
偏光分光観測



# 観測ロケット実験 FOXSI-3 (2018年9月7日打ち上げ) によって、 太陽 軟X線2次元集光撮像分光観測 に世界で初めて成功！！

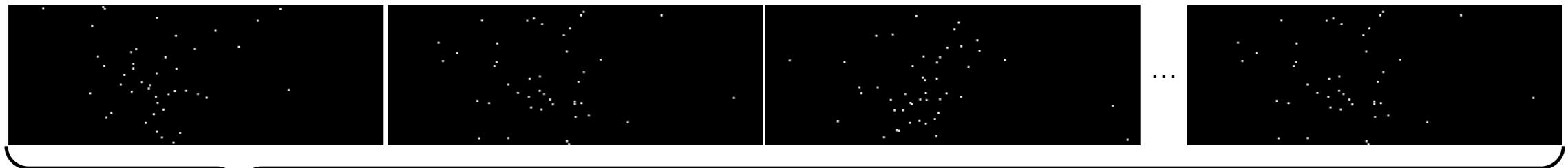


→ PhoENiX では、同じ方法で太陽フレアを観測する。

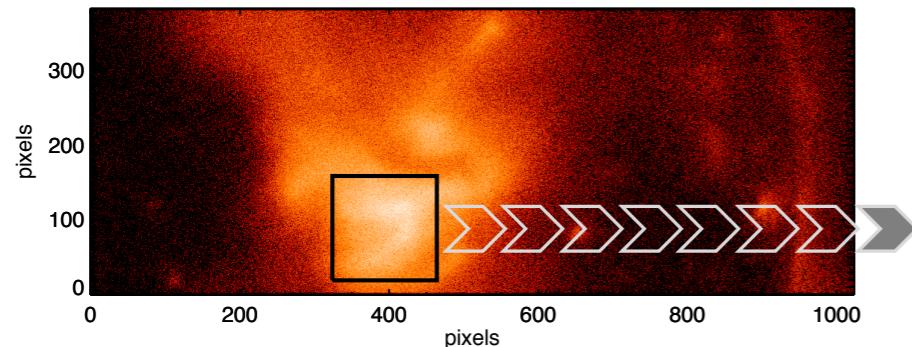


(a) 取得したデータ

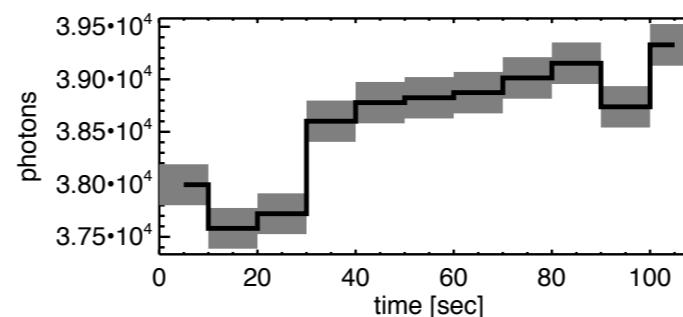
時間の流れ (1秒間に250枚の高速連続撮像)



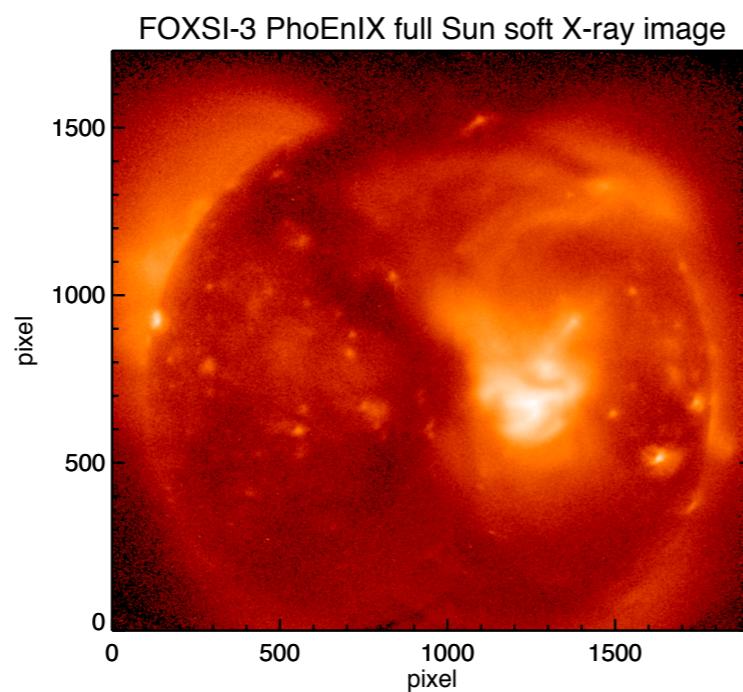
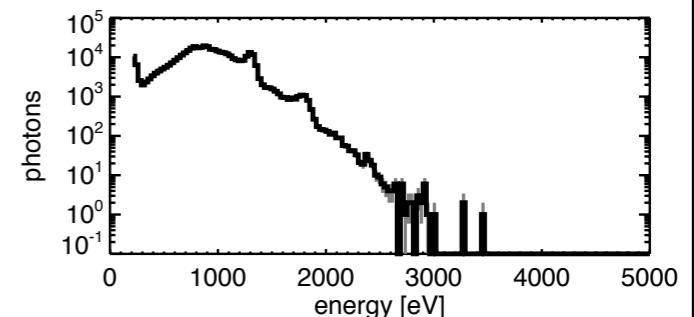
(b) X線光子を集めて作った太陽の画像



(c) 活動領域のX線光子数の時間変化



(d) 活動領域のX線スペクトル

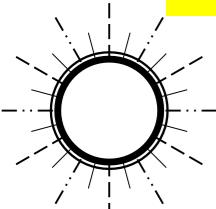


- X線光子1個1個の位置・時間・エネルギー情報を取得しており、様々な解析が行える（上図）。
- FOXSI-3の観測時間は、約6分間であるが、その間に太陽全面からのX線光子を約1千万個計測した（左図）。

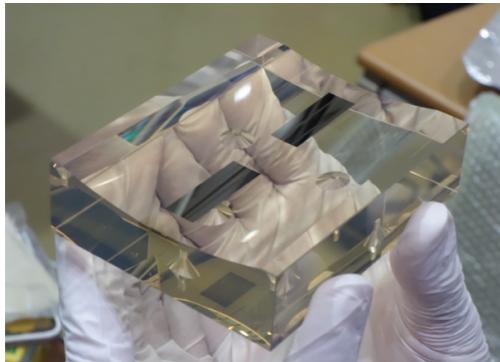


# 各観測装置のキー技術

基礎開発は完了しており、現在、衛星搭載に向けた開発を進めている。



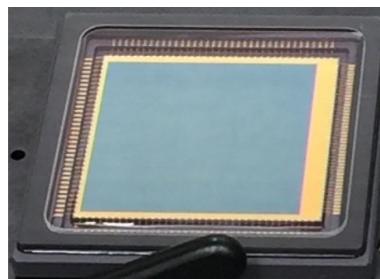
## 軟X線撮像分光装置 (0.5 keV ~ 10 keV)      硬X線撮像分光装置 (5 keV ~ 30 keV)



### 高精度X線斜入射ミラー

空間分解能 : < 1 秒角 (ミラー単体)

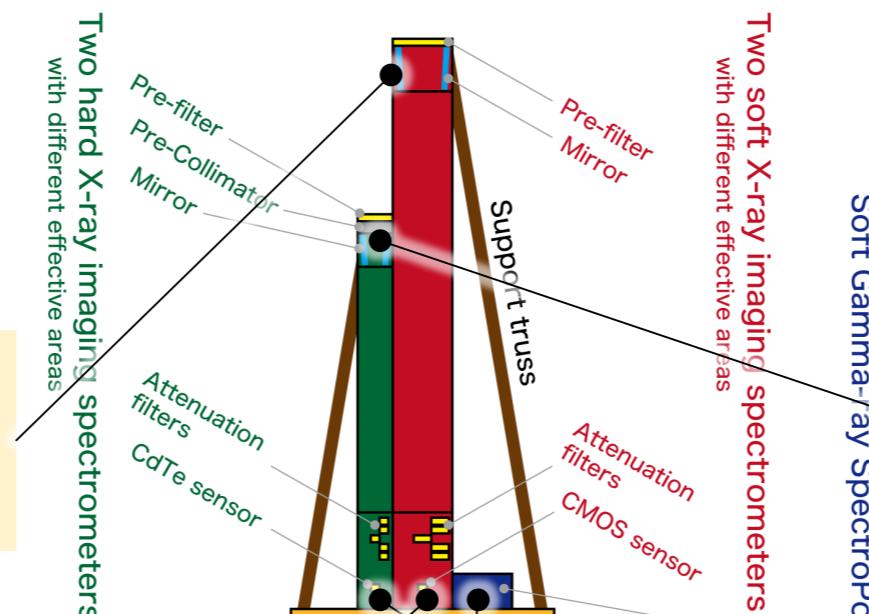
低散乱 :  $10^4$  @ 20 arcsec



### 高速度・軟X線カメラ

裏面照射型CMOSセンサーを使用

(観測口ケット実験 FOXSI-3 で技術実証)



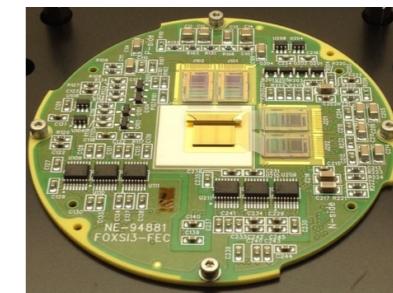
## 硬X線撮像分光装置



### 高感度X線斜入射ミラー

空間分解能 : ~ 8 秒角 (FWHM)

(観測口ケット実験 FOXSI の技術を活用)



### 高感度・硬X線カメラ

ファインピッチ CdTe 検出器を使用

(観測口ケット実験 FOXSI の技術を活用)

## 軟γ線偏光分光装置 (20 keV ~ 600 keV)

### Si/CdTe コンプトンカメラ

偏光測定 : > 60 keV

(ひとみ衛星搭載の SGD の技術を活用)



# 高エネルギー連が関係する計画

- XRISM (PI: 田代信也 @ 埼玉大)
- Athena (Japan PI: 松本浩典 @ 大阪大)
- FORCE (PI: 森浩二 @ 宮崎大)
- Hi-Z GUNDAM (光赤外分野との分野横断) (PI: 米徳大輔 @ 金沢大)
- PhoENiX (太陽分野との分野横断) (PI: 成影典之 @ 国立天文台)
- IXPE (Japan PI: 玉川徹 @ 理研)
- Super DIOS (PI: 佐藤浩介 @ 埼玉大)
- ...

# IXPE衛星国際共同チーム



Marshall Space Flight Center

PI team, project management,  
SE and S&MA oversight, mirror  
module fabrication, X-ray  
calibration, science operations,  
and data analysis and archiving



Detector system  
funding, ground station



Spacecraft, payload  
structure, payload,  
observatory I&T



**INAF**  
ISTITUTO NAZIONALE  
DI ASTROFISICA  
NATIONAL INSTITUTE  
FOR ASTROPHYSICS



Polarization-sensitive  
imaging detector systems



Mission operations



ROMA  
TRE  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI

Stanford  
University

Scientific theory



McGill

Co-Investigator



Massachusetts  
Institute of  
Technology

Co-Investigator



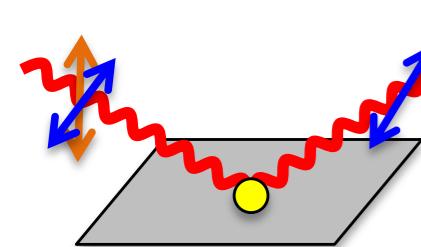
Science Advisory Team

PI: Martin Weisskopf (NASA Marshall Space Flight Center)

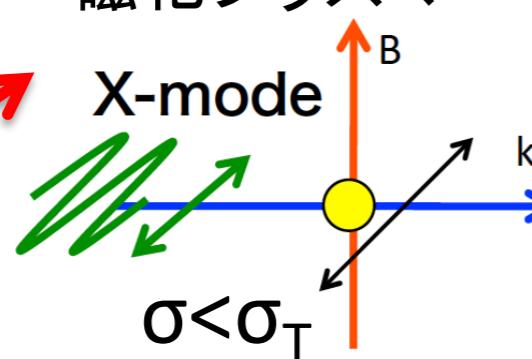
# X線偏光観測とその対象

X線偏光:新しい天体観測手段 (cf: 撮像、計時、分光)

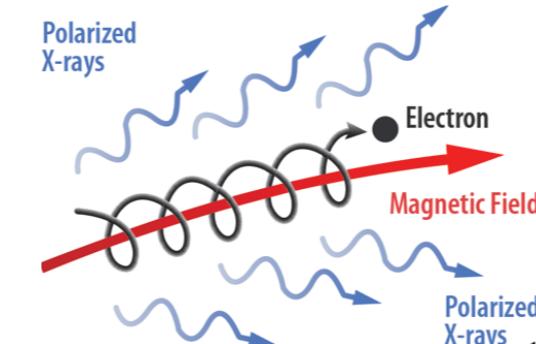
トムソン散乱



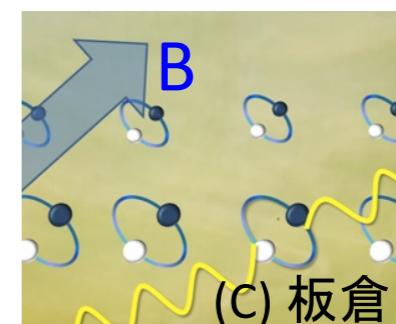
磁化プラズマ



シンクロトロン

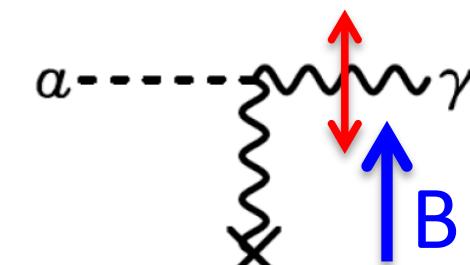


QED真空偏極



(C) 板倉

プリマコフ効果



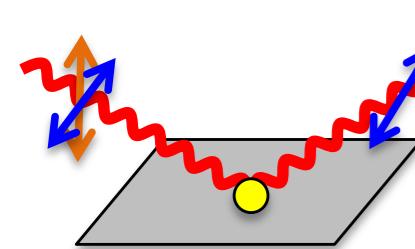
## 1. 撮像できない天体構造を見る

	トムソン 散乱	磁化 プラズマ	シンクロトロン	QED真空偏極	プリマコフ 効果
中性子星 (R~10km) のX線放射源	○	○	○	○	
ブラックホール降着円盤の構造	○				
ブラックホール周辺のコロナの構造	○				
2. X線放出、輸送プロセスを知る					
超新星残骸シェル (衝撃波粒子加速)				○	
マグネターの強磁場検証 (QED真空複屈折)	○	○		○	
ブラックホール近傍の空間歪み (一般相対論)	○				
ブラックホールからのジェット (粒子加速)				○	
Axion-like 粒子の探査 (基礎物理)					○

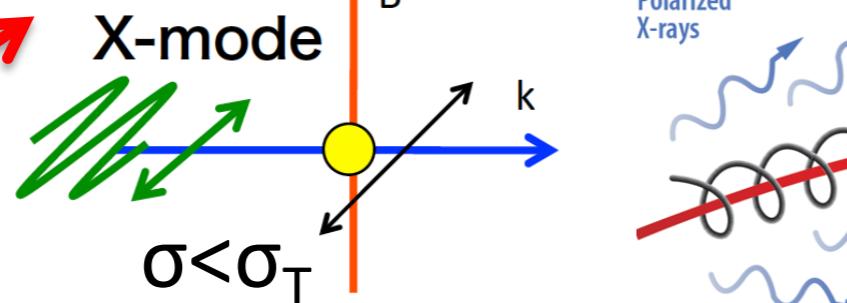
# X線偏光観測とその対象

X線偏光:新しい天体観測手段 (cf: 撮像)

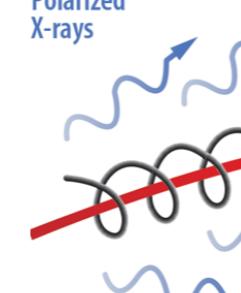
トムソン散乱



磁化プラズマ



シンクロ



## 1. 撮像できない天体構造を見る

中性子星 ( $R \sim 10\text{km}$ ) のX線放射源

ブラックホール降着円盤の構造

ブラックホール周辺のコロナの構造

## 2. X線放出、輸送プロセスを知る

超新星残骸シェル (衝撃波粒子加速)

マグネターの強磁場検証 (QED真空複屈折)

ブラックホール近傍の空間歪み (一般相対論)

ブラックホールからのジェット (粒子加速)

Axion-like 粒子の探査 (基礎物理)

## X線偏光観測の開拓



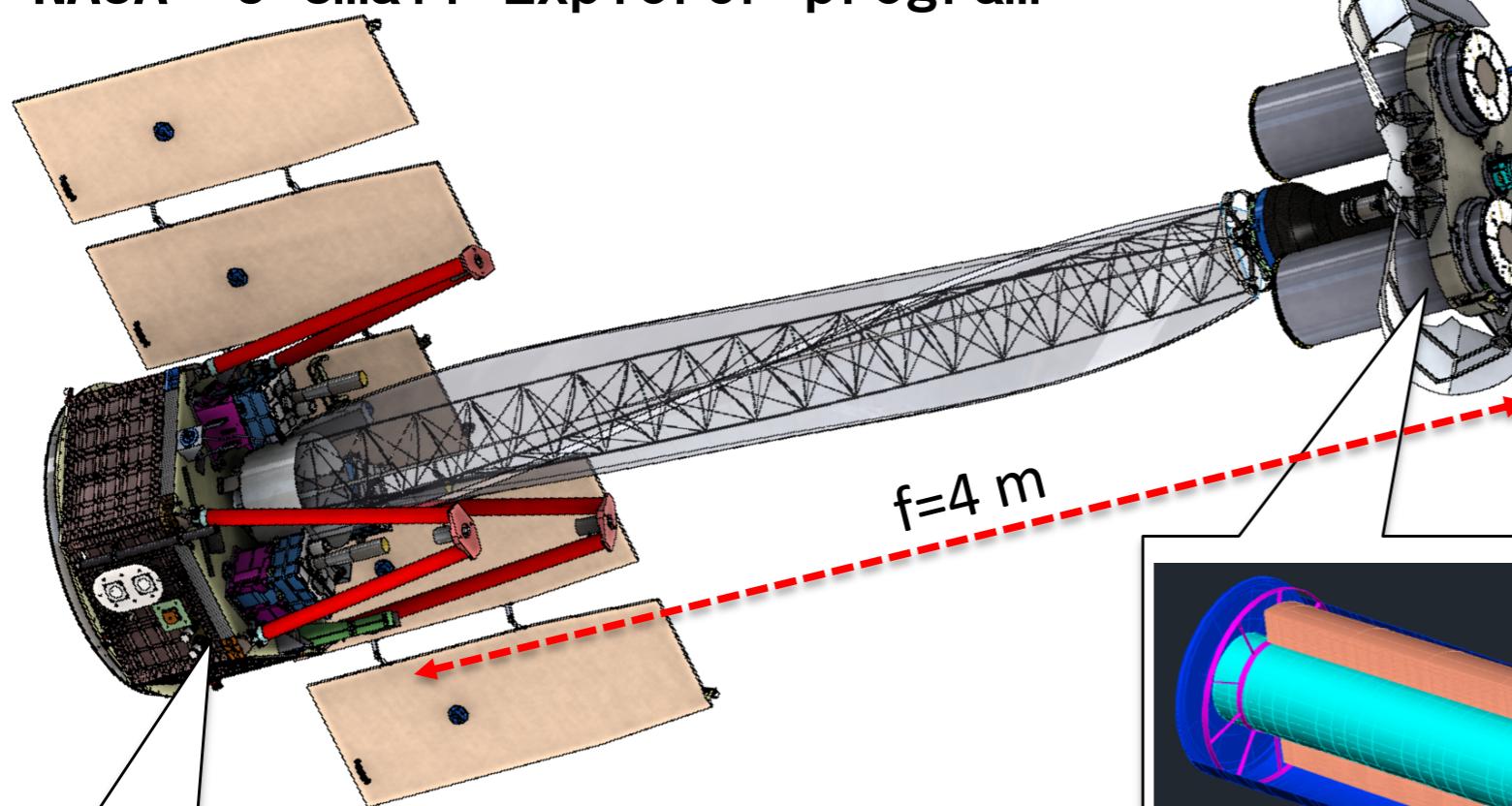
Bragg偏光計  
( $E=2.6$  &  $5.2\text{ keV}$ )  
Crab Nebula  
 $P \sim 20\%$   
(Weisskopf+1976)

- 観測の停滞 (~30年)
- ガンマ線偏光観測の活発化  
(PoGO+, X-Calibur, Hitomi/SGD等)
- 多くの天体は暗く、偏光度  $P < 10\%$
- 十分な数の天体を見るには、最小偏光検出(MDP)~1% 観測が重要
- 光子数が必須 (軟X線帯域を開拓)

# Imaging X-ray Polarimeter (IXPE)

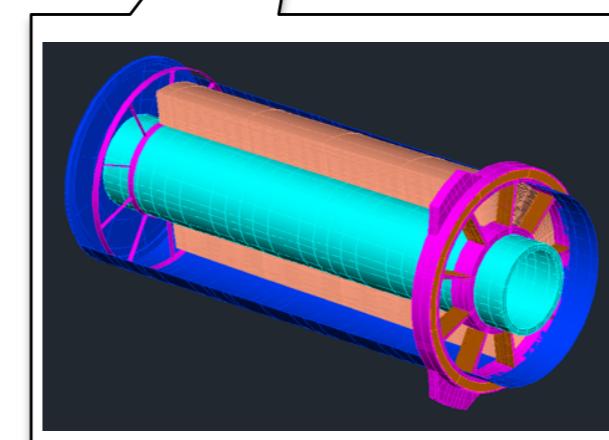
目的：X線偏光観測の開拓

NASA's Small Explorer program



## X線偏光計

- 3台 INFN/Pisa
- E: 2-8 keV
- $\mu \sim 40\% @ 3 \text{ keV}$
- $15 \times 15 \text{ mm}^2$
- ガス電子増幅  
フォイル (GEM; 理研)

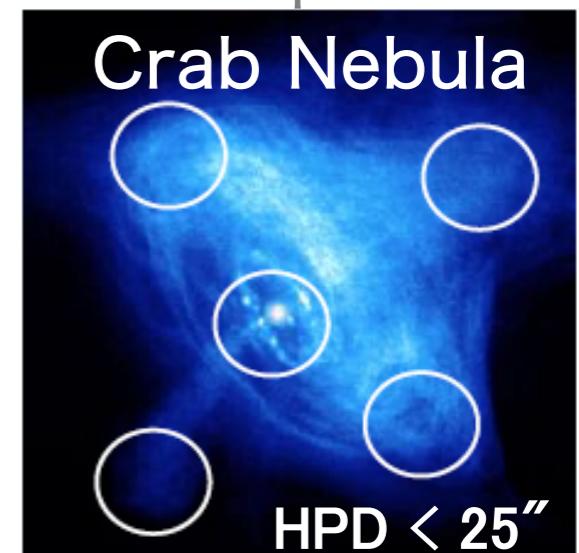


## X線鏡 (NiCo電鋳)

- 3台 NASA/MSFC
- $230 \text{ cm}^2 @ 2.3 \text{ keV}$
- FoV:  $12'.9 \times 12'.9$
- 熱シールド(名大)

- 最小検出偏光度~1% (系統誤差<0.5%)
- 日本からハード提供 (JAXA小規模計画)
- 貢献内容：製作、較正、SWG活動 (天体 Sim、観測天体決定)

Weisskopf+2017



HPD < 25"

- 2017年1月 NASA SMEX 採択
- 2018年6月25–28日 mission PDR (基本設計審査) 通過
- 2018年11月1日 KDP-C 通過
- 2019年6月24–28日 mission CDR (詳細設計審査) 通過
- 7月8日 打ち上げロケット (Space X Falcon 9) の決定
- EM 偏光計と EM 望遠鏡を組み合わせた試験@MSFC(8月末~)
- FM 偏光計の較正試験@INAF/Rome
- FM サーマルシールドの納品 (2019/12E) <= ハードウェア提供完了
- 2021年4月 打ち上げ (予定)
- Baseline運用 (2年間; 様々なカテゴリーの天体を観測) + Enhancement運用 (GO等)

# 高エネルギー連が関係する計画

- XRISM (PI: 田代信也 @ 埼玉大)
- Athena (Japan PI: 松本浩典 @ 大阪大)
- FORCE (PI: 森浩二 @ 宮崎大)
- Hi-Z GUNDAM (光赤外分野との分野横断) (PI: 米徳大輔 @ 金沢大)
- PhoENiX (太陽分野との分野横断) (PI: 成影典之 @ 国立天文台)
- IXPE (Japan PI: 玉川徹 @ 理研)
- Super DIOS (PI: 佐藤浩介 @ 埼玉大)
- ...

# Super DIOS mission

佐藤浩介(PI, 埼玉大)、大橋隆哉(首都大)、S-DIOS 検討チーム(首都大、埼玉大、名古屋大、JAXA/ISAS、奈良女子大、理研、大阪大、筑波大、Yale大、NASA/GSFC、ソルボンヌ大)

## Super DIOS performance

Weight 2000-3000 kg

Rocket H2-H3

Area at 0.6 keV > 1000 cm<sup>2</sup>

Focal length about 3-4 m

Angular resolution 10 arcsecond

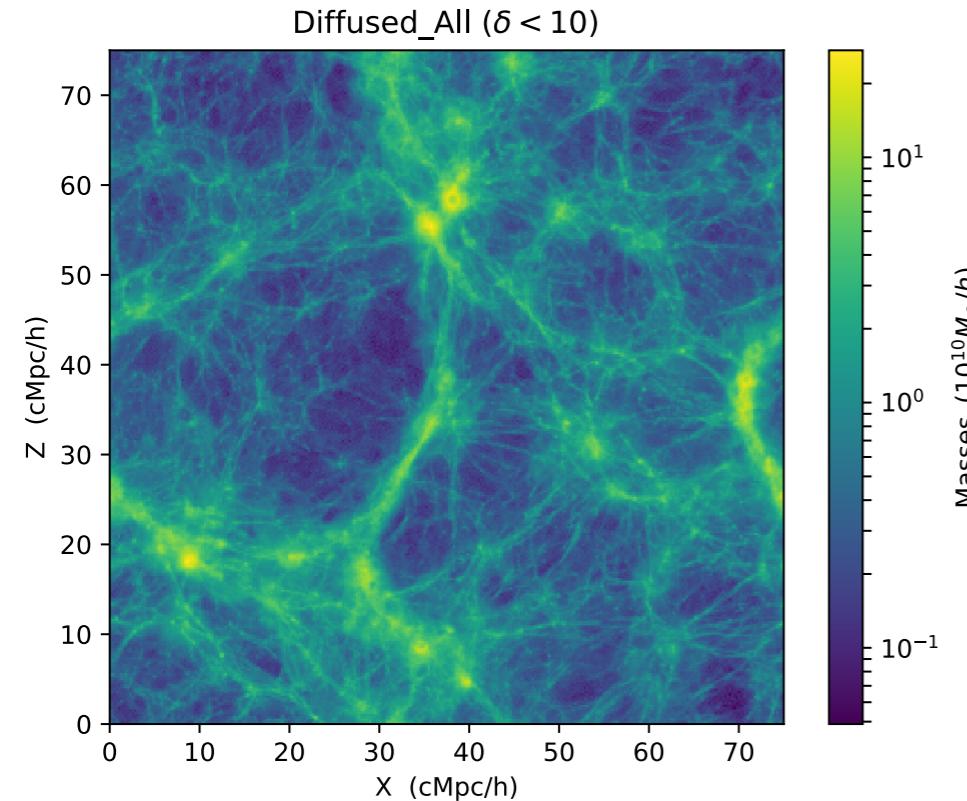
Energy resolution < 2 eV @ 1 keV

TES pixels ~30000

FOV 30 arcmin

- ✓ 旧DIOS SWGはXRISM(2021)の打ち上げに伴い一旦解散したがSuper DIOSとして再度検討を開始した
- ✓ 2030年代の状況を見据え、銀河、銀河団から中高温銀河間物質までを網羅する「ダークバリオン」探査を目指している
- ✓ 科学目標から衛星性能にフローダウンすることを目的に宇宙論的シミュレーションを用いて検討中
- ✓ 検出器の技術開発も推進中
- ✓ 2030年代初頭の打ち上げを目指し、ISASへの今年度中のリサーチグループの申請を準備中

# 宇宙論的シミュレーションを用いた科学的検討



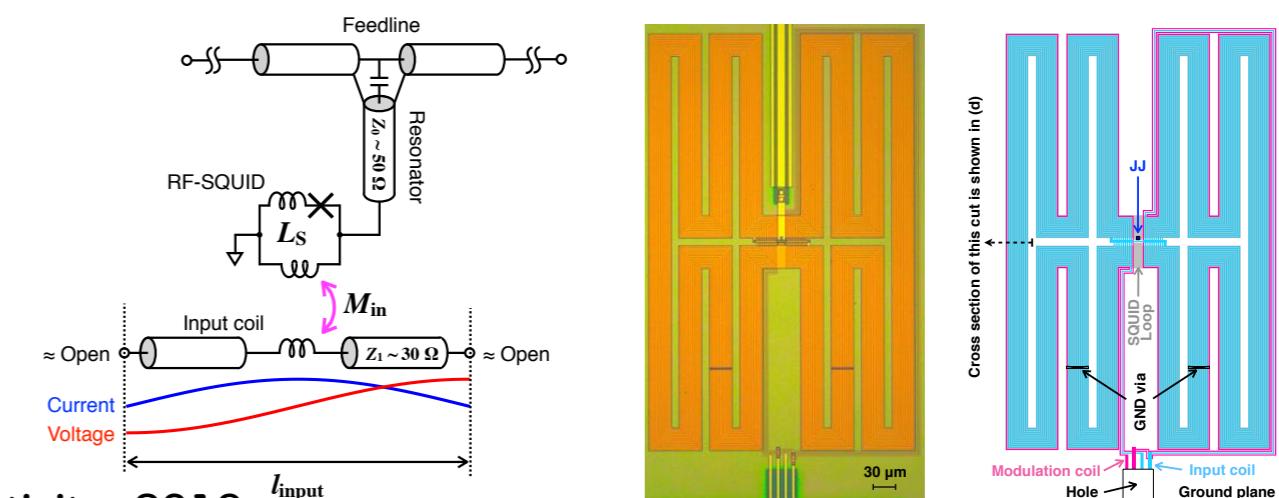
- Based on simulations (Illustris-TNG)
- ✓ Quantifying what fraction of “dark baryon”
- ✓ Fractions of X-ray signals arising from ICM, CGM, and WHIM components
- ✓ Feasibility study with mock X-ray spectra with detector responses to determine requirements for detector performances

# マイクロ波を用いたカロリメータ読み出し技術の開発

New readout system for a large TES array such as  $10^4$  pixels is required for Super DIOS, and Microwave SQUID multiplexer (MUX) is a promising technique.

We have started developments of  
Microwave SQUID MUX readout system  
with JAXA/AIST/TMU/Saitama Univ.

Nakashima et al., IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2019



# まとめ

- ・高宇連では運営委員と将来計画検討委員を中心に将来計画に関する議論が進行中。
- ・光赤外の皆様からご意見をいただき、さらなる連携を深めていければと思います。
- ・年度末の高宇連研究会に是非ご参加ください。
- ・高宇連将来計画検討委員会の報告書は、高宇連ウェブページから閲覧可能となっています。