

X線天文衛星

H27年度打上げ予定



X線天文衛星

ASTRO-Hの衛星概要

高橋忠幸

ASTRO-H プロジェクトマネージャ

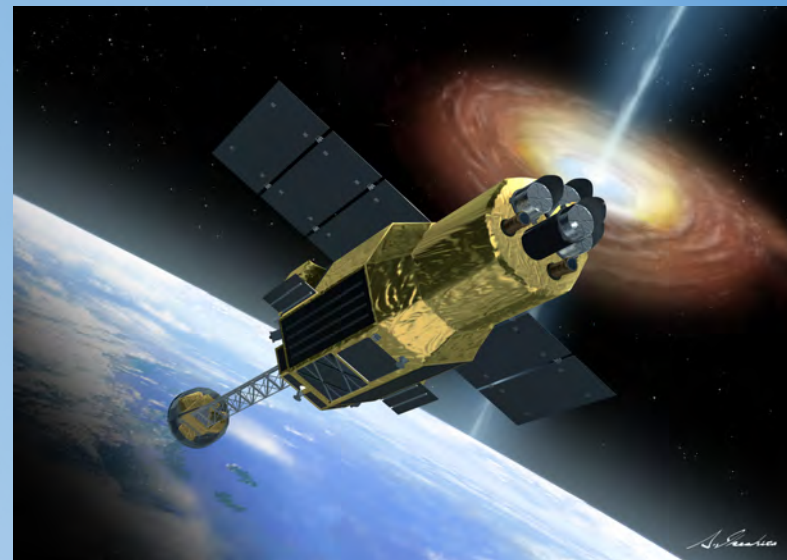
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

本日の内容

1. ASTRO-H衛星
2. X線天文学
3. ASTRO-Hの意義（科学目的）と目標
4. これまでの経緯
5. 衛星、搭載機器
6. 目標達成へのアプローチ
7. 開発体制、開発の履歴
8. 今後の予定

ASTRO-H衛星

- ASTRO-H衛星はブラックホール，超新星残骸，銀河団など，X線やガンマ線で観測される高温，高エネルギーの天体の研究を通じて、宇宙の構造とその進化の解明を行う天文衛星です。
- X線やガンマ線は、地球の大気に吸収されてしまうために、地上に到達することができません。そのため宇宙で観測することが必要です。
- ASTRO-H衛星は、「すざく」の後継として開発され，JAXA，NASAをはじめ，国内外の大学，研究機関の200人を超える研究者が開発に参加する，X線天文学の旗艦ミッションです。大規模な国際協力が開発された4種類の新型観測システムが搭載され，「すざく」にくらべて10倍から100倍も暗い天体の分光観測が可能になります。

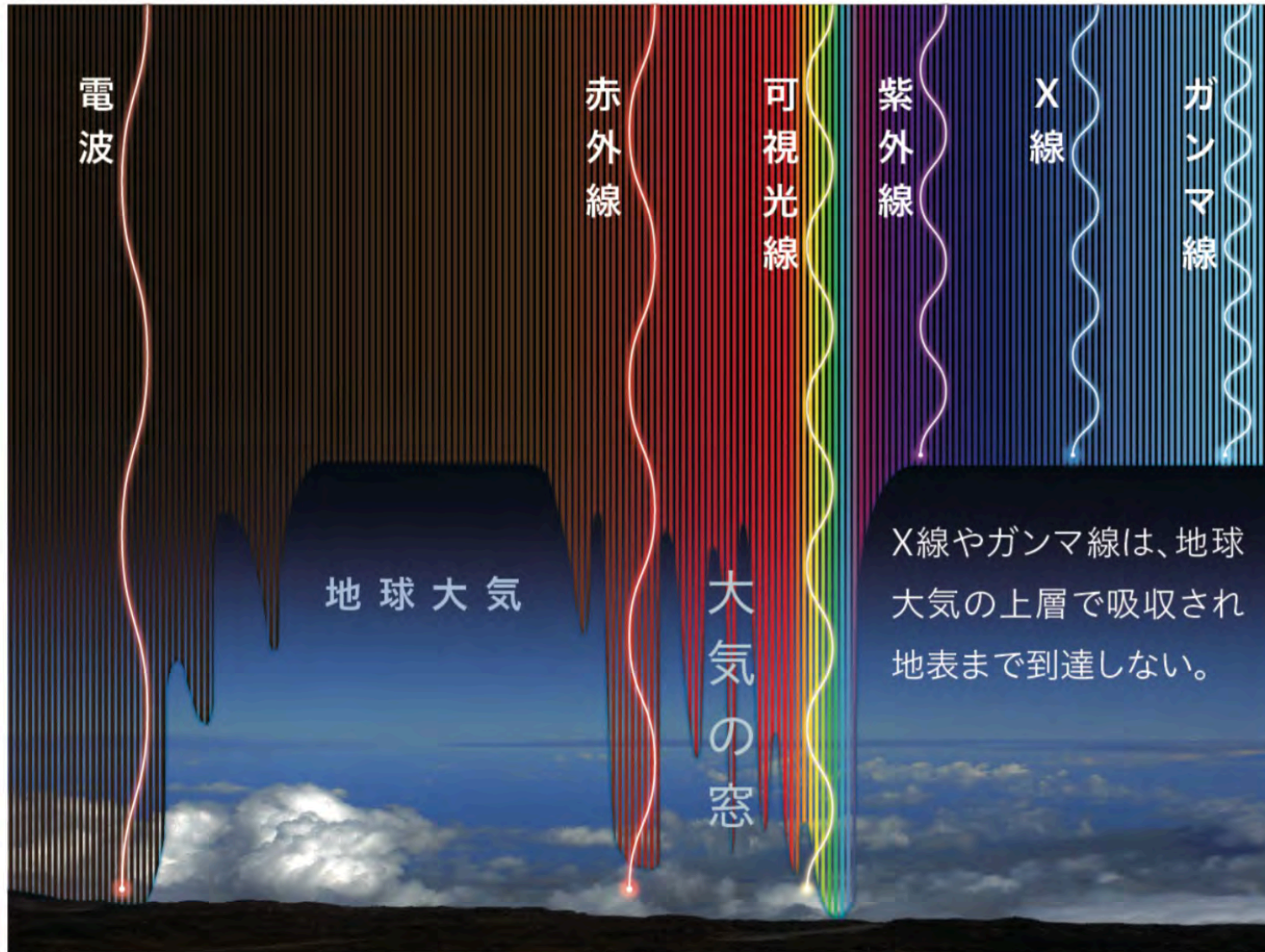


★主要諸元

主な項目	諸元
軌道上展開後の大きさ	全長約14m
打上げ質量	約2,700kg
軌道	高度約575km
目標寿命	3年以上

X線天文学

厚い大気を突き抜けてくるのは、可視光と電波、一部の赤外線だけ



X線天文学

- 1962年に、ロケット実験と共に始まった宇宙X線観測は人類が予想もしていなかった、宇宙が数千万度、数億度という超高温の現象の宝庫であることを示しました。そして、宇宙が静的なものではなく、動的な、ダイナミックなものであることを明らかにして、人類の宇宙観を変えたといえます。
- 今では、宇宙で我々が観測できる物質の80パーセントはX線でしか観測できない高温状態にあると考えられています。そのため、宇宙の全貌を知る上で、X線観測は不可欠の手段です。

銀河系内の恒星質量ブラックホール



(想像図)

NASA

銀河中心の巨大ブラックホールとジェット



(想像図)

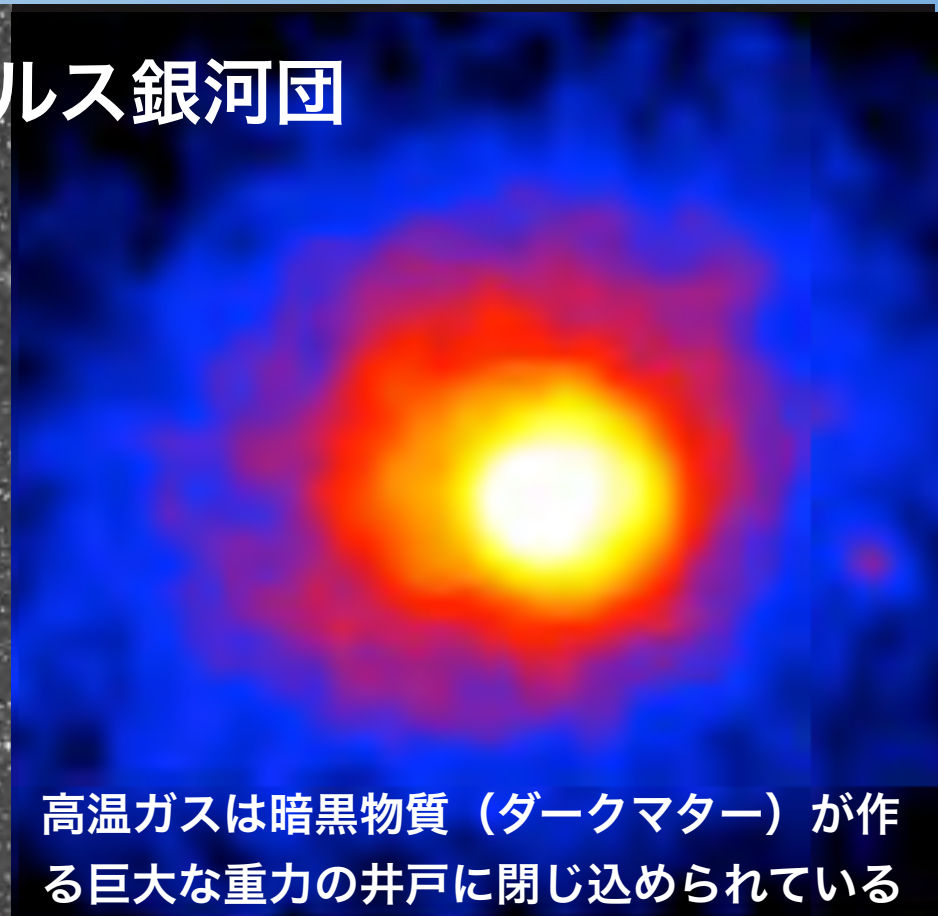
NASA / JPL-Caltech

X線天文学

100個以上もの銀河が集団をなしているの
が見える（銀河団）

一千万度から一億度もの高温ガスが銀河
団に充満している事が「発見」された

ケンタウルス銀河団

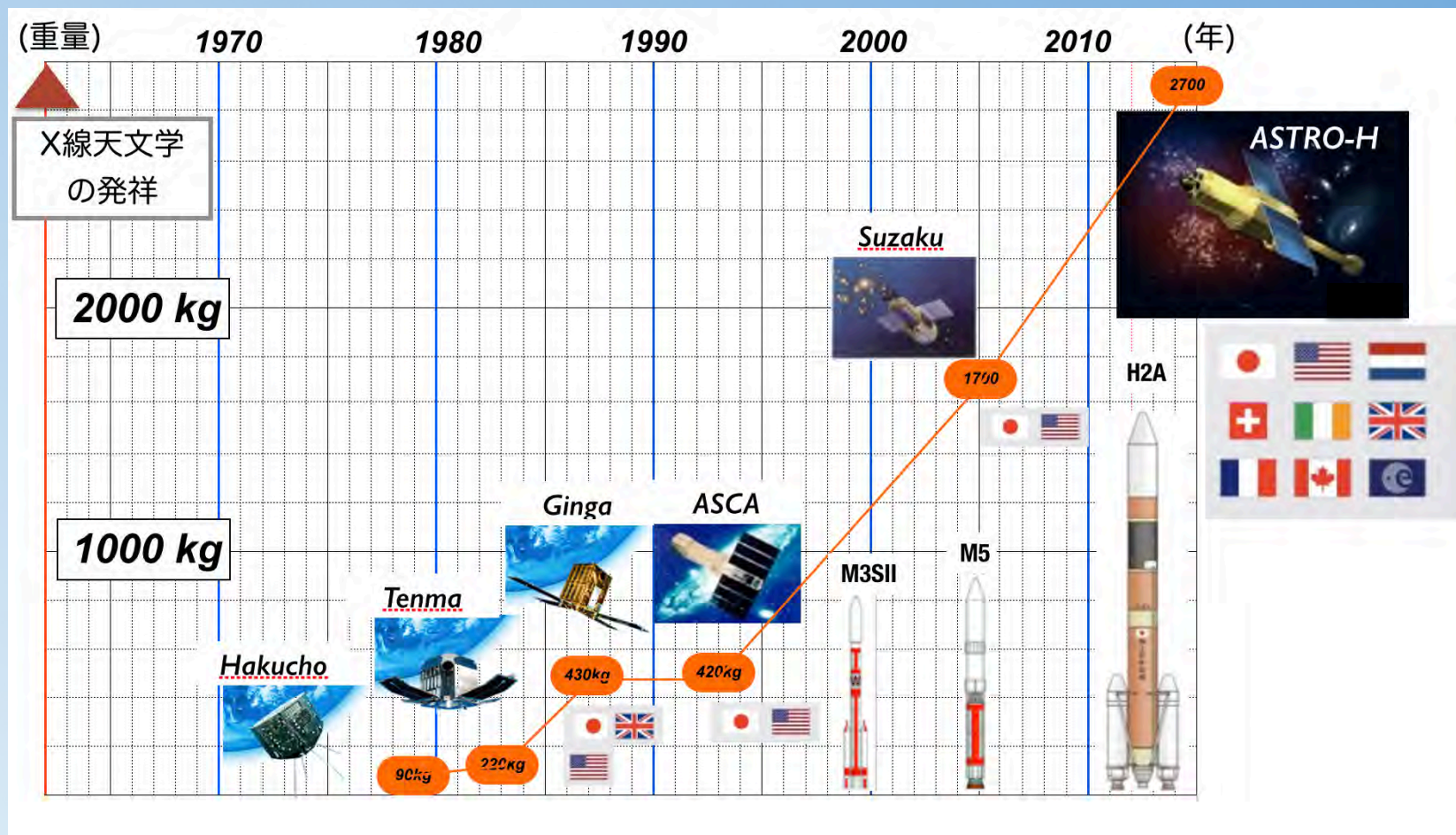


高温ガスは暗黒物質（ダークマター）が作
る巨大な重力の井戸に閉じ込められている

可視光

X線

日本のX線天文学の軌跡



日本は、X線天文学の黎明期より、大きな役割を果たして来た。

ASTRO-Hは国内外の大学，研究機関の200人を超える研究者が開発に参加するX線天文学の旗艦ミッションである。

ASTRO-H衛星実現の意義

- 宇宙の進化は、星、銀河、銀河団がおりなす巨大な階層構造を作るとともに、ブラックホールに代表される驚くべきエネルギーと物質の集中を生み出してきた。ほぼ一様な状態から膨張を続けてきた宇宙で、数10桁も異なる空間的・密度的スケールにわたって、なぜ、このように多彩な構造が作られてきたのだろうか。

星



NASA and The Hubble Heritage Team (AURA/STScI)

銀河



NASA, ESA & A. van der Hoeven

銀河団

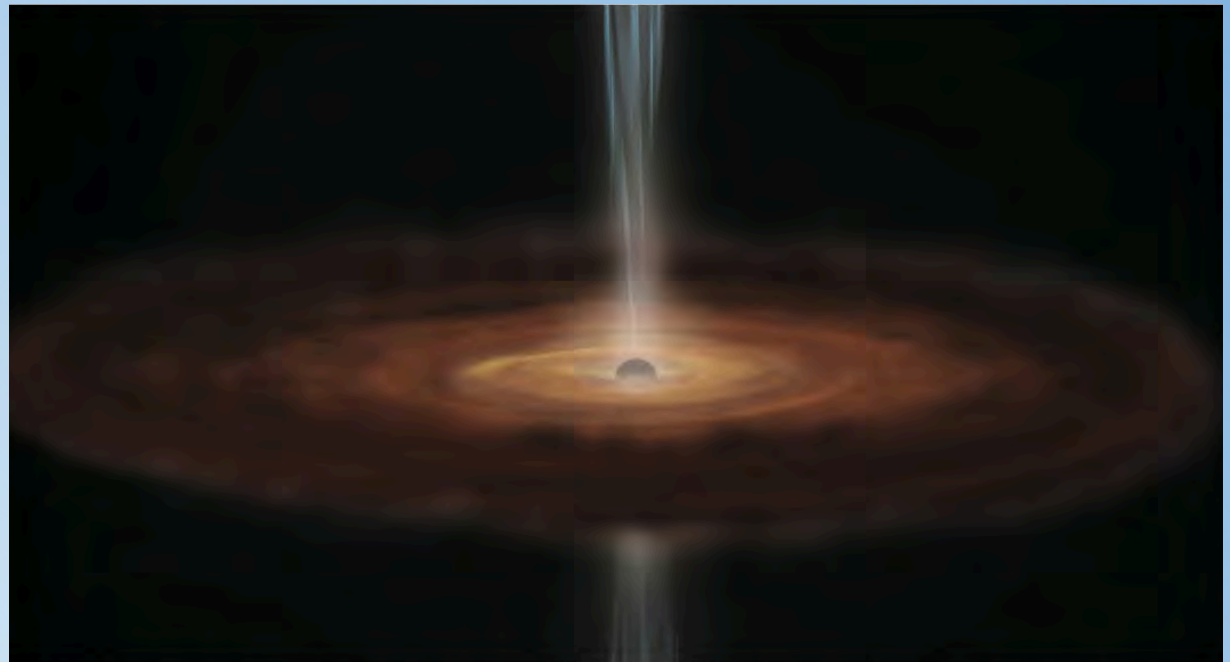


NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA),

ASTRO-H衛星実現の意義

- 中性子星やブラックホールの観測により、地上では実現できない超高温、超強重力、超強磁場、超高密度などが存在することがわかっている。X線は、こうした極限環境から選択的に放出されることが多く、物理法則の正しさを検証・探求する場である。

物質を吸い込むブラックホールの想像図。物質はX線を出しつつ吸い込まれるが、その際、物質の一部は高速で吹き出し、そこからX線やガンマ線が放射される。



(想像図)

ASTRO-H衛星実現の意義

- 生まれたての銀河の中心には、巨大ブラックホールが潜んでいると考えられている。しかし、厚い周辺物質によってほとんどの方向が遮られており、可視光や従来のX線衛星では極めて観測が困難であった。

宇宙に広がる無数の銀河



The Sloan Digital Sky Survey

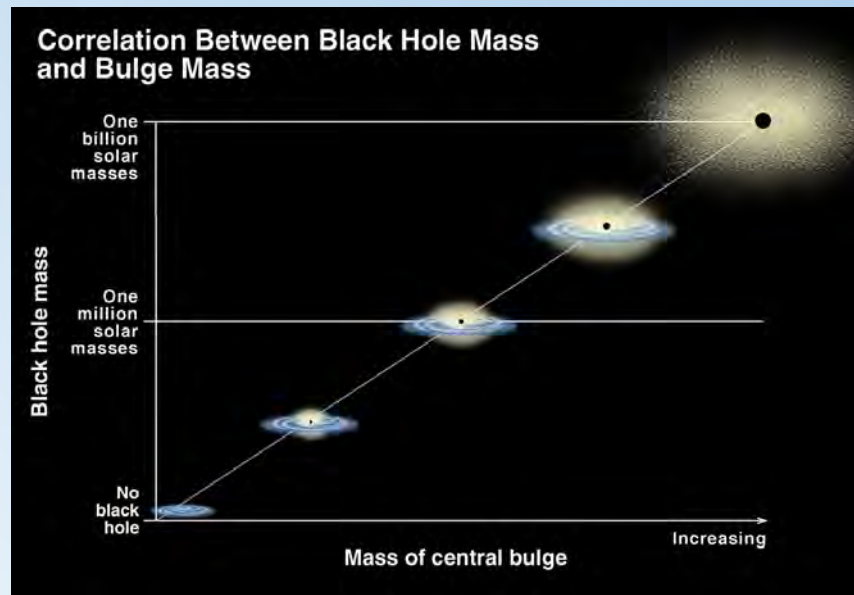


隠された
超巨大ブラックホール

(想像図)

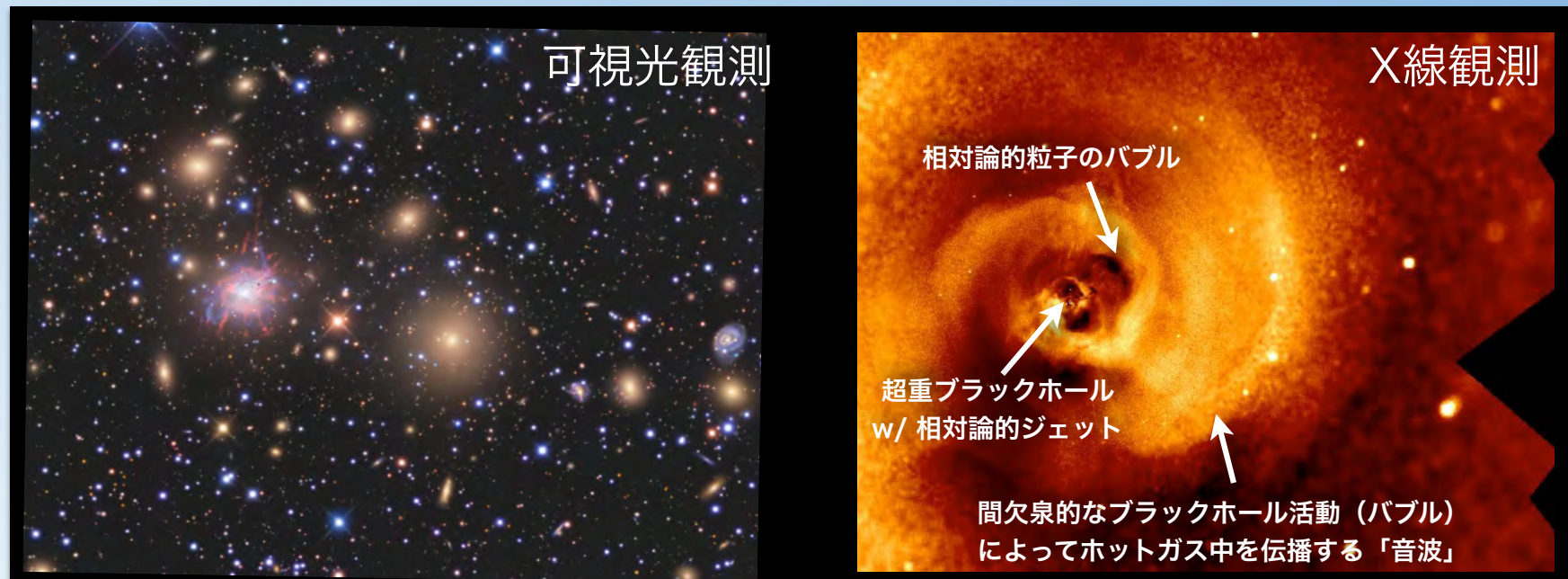
ASTRO-H衛星実現の意義

- 最近、ビッグバンから数億年から数10億年後、銀河はその中心にブラックホールをいだいて生まれ、共に進化して現在にいたることがわかった（ブラックホールと銀河のバルジ質量の強い相関）。しかし、「地球」に銀河を例えれば、オレンジくらいの大きさのブラックホールがどのように銀河全体に影響を与えて、「共に」進化できるのかはわかっていない。



ASTRO-H衛星実現の意義

- 銀河団は大きさが1000万光年にも及び、多数の銀河が集まった宇宙最大の天体で、宇宙の構成要素の最も大きな存在である。銀河団がどのようにでき、進化してきたかを知ることは、宇宙の構造の進化そのものの研究につながる。銀河団には、銀河を足し合わせたより数倍も大きな質量の高温ガスで満ちている。高温ガスはX線を放射するため、X線観測は、銀河団全体の成り立ちを調べる鍵となる。



ASTRO-Hの科学目的

- 「宇宙の大規模構造と、その進化の解明」のため
 1. 銀河団という宇宙最大の天体における熱、銀河団物質の運動エネルギー、非熱的エネルギーの全体像を明らかにし、ダイナミックな銀河団の成長を直接観測する。
 2. 厚い周辺物質に隠された遠方(過去)の巨大ブラックホールを「すざく」の約100倍の感度で観測し、その進化と銀河形成に果たす役割を解明する。
- 「宇宙の極限状態の理解」のため
 3. ブラックホールの極近傍の物質の運動を測定することで重力のゆがみを把握し、相対論的時空の構造を明らかにする。
- 「多様性にとんだ非熱的エネルギー宇宙の探求」のため
 4. 宇宙に存在する高エネルギー粒子(宇宙線)がエネルギーを獲得する現場の物理状態を測定し、重力や衝突・爆発のエネルギーが宇宙線を生み出す過程を解明する。
- 「ダークマター・暗黒エネルギーの探求」のため
 5. 距離(年齢)の異なる銀河団内のダークマターの分布と総質量を測定し、銀河団の進化に果たすダークマターと暗黒エネルギーの役割を探求する。

国際的な位置づけ

ASTRO-Hは世界に公開される観測装置として、機能面、包括的な性能、公募観測の規模という面で諸外国が計画する小規模衛星計画 (NuSTAR, eROSITAなど)を大きく上回る。

ASTRO-Hは2028年以降の国際大型計画「Athena」に向けた重要なプリカーサーミッションとして世界をリードする内容をもつ。

マイクロカロリメータと軟X線望遠鏡の共同開発を中心としたNASAの大掛かりな国際協力に加え、SRON（オランダ）、ジュネーブ大学、パリ大学/CEA、CSA、ESA（ヨーロッパ宇宙機構）がハードウェア開発に参加。他、国際公募によりNASA, ESAより11人のサイエンスアドバイザーが選ばれている。



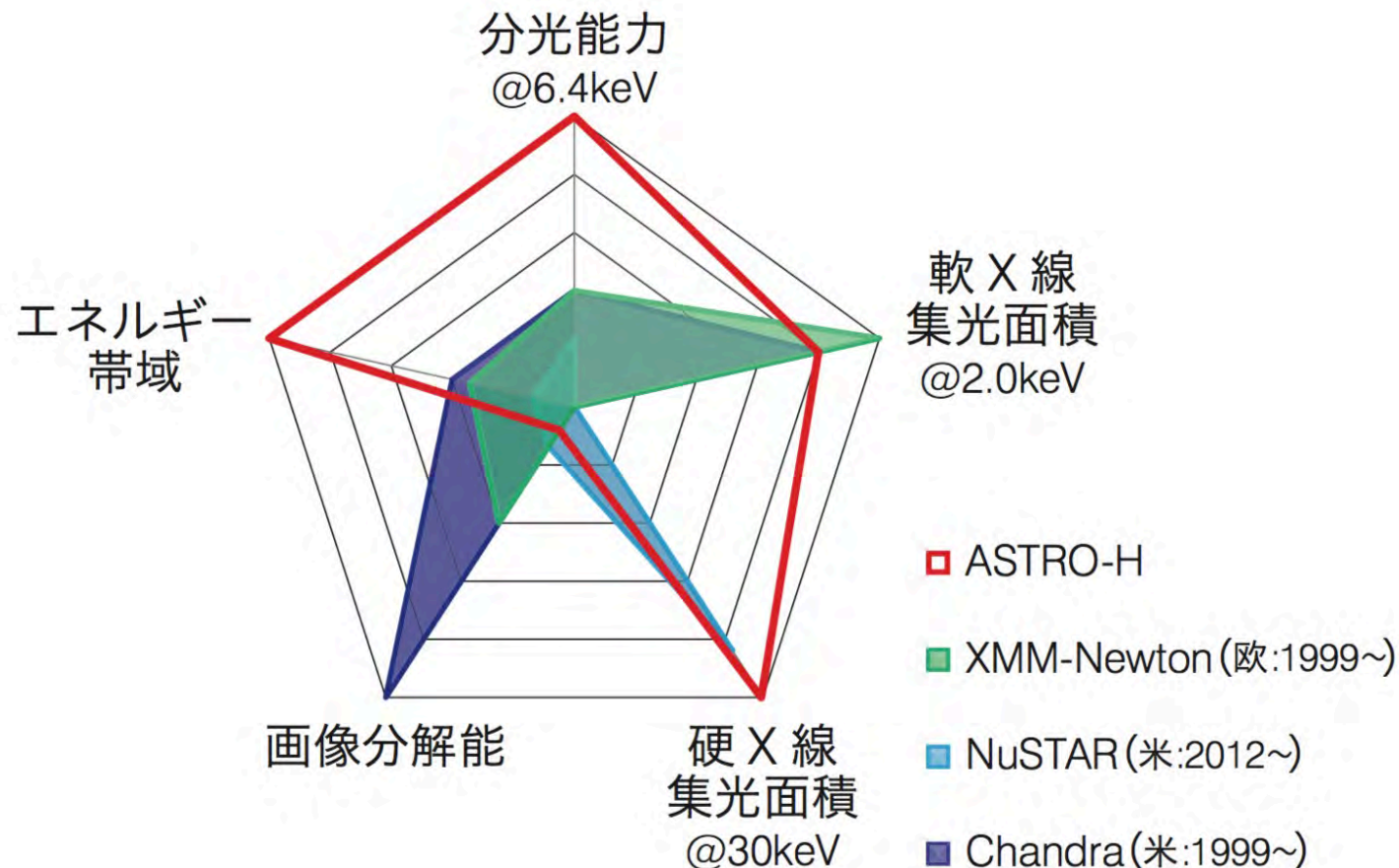
これまでの経緯

2002	ワーキンググループ結成 (NeXT衛星として)
2006	ミッション定義審査 (MDR) 及びシステム要求審査 (SRR) 完了
2007	JAXAプロジェクト準備審査を経てプリプロジェクトに移行。
2008	システム定義審査 (SDR) 完了。NASAの参加決定。宇宙開発委員会の事前評価により、開発研究段階への移行が承認される。 ASTRO-Hプロジェクトチーム設置
2009	宇宙開発委員会事前評価により、開発段階への移行承認。基本設計審査 (PDR)完了。
2012	詳細設計審査(CDR)
2014	詳細設計審査2(CDR2)
2015	開発完了審査(11月19日)

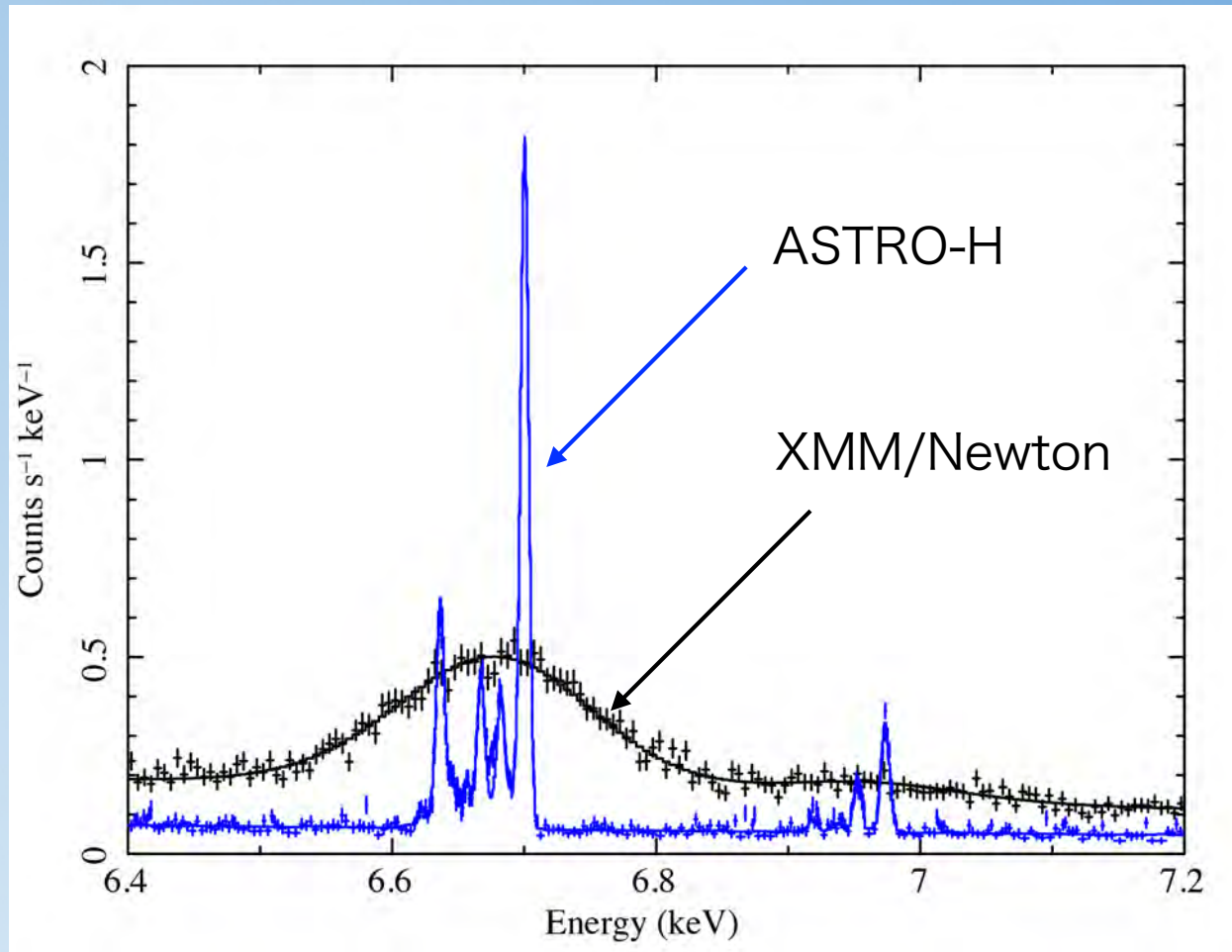
ASTRO-H衛星の特徴

- ・ X線光子のエネルギーを超高精度で測定する能力(分光能力)
- ・ 広いエネルギー帯域を同時に観測する能力

で他衛星を圧倒する



超高分解能分光観測



A1795 銀河団を 100 ks、観測を行った場合のASTRO-H の SXS によるスペクトル(青)とXMM-Newton の PN 検出器(黒)との比較。5 keV の電離平衡プラズマを仮定 (シミュレーション)。

広帯域観測

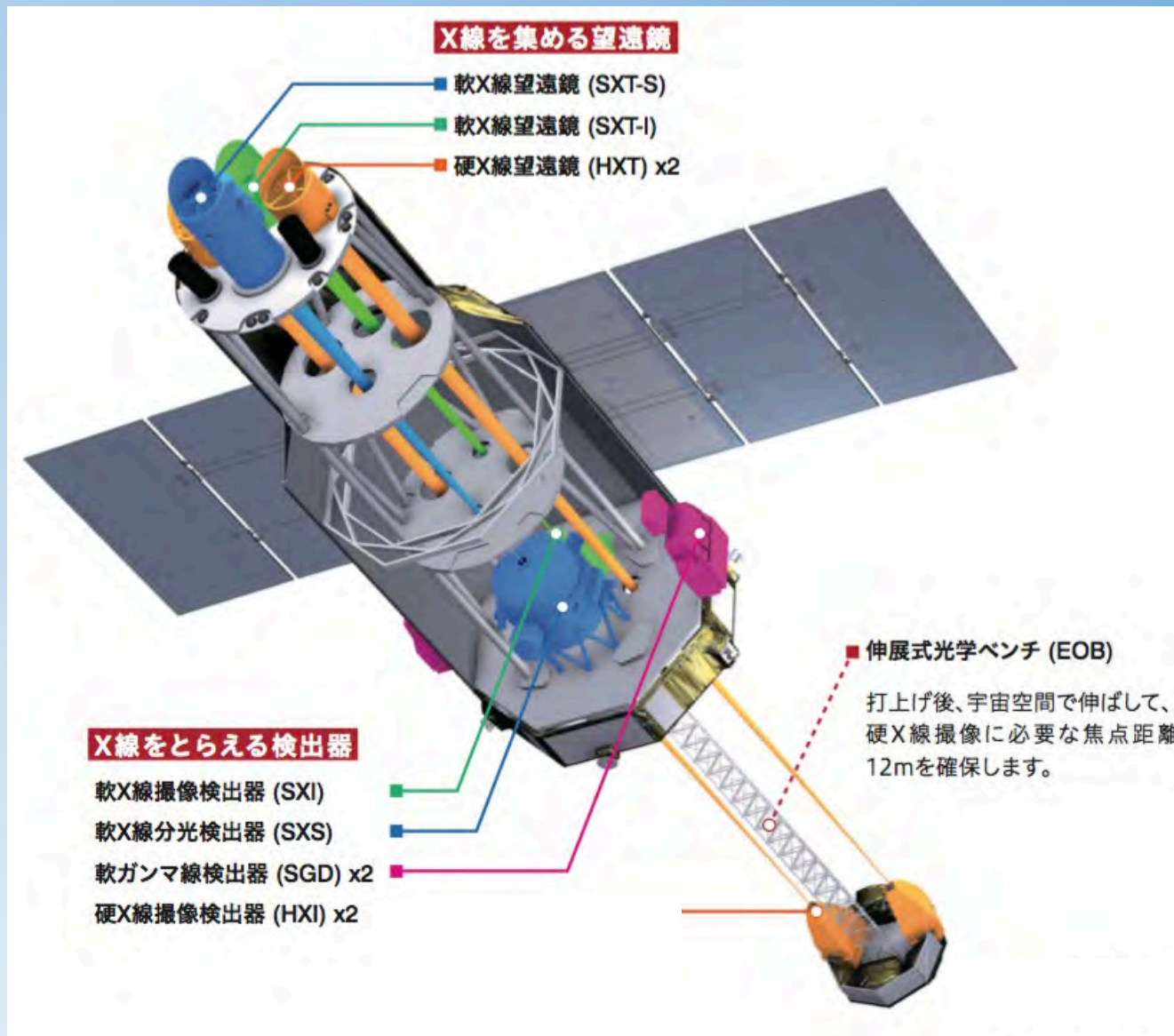
高温プラズマのX線領域でのスペクトルは複雑。物理モデルに制限を加えるには広帯域のスペクトル（イメージ）情報が必要不可欠。

1. 硬X線望遠鏡＋硬X線撮像検出器(Si+CdTe ハイブリッド)
2. 軟X線望遠鏡＋軟X線撮像検出器(X線CCD)
3. 軟ガンマ線検出器（Si/CdTeコンプトンカメラ）

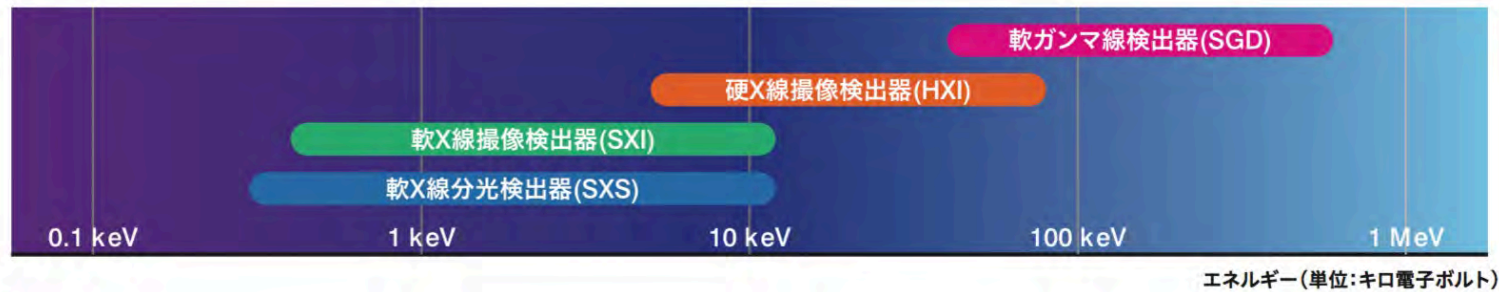
10-80keVでの高精度の撮像分光、0.3-600 keVでの広帯域スペクトル観測を同時に行う。

1.2.3.は軟X線望遠鏡を除いて、すべて純国産

ASTRO-H衛星の概要



ASTRO-H衛星の特徴



軟X線分光観測

SXT-S
(望遠鏡)

SXS

大面積かつ軽量の軟X線望遠鏡と、50ミリ度という極低温技術によって超高分解能分光を実現する軟X線分光検出器を組み合わせ、超精密X線分光を実現。

軟X線撮像観測

SXT-I
(望遠鏡)

SXI

軟X線望遠鏡と、大面積低雑音X線CCD素子を用いた軟X線撮像検出器を組み合わせ、広い視野を持ち観測の基本となるX線撮像を実現。

硬X線撮像観測

HXT
(望遠鏡)

HXI

国産ナノ技術を駆使し、世界に先駆けて開発した硬X線望遠鏡と、ASTRO-Hをめざして開発した新しい高効率CdTe半導体素子に基づく硬X線撮像検出器を組み合わせ、硬X線帯で初めての集光撮像を実現し、飛躍的な高感度を実現。

軟ガンマ線観測

SGD

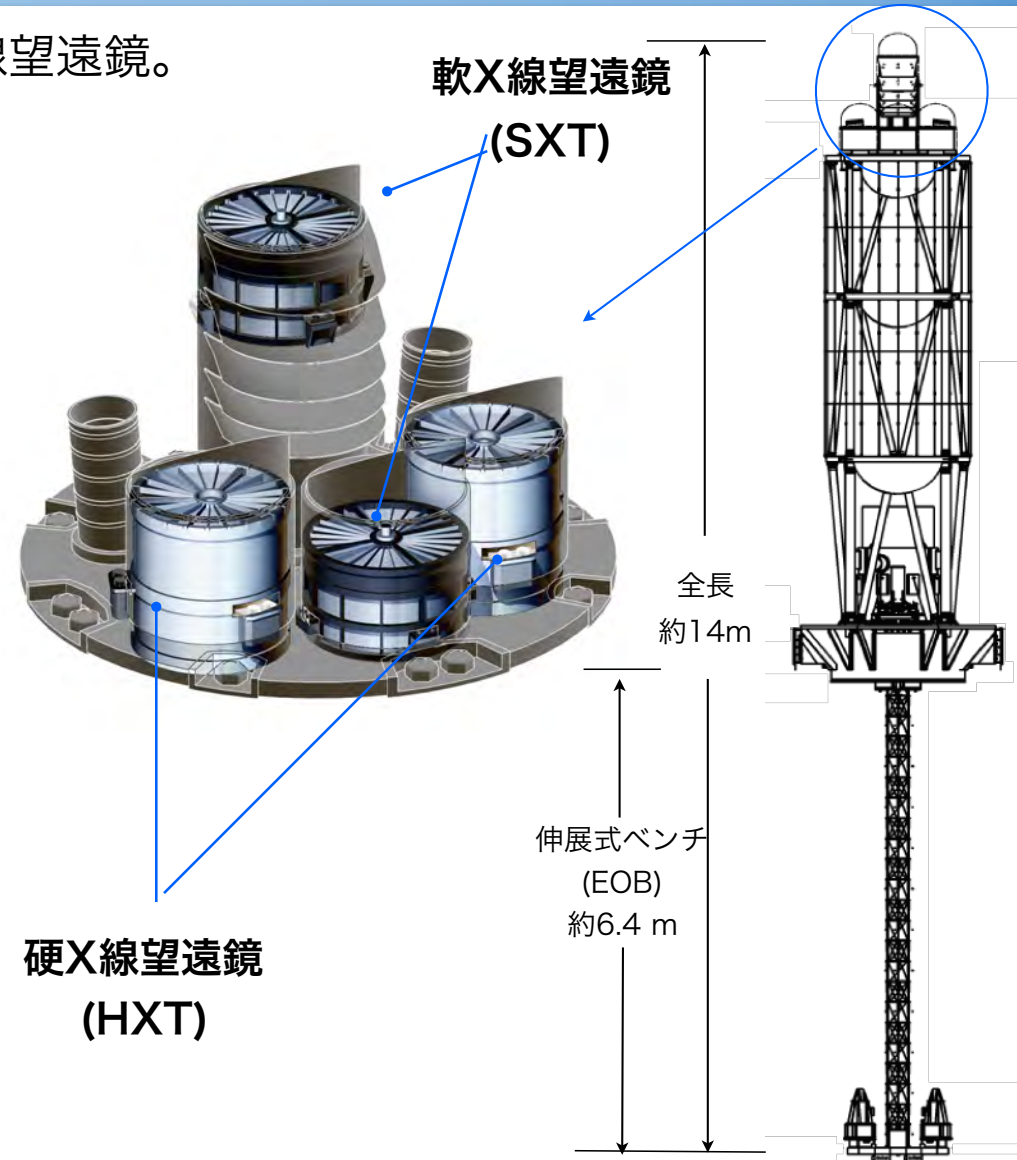
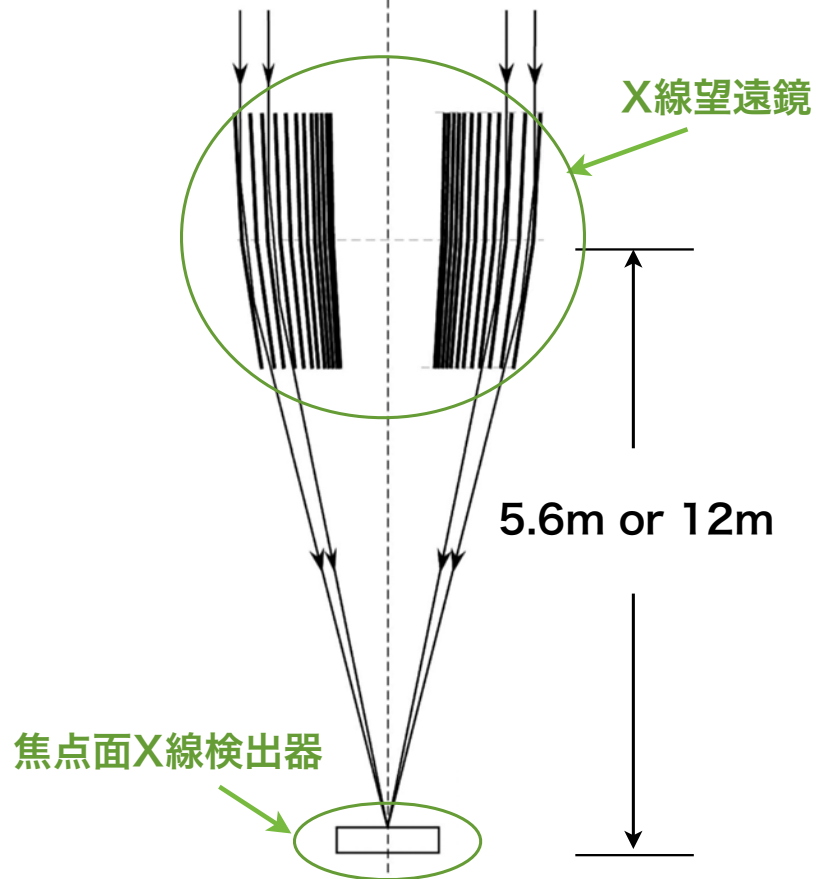
独自のアイデアである狭視野半導体コンプトンカメラに基づいた超低雑音軟ガンマ線検出器により、一桁以上の感度の向上と、ガンマ線偏光観測能力を実現。

これら4種類の観測システムが同時に機能することで、3桁にもおよぶ広帯域において、「すざく」より10倍から100倍高感度の観測を実現して、最大限の科学的成果を引き出すことが可能となる。

X線望遠鏡

可視光の望遠鏡のレンズに対応するX線望遠鏡。
ASTRO-Hは衛星全体が望遠鏡である。

X線望遠鏡の原理



X線は滑らかな物質表面に1度以下というごく浅い角度で入ってきた場合にのみ反射し、わずかに進行方向を変えまる。これを利用してX線を1点に集める。

軟X線望遠鏡 & 硬X線望遠鏡

SXT HXT

SXTは口径45cm、焦点距離5.6mの望遠鏡であり、0.3-12keVの軟X線帯のX線集光・撮像を目的とする。焦点面にSXIを用いるSXT-I、SXSを用いるSXT-Sの2台が搭載されている。望遠鏡のハウジングは円周方向に4分割、上下に2分割されており、それぞれに、形状を円錐に近似した反射鏡が同心円状に203枚積層されている。

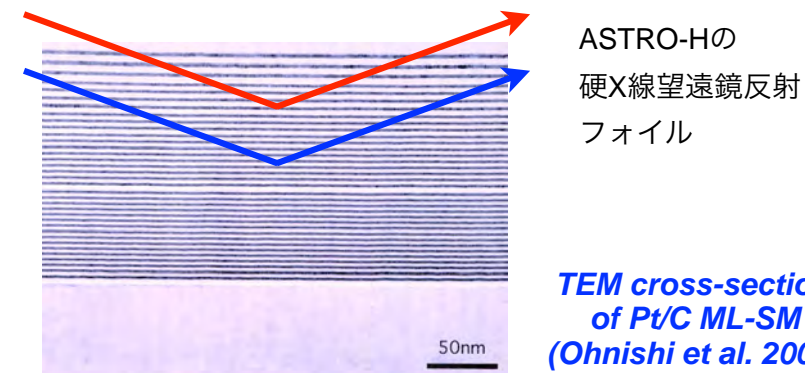
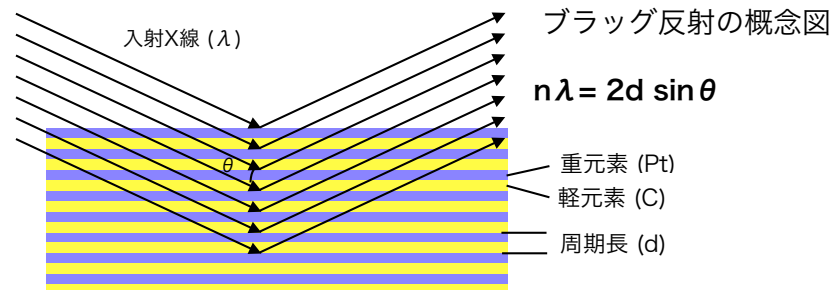
HXTは口径45cm、焦点距離12mの望遠鏡であり、5-80keVの硬X線帯のX線集光・撮像を目的とする。望遠鏡のハウジングは円周方向に3分割、上下に2分割されており、それぞれに、形状を円錐に近似した反射鏡が同心円状に213枚積層されている。反射鏡表面はPt/C多層膜でコーティングされており、ブラッグ反射を利用することで、「すざく」では実現できなかった、約80keVまでの硬X線集光・撮像を実現する。



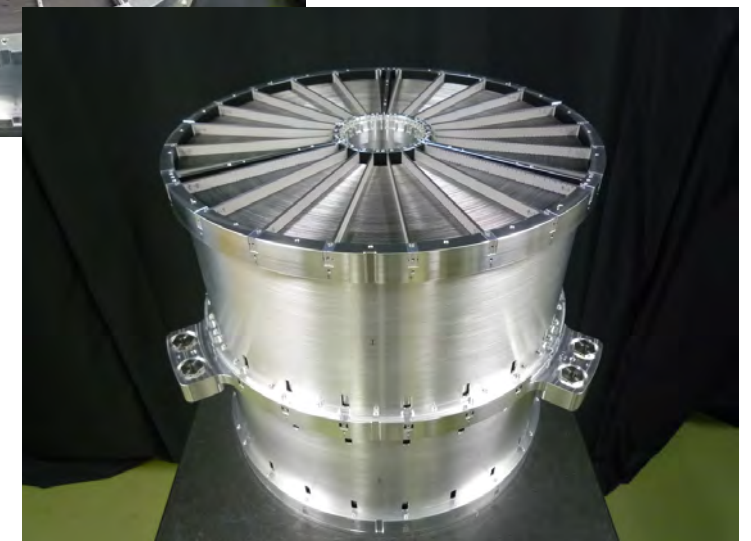
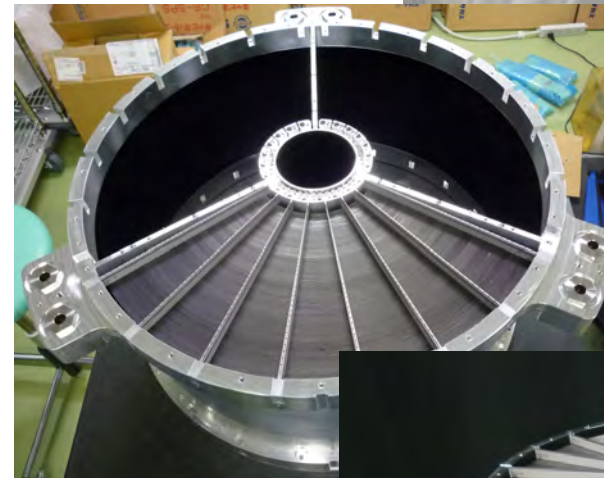
硬X線望遠鏡

HXT

1万電子ボルトを超すX線は、従来のX線望遠鏡のような全反射ではなく、ブラッグ反射の原理を用いる。広いエネルギー範囲をカバーするために、厚さ数ナノメートルの重・軽元素薄膜層の厚みを精密に制御し、連続的に変化させる。



名古屋大学での
製造作業風景



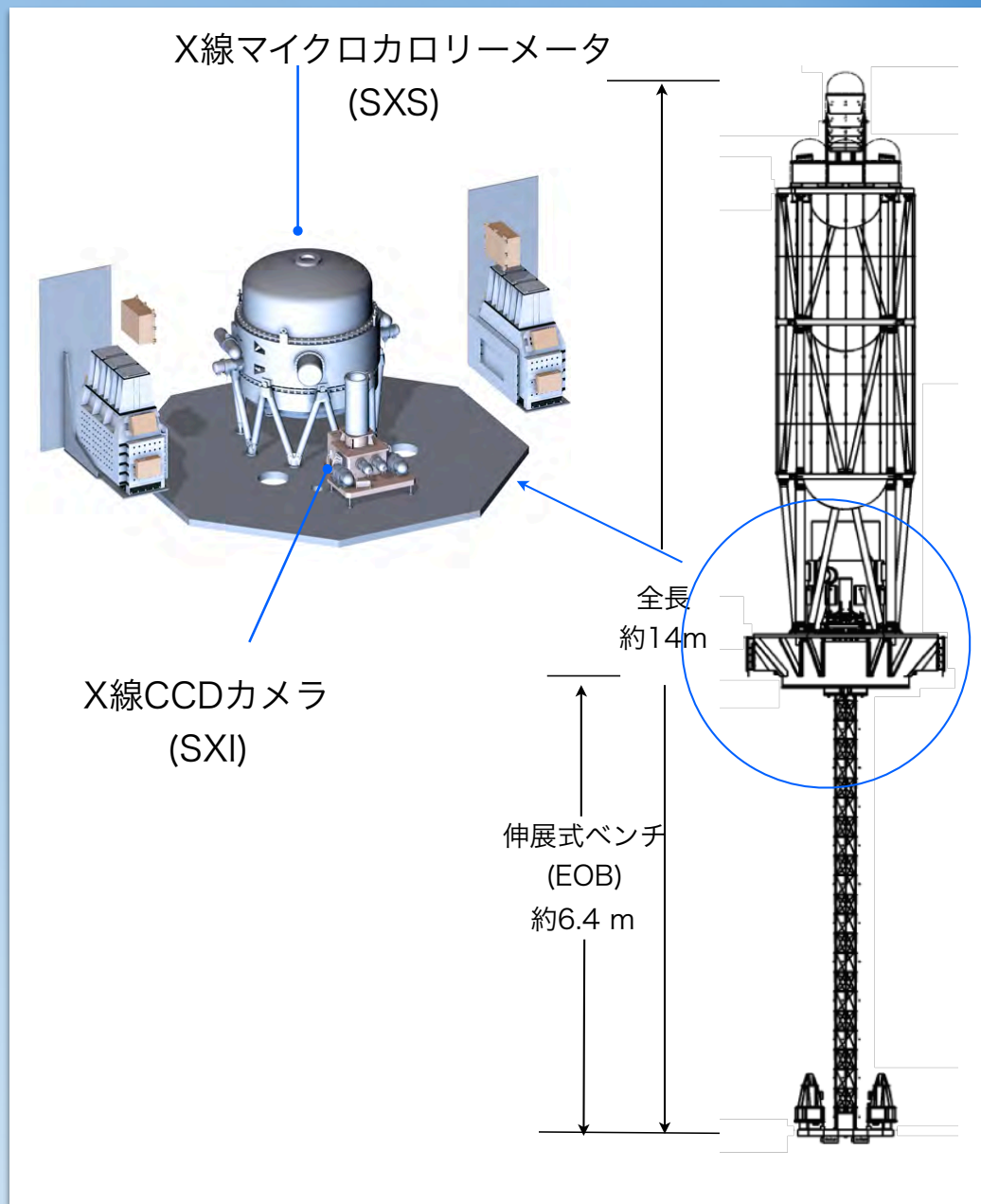
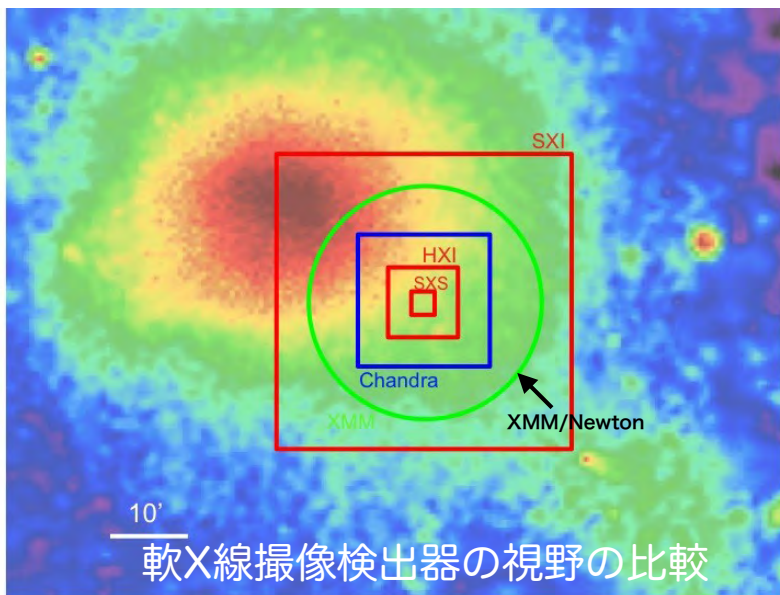
軟X線望遠鏡の検出器

軟X線分光検出器 (SXS)

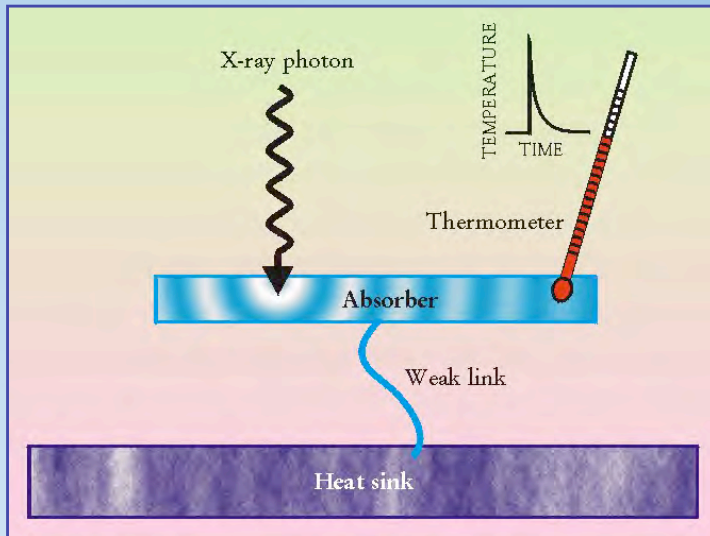
はじめてのX線マイクロ
カロリメータによる高い
エネルギー分解能の観測

軟X線撮像検出器 (SXI)

X線CCDを用いた、広視野、
高S/N比イメージング

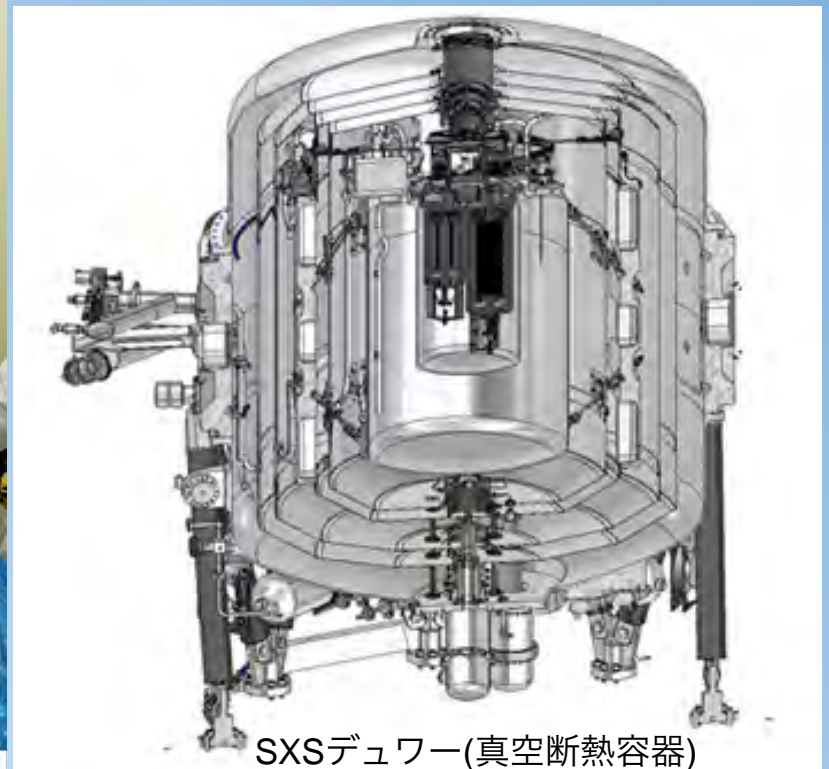


軟X線分光検出器 (SXS)



高分解能のX線分光(X線によるドップラー分光)により、はじめて、高温ガスの運動を100km/sの精度で捉え、超新星残骸・銀河団内部の「主たる構成要素の」高温ガスの運動を測定する

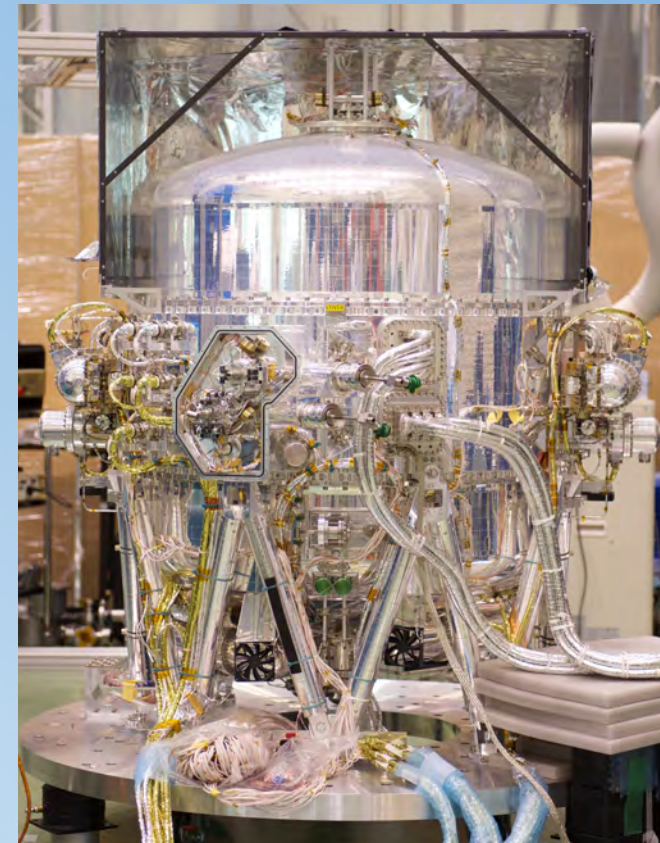
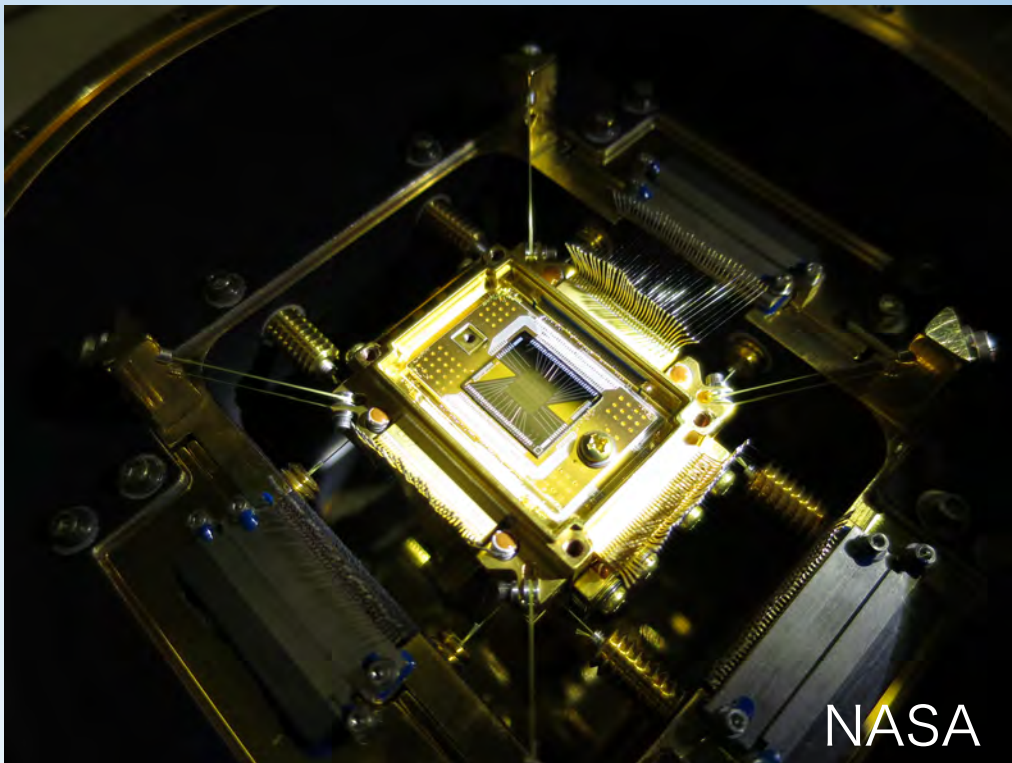
ASTRO-Hは広がった天体の超高分解能分光観測を行う最初のミッション。特に鉄輝線 (Fe-K)の領域。



軟X線分光検出器 (SXS)

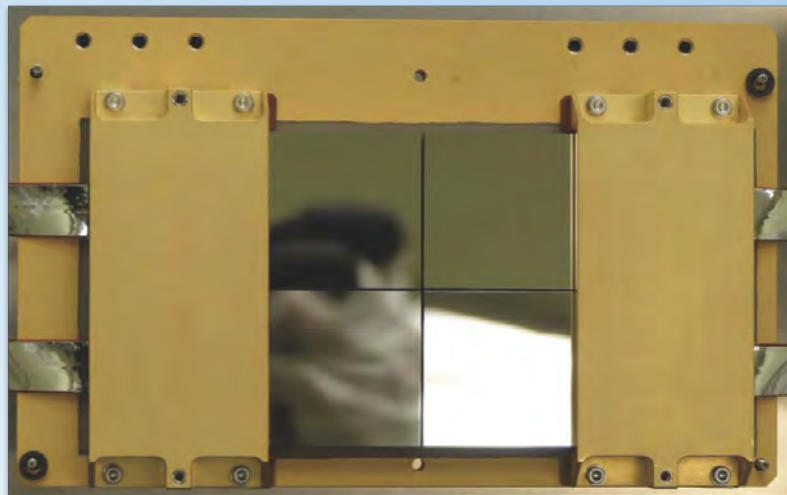
SXSは衛星搭載機器として、X線マイクロカロリメータを使った天体観測装置である。検出器に入射したX線光子1個1個のエネルギーを素子の温度上昇として測定する。そのエネルギー分解能は極低温に冷却することで飛躍的に向上し、SXSでは、動作温度 50mKにおいて、5.9keVのX線に対してエネルギー分解能 7 eV (FWHM)以下を達成している。

軟X線分光検出器(Soft X-ray Spectrometer, SXS) 検出器全体SXSは全重量が約390kg、全消費電力が通常時で約570Wという巨大なサブシステムである。冷媒を含む SXS デュワー(真空断熱容器)で、内部に検出器が搭載されている。断熱消磁冷凍機(ADR)や、機械式冷凍機(JT,PC,SC)など他の冷却系と合わせて、検出器を 50 mKに冷却する。

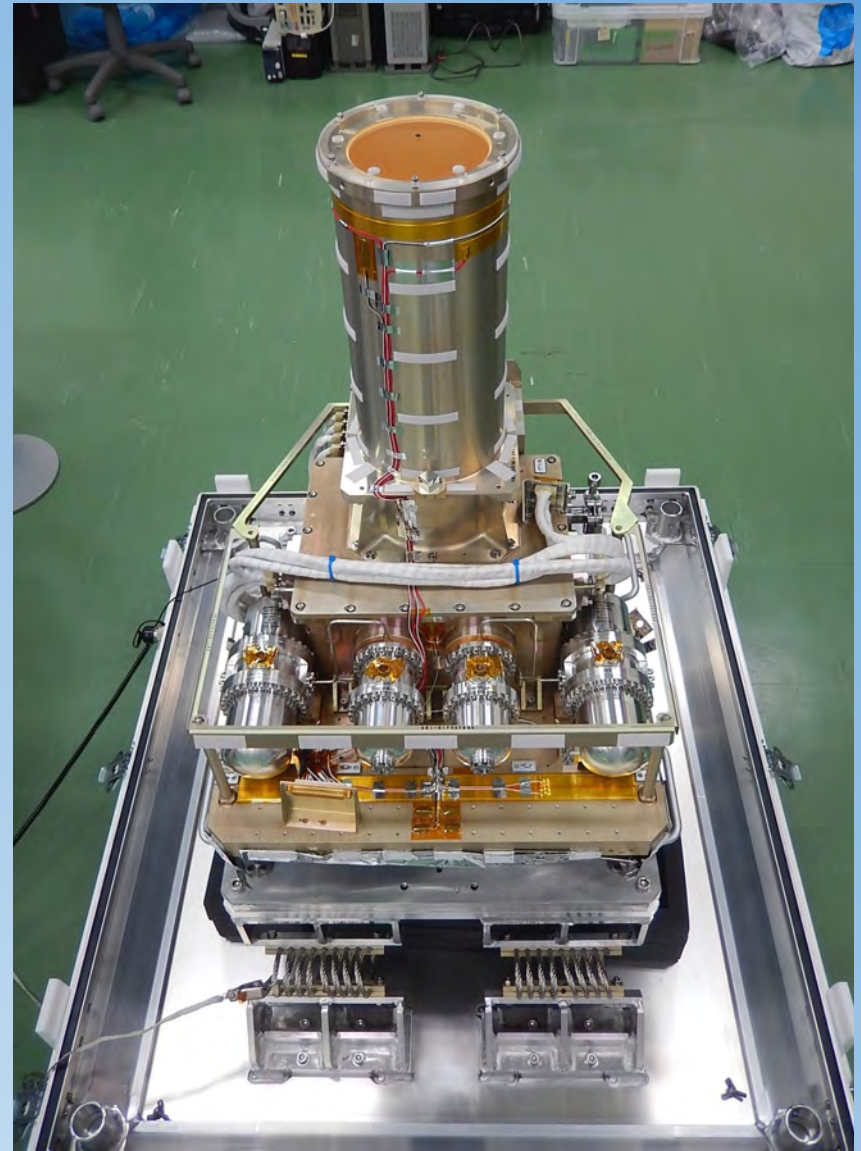


軟X線撮像検出器 (SXI)

SXIはASTRO-Hに搭載されるCCDカメラである。X線集光鏡の焦点面検出器としては初めて国産のCCD素子を搭載する。撮像領域サイズ31mm角のCCD4枚を2x2のモザイク状に並べることで38'x38'の大きな視野を実現する。観測エネルギー帯域は0.4-12keVであり、6keVにおけるエネルギー分解能は $<200\text{eV}$ (FWHM)である。



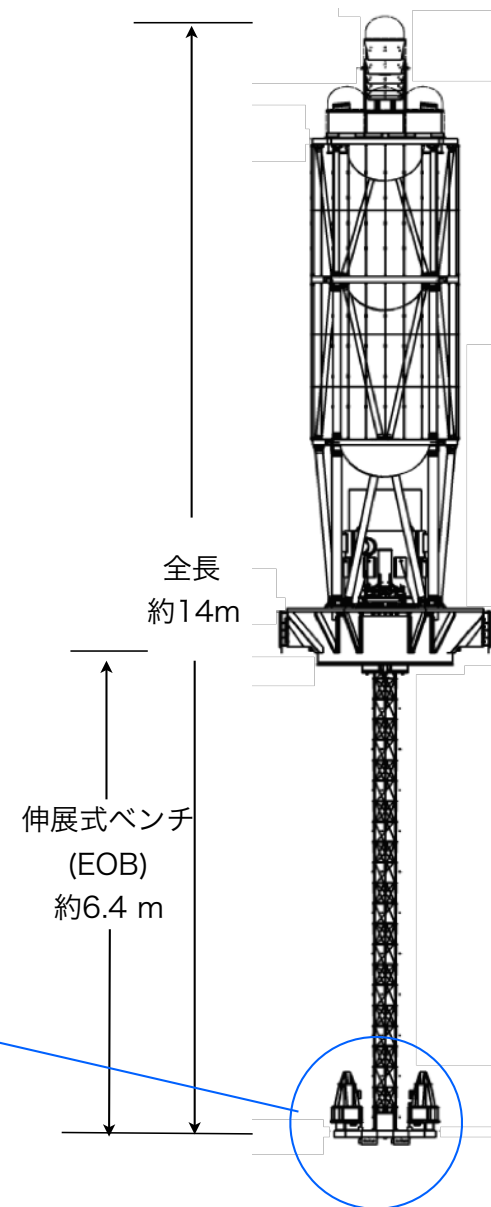
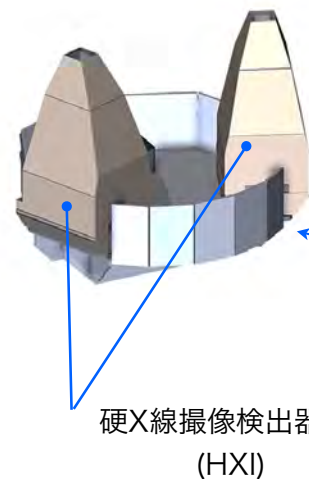
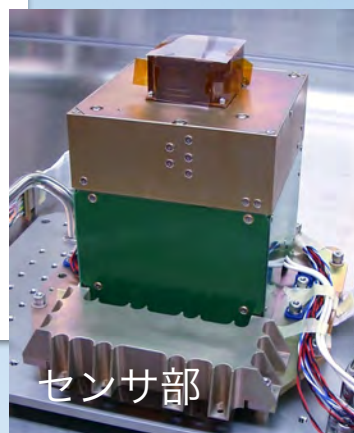
CCD素子



硬X線望遠鏡の検出器

硬X線撮像検出器 HXI

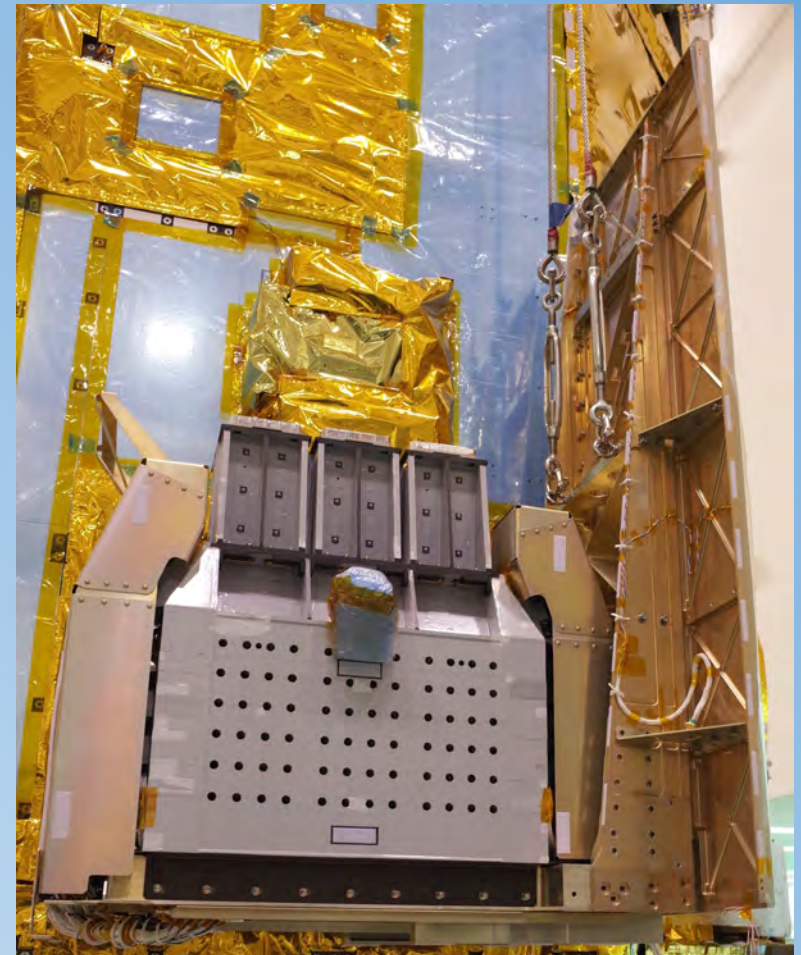
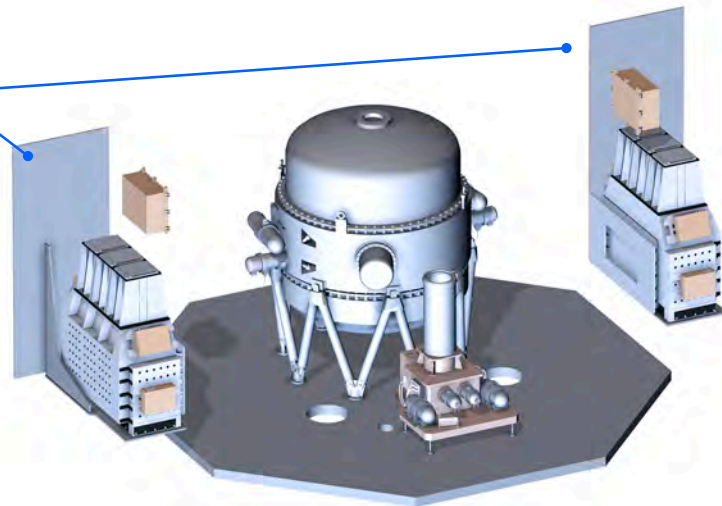
HXIは、両面ストリップ型のシリコン (Si) とテルル化カドミウム (CdTe) 半導体撮像素子をそれぞれ4層と1層を重ねたハイブリッド構造のカメラを主検出部とし、HXTと組み合わせることで、5-80 keVの帯域で硬X線撮像観測を行う。~3 cm厚のBGO結晶シンチレータ9ユニットで構成される井戸型アクティブシールドでカメラ部を覆うことで、反同時計数法による低バックグラウンド化を図っており、従来より二桁高い感度を実現する。



軟ガンマ線検出器 (SGD)

SGDは、狭視野コンプトンカメラという新しい概念に基づき、60-600 keVの帯域で軟ガンマ線観測を行う。コンプトンカメラ1台につき112枚のピクセル型Si/CdTe半導体検出器（計13,312ピクセル）を高密度に実装し、カメラ内部で起きるガンマ線の反応を計測する。粒子性を示すガンマ線が電子と散乱する「コンプトン散乱」を利用することで、ガンマ線の到来方向を制限することができ、視野を絞るファインコリメータ及び井戸型BGOシンチレータと合わせ、従来よりも10倍以上低いバックグラウンド環境を実現し、高感度観測を目指す。SGDのコンプトンカメラの要素技術は「超広角コンプトンカメラ」として東日本大震災の後、原子力発電所の20km圏内に持ち込まれ、実際にホットスポットの画像化に成功した。

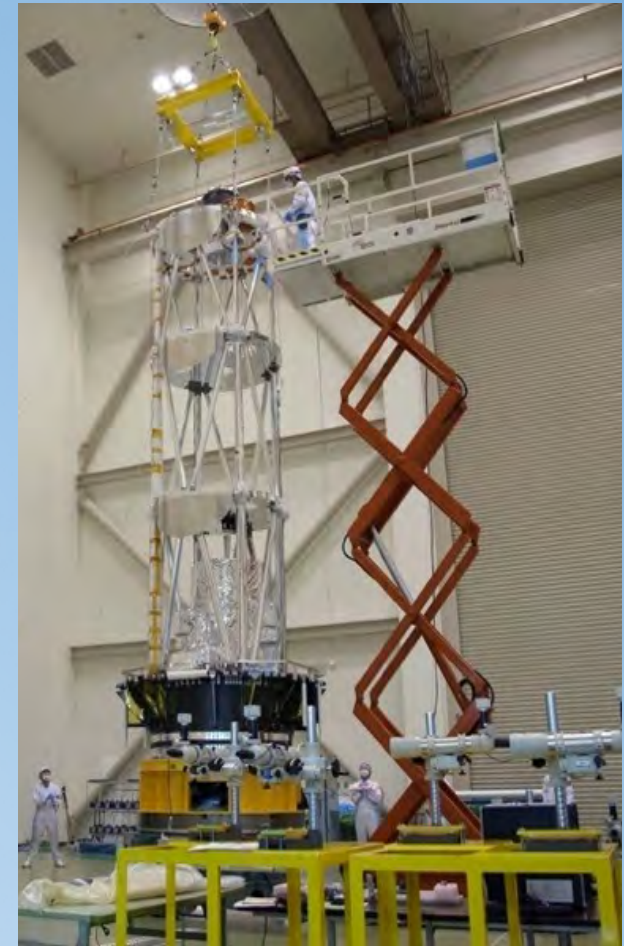
軟ガンマ線検出器
(SGD)



高精度観測を支えるバス系

ASTRO-Hが行う科学研究は、最先端のX線観測装置とそれを実現する高度な衛星バス技術を要求する。

- 1) 近地球衛星で慣性空間指向、日陰日照で温度分布がかわり、軌道周回で地球アルベドや重力傾斜の方向も変わると言う厳しい条件下で、高い指向制御精度を達成するための高度な、熱設計と構造設計（低熱歪を実現するバス構造の開発）
- 2) バス系は、ほぼフルの冗長系
（科学衛星ではじめて）
- 3) バス側/ミッション側ともSpaceWire標準を全面的に用いた衛星内データ通信を行うネットワーク型衛星の先駆け

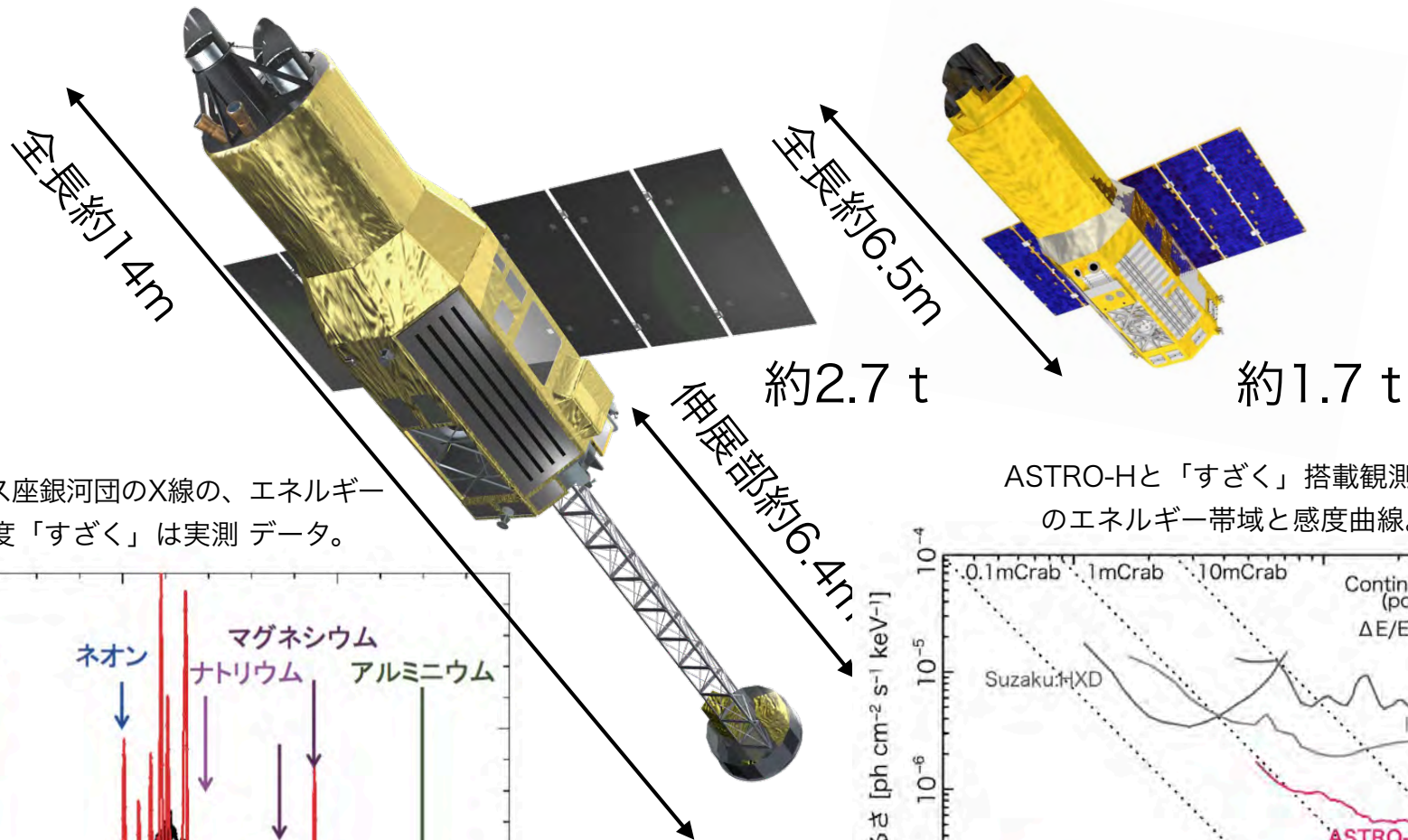


高精度観測を支えるバス系

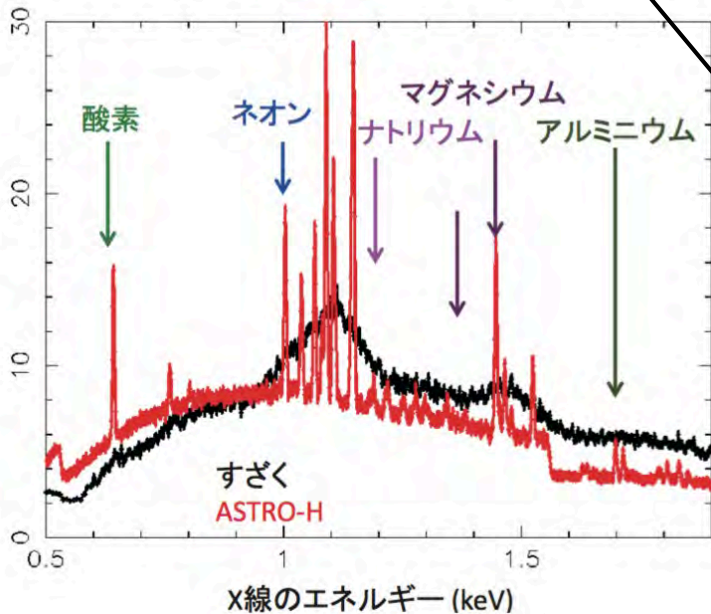
14mにもなる「望遠鏡」を、1週間にわたって一つの天体に向け続ける必要がある、軽量で、熱や振動などによって歪まない構造が必要である。衛星の中央部にトラス構造のX線望遠鏡を搭載するため、中央に一次構造部材のないパネル構造様式をとる。回路等の機器を8枚の側面パネルの内側に配置。パネルを相互に結合一体化し、側面パネルの荷重をベースパネル、アウトリガー、ロケット結合リングへ流す構造とした。

1	構造系	低熱歪みにより高精度指向性を実現する。衛星構体及び固定式光学ベンチの炭素繊維強化プラスチック(CFRP)化
2	熱制御系	観測機器を最適な温度範囲に制御。ヒートパイプを用いて、SXSの機械式冷凍機の排熱を効率良く輸送。温度制御系と温度測定系の統合
3	電源系	軌道上で必要な衛星電力リソースを確保する。リチウムイオンバッテリーの採用
4	通信系	高速X帯通信によるテレメトリ送信とS帯でのコマンド受信。マルチモードトランスポンダ(MTP)の採用(高速S帯通信による冗長化)。
5	姿勢制御系	望遠鏡光軸を観測天体に向けて高精度に指向制御する。ホイールなどの国産技術の採用。
6	データ処理系	観測機器の生成データを処理・蓄積する。全面的なSpaceWire標準I/Fの採用によるネットワーク化。国産宇宙用MPUの採用。

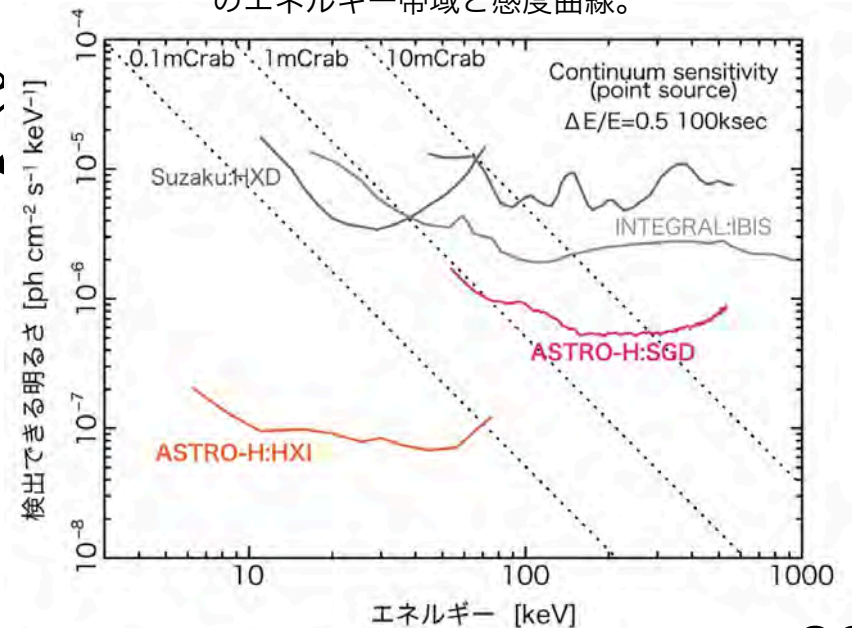
すざく衛星との比較



ペルセウス座銀河団のX線の、エネルギーごとの強度「すざく」は実測データ。



ASTRO-Hと「すざく」搭載観測装置のエネルギー帯域と感度曲線。



ASTRO-Hによる隠されたBHの観測

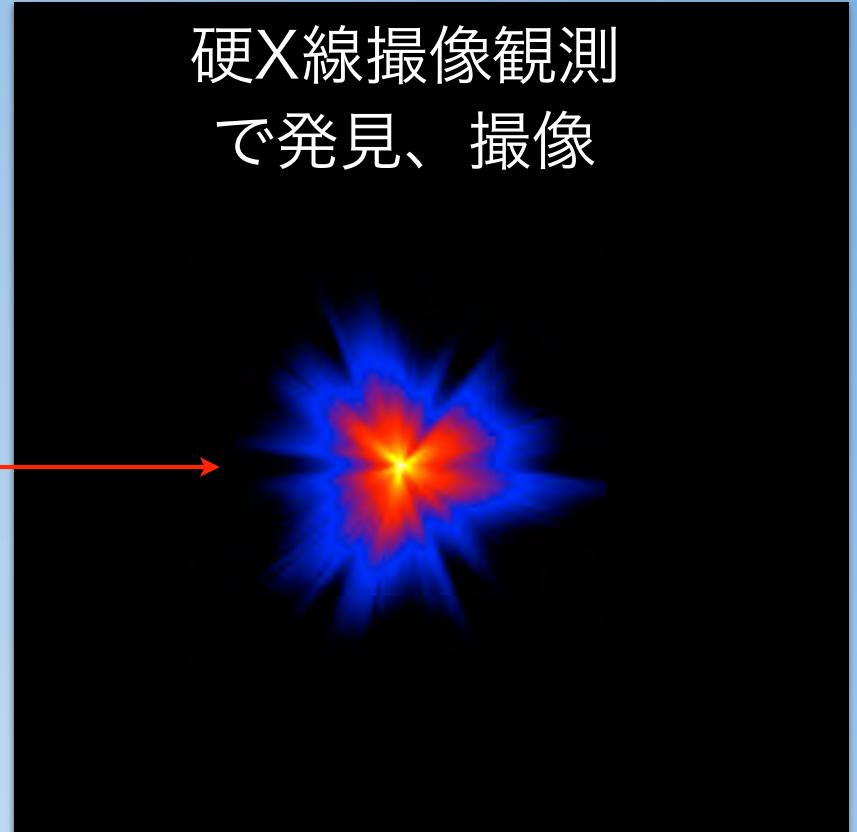
- ASTRO-Hは、周辺物質によって吸収されにくい硬X線での高感度観測を行い、これまで発見できなかった、80億光年もの遠方までの巨大ブラックホールの探査を行い、隠された巨大ブラックホールがどのくらい存在し、それがどのように過去にさかのぼって（遠方に）分布するかを調べる。

隠された
超巨大ブラックホール

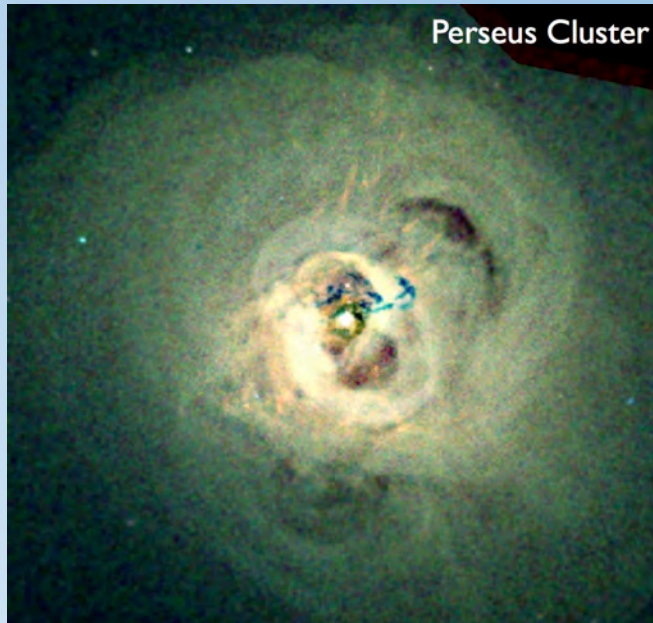


(想像図)

硬X線撮像観測
で発見、撮像



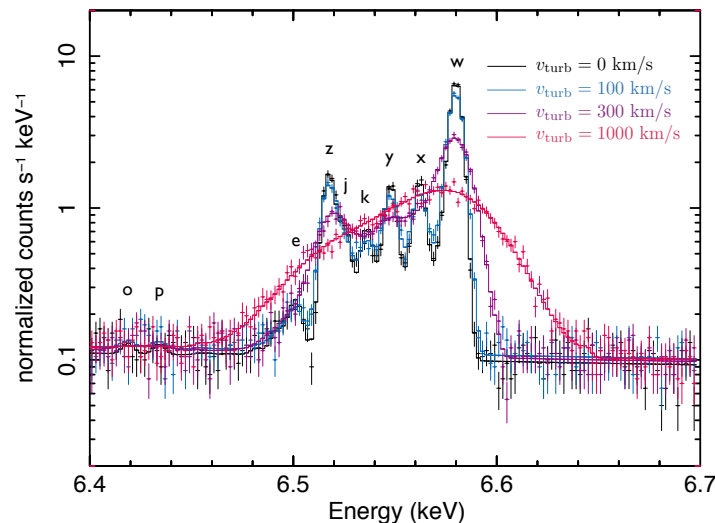
ASTRO-Hによる銀河団の観測



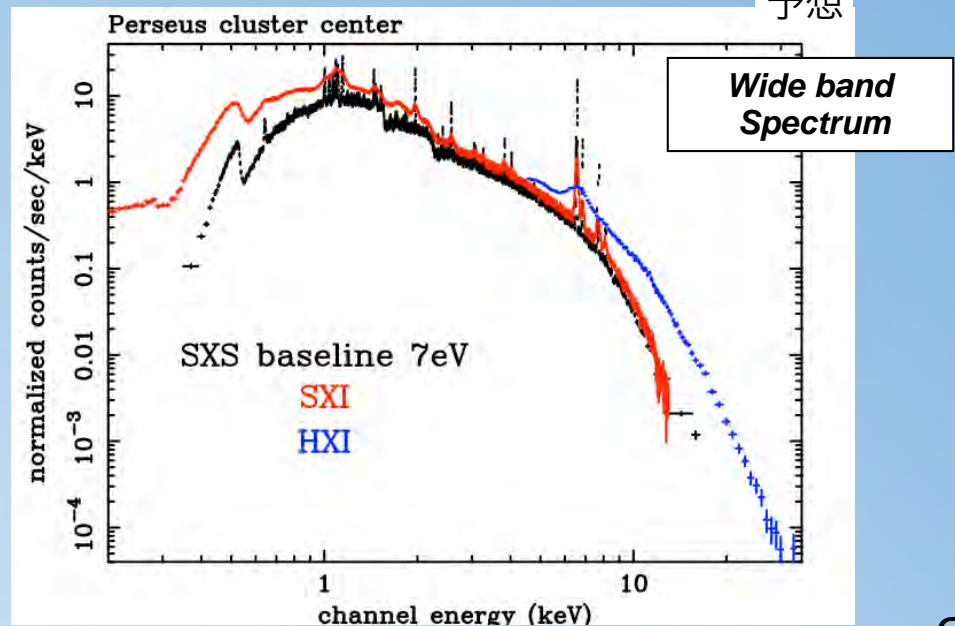
- マイクロカロリメータの高いエネルギー分解能を生かし、ダークマターの井戸に閉じ込められた超高温ガスが放射するX線のドップラー計測を行い、高温ガスの速度や乱流の強さを始めて計測します。
- 銀河団の高温成分の有無や、加速された粒子からの放射はどのくらいエネルギーの高いX線（硬X線）が出ているか、から探ります

ペルセウス銀河団における乱流の検出

予想



予想



ASTRO-Hによる銀河団の観測

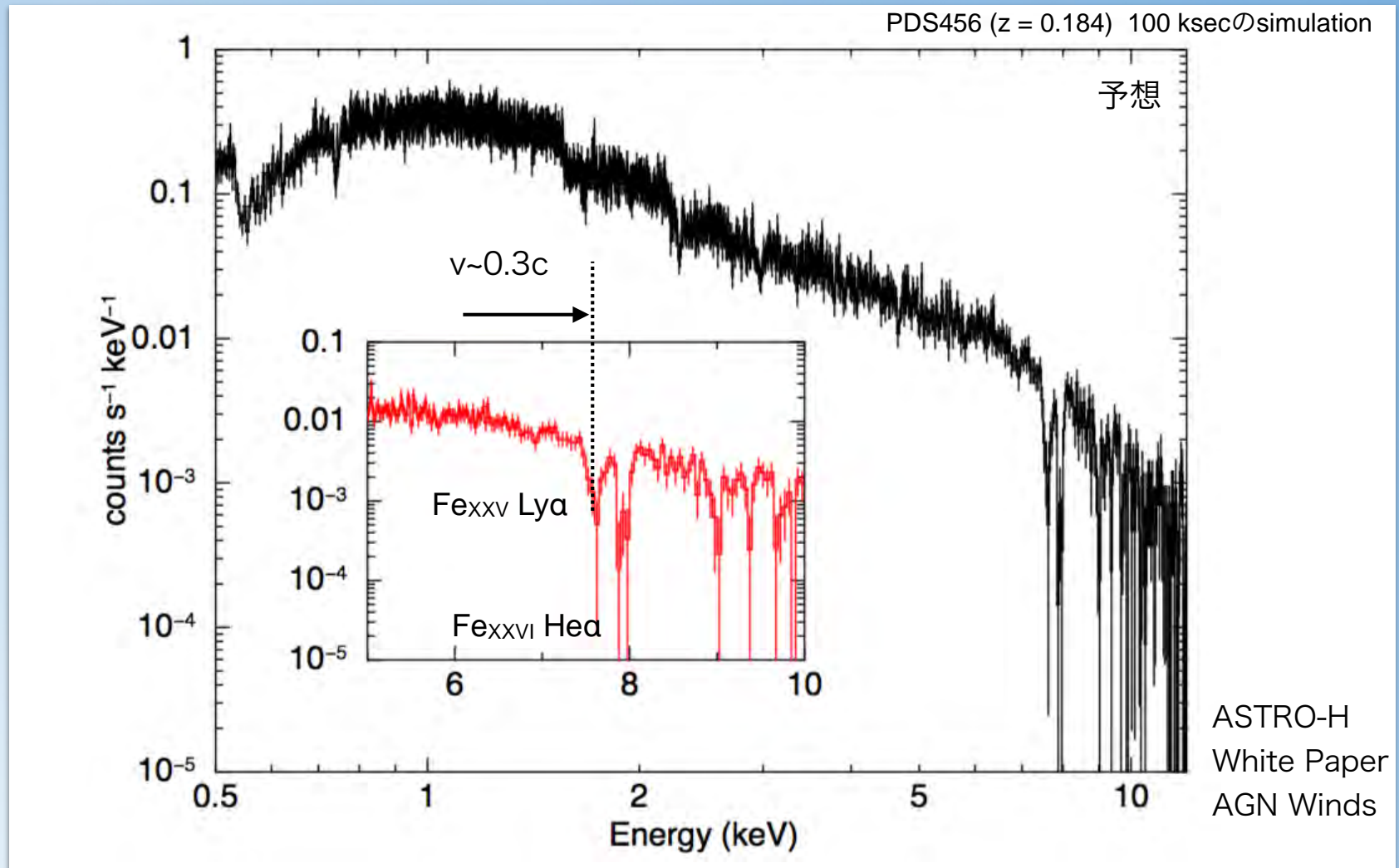
- 銀河団はダークマターの重力で形成された宇宙最大の天体であり、宇宙の構造形成の理解のために重要な天体である。ダークマターを含む銀河団の総質量(総エネルギー)を、距離(年代)ごとに測ることで、銀河団の成長、ひいては宇宙の構造進化や宇宙を満たす暗黒エネルギーの本質に迫ることができる。その際、従来のX線観測で行われてきた熱的エネルギー(銀河団の平均温度の測定)だけでなく、乱流や衝突などのバルクな運動エネルギー、宇宙線加速に分配された非熱的エネルギーの測定が必要である。ASTRO-Hは、広帯域のスペクトルからこれを探る。

銀河団総エネルギー = 熱的エネルギー + バルクな運動エネルギー + 非熱的エネルギー



巨大ブラックホールからの超高速アウトフローの観測

放射源(ブラックホール)から光の速度の数10%もの超高速で吹き出すプラズマ流の存在が最近発見された。ASTRO-Hで、どの位の量のプラズマがどれだけの速度で放出され、銀河の中にエネルギーを与えているかを調べる。



開発体制

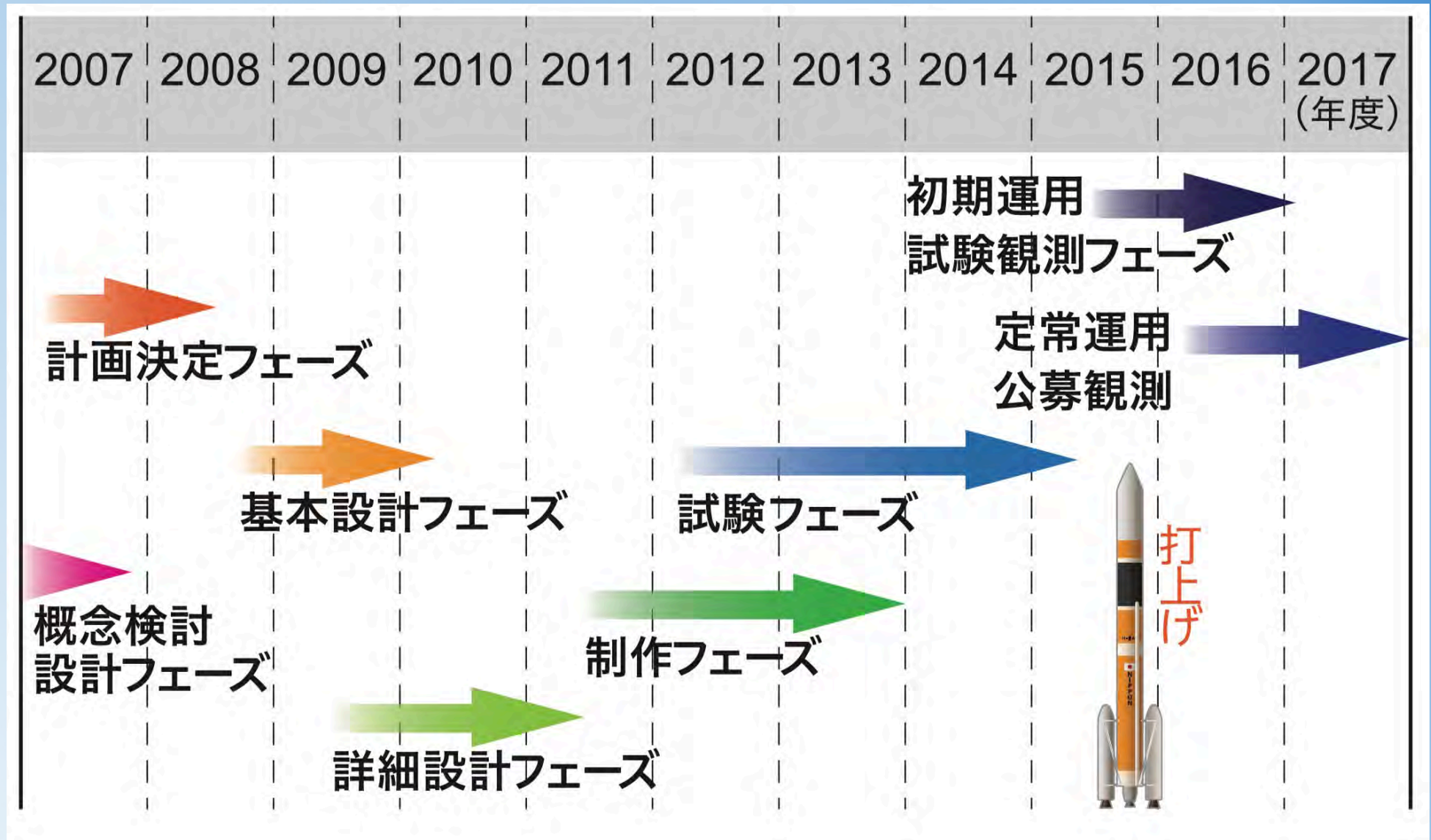


ASTRO-Hは大規模な国際協力で開発されており、JAXA、NASAをはじめとして、国内外の大学・研究機関の200名を超える研究者が開発に参加しています。また、研究者、大学院生、メーカーの技術者が一体となって開発に取り組んできました。

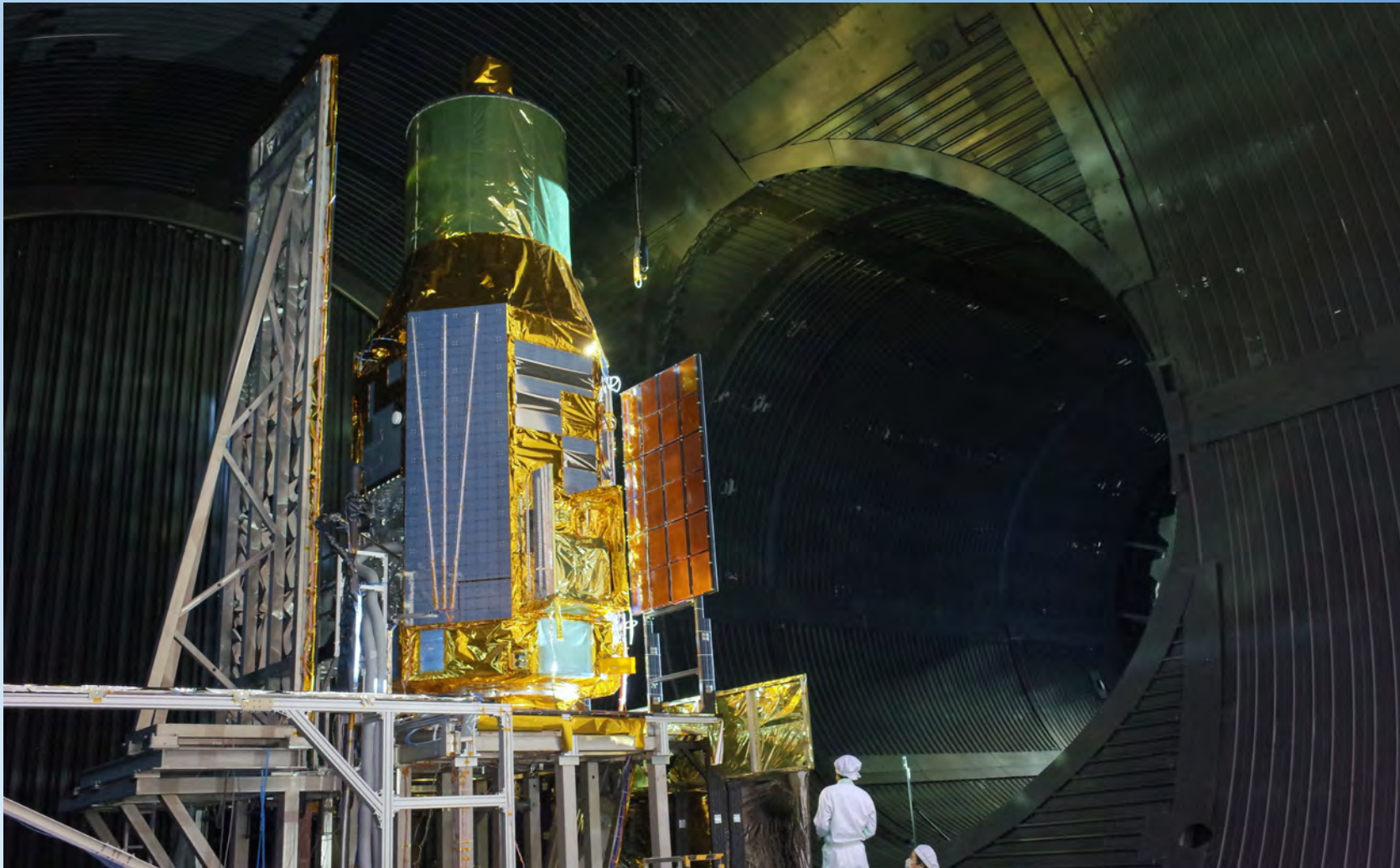
全体開発取りまとめ	JAXA
システム、バス系（光学ベンチを除く）、全体開発取りまとめ支援	NEC(日本電気)
バス系（光学ベンチ）	NIPPI(日本飛行機)

ミッション機器センサー、望遠鏡設計、開発	JAXA, 大学、海外機関
ミッション機器センサー製造	MHI (三菱重工業)
冷凍機、冷却系	SHI (住友重機)

ASTRO-Hミッションスケジュール(年度)



熱真空試験



ASTRO-H 熱真空試験

2015年6月24日から7月9日にかけて、ASTRO-Hの熱真空試験が、つくば宇宙センター 13mチャンバで実施された。熱真空試験の目的は、衛星を宇宙空間を模擬した環境にさらすことで、熱モデルの検証と、軌道上での観測機器の機能・性能を実証することである。写真は熱真空試験に向けて 13mチャンバに設置された ASTRO-H衛星。衛星に疑似ソーラ光を照射して事前チェックを行っている様子。

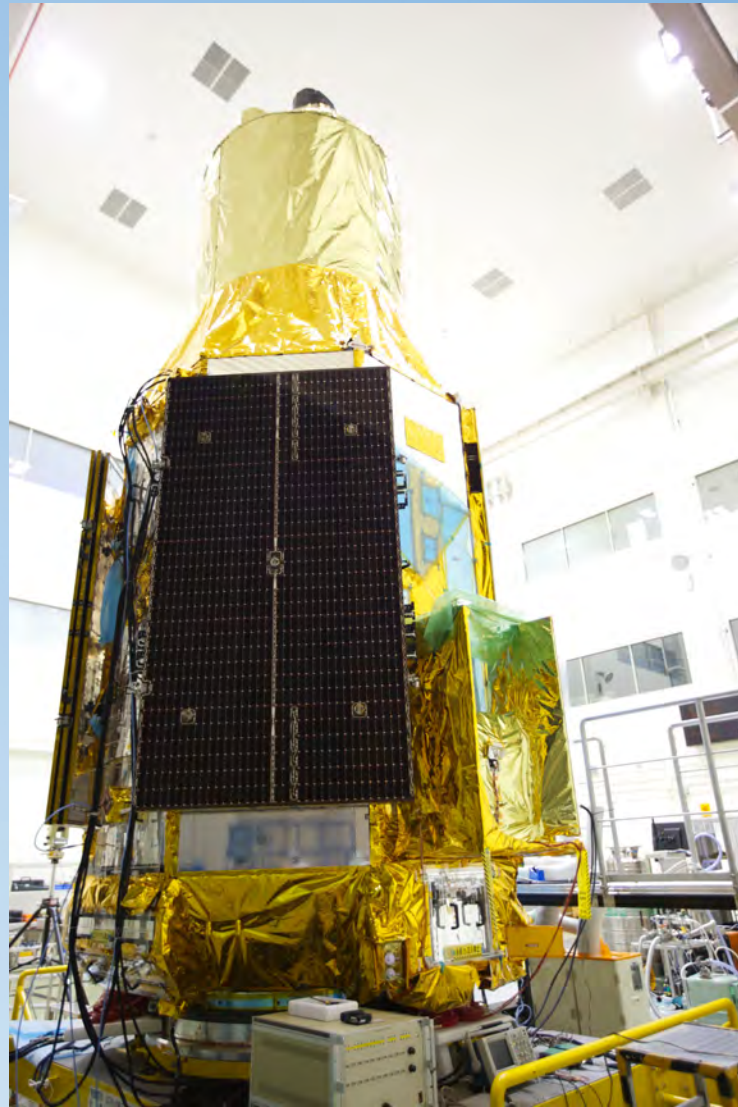
音響試験



ASTRO-H 音響試験

2015年8月27日に、ASTRO-Hの音響試験が、つくば宇宙センター 1600m³音響試験設備で実施された。音響試験の目的は、衛星構体及び搭載機器の高周波領域での耐振動性、搭載機器のランダム振動環境条件を確認することである。写真は音響試験室に設置された ASTRO-H衛星。加速度センサのつなぎこみなど、試験前準備を行っている様子。

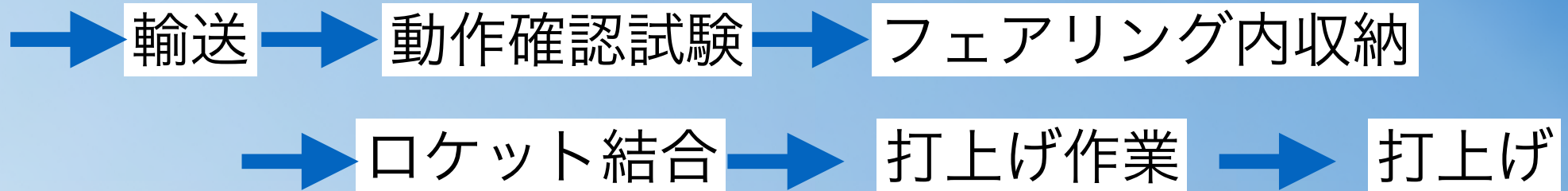
正弦波振動試験



ASTRO-H 正弦波振動試験

2015年8月29日から10月2日にかけて、ASTRO-Hの正弦波振動試験が、つくば宇宙センター大型振動試験設備で実施された。振動試験の目的は、衛星構造の動特性評価、打上げ時相当の振動荷重を負荷することによる強度評価を行うことである。写真は振動試験室の水平加振台に載せられた ASTRO-H衛星。約1ヶ月かけて、X,Y,Zの3軸に対して加振が行われた。

今後の予定



初期運用 (姿勢確立、バス系確立、観測装置立ち上げ)

1-1.5ヶ月

試験観測 (キャリブレーション天体観測)

1.5ヶ月

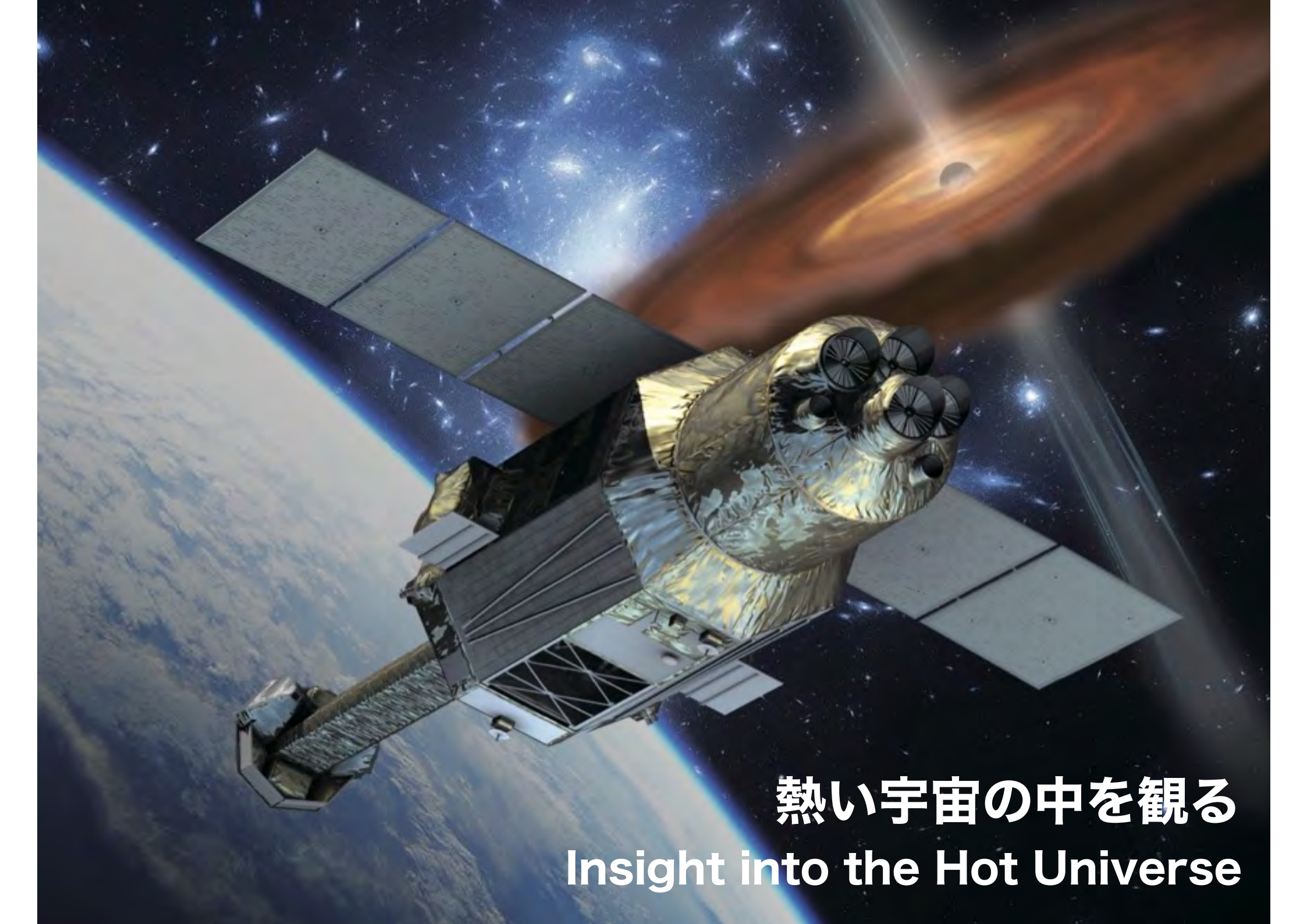
(性能確認 (PV) 天体観測)

6ヶ月

定常運用 (公募観測)



X-RAY OBSERVATORY
ASTRO-H



熱い宇宙の中を観る
Insight into the Hot Universe