

# X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」の 後継機の検討について

2016年7月19日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構  
宇宙科学研究所長 理事 常田佐久

- 前回6月14日に報告させて頂いた「X線天文衛星(ひとみ)の異常事象に関する小委員会報告書」の別添であるJAXA文書「X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」異常事象調査報告書」に記載した対策を実行するにあたって、より具体的な実行計画の検討をJAXAで進めている。
- 上記と並行して、X線天文学の今後のあり方についても、その科学的意義の再確認や国内外からの要請状況を通して検討を進めている。
- 今回は上記検討の中から、ASTRO-H後継機の検討状況について報告させて頂く。

# 前回宇宙開発利用部会後の取り組み

- 前回宇宙開発利用部会の『X線天文衛星「ひとみ」異常事象に関する報告書』で報告した以下の対策について、具体的な取り組みを実施している。
  - ① プロジェクトマネジメント体制の見直し
  - ② 宇宙科学研究所と請負業者の役割・責任分担を見直し
  - ③ プロジェクト業務の文書化と品質記録の徹底
  - ④ 審査や独立評価の運用の見直し
    - 宇宙研のプロマネ経験者等による6回の検討会を実施し、さらに、宇宙研全員との意見交換会を開催(7月8日)。
    - 上記対策を着実に実行するため、全社横断で取り組んでいる。
- 高エネルギー宇宙物理連絡会(X線天文学研究者の団体)が宇宙理工学合同委員会にてASTRO-H喪失に対するコミュニティとしての総括について言及。(7月11日)

# ASTRO-Hの意義 (1/2)



## (日本の強みの継続と他波長天文台との連携)

- 日本は1979年からこれまでにX線天文衛星を6機打上げてきた（補足資料参照）。その時々において他国の衛星にはない特徴をもち、後年のX線天文学の方向性を決めるような観測装置を搭載し、宇宙の謎の一端を解明する多くの科学的成果をあげるなど、トップラナーとして世界のX線天文学を牽引してきた。（関連する査読付論文数は約3500編を超える）
  
- ASTRO-Hは、我が国のこれまでの実績と能力を基に、日本がリードする国際協働プロジェクトとして、従来より広帯域かつ10倍以上の感度を持つ検出器を開発して、宇宙の大規模構造とその進化の様子を捉え、その成長を支配していると考えられている暗黒物質の謎や銀河とブラックホールの共進化の謎に挑む目的であった。
  - ・ 宇宙の大規模構造とは、宇宙は銀河、銀河群、銀河団と階層構造を持ち、密度の高い領域と低い領域が分布し、互いに繋がりにあることをいう。宇宙の誕生より、小さなもの同士が衝突・合体を繰り返し、より大きな構造へと成長してきたと考えられており、これらの構造の中で最大のものが「銀河団」と呼ばれ、銀河、高温ガス、ダークマターなどから構成される。
  - ・ 暗黒物質（ダークマター）とは、光などの電磁波は出さないが重力を持つことから間接的にその存在が示唆されている謎の物質のことをいう。宇宙で暗黒物質がどのように分布し、その正体が何であるかは、現代物理学の最大の謎の一つである。暗黒物質ともう一つの謎である暗黒エネルギーの総量によって宇宙の運命が決まる。

# ASTRO-Hの意義 (2/2)



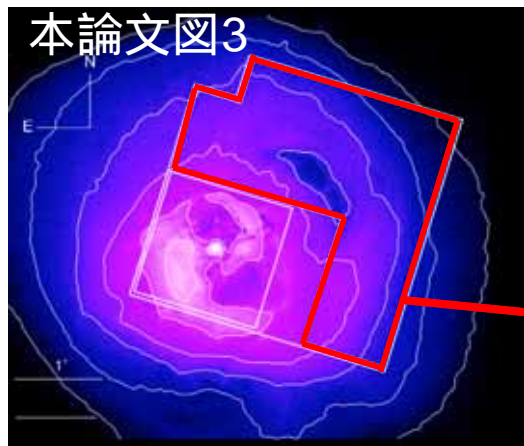
(日本の強みの継続と他波長天文台との連携)

- 2010年代後半には、ALMA(サブミリ波)、ハッブル宇宙望遠鏡の後継のJWST衛星、ガンマ線衛星Fermi、2020年代には、すばる望遠鏡後継のTMTなどの、次世代の大型天文台、あるいは衛星が稼働することになる。ASTRO-Hには、X線領域において上述の望遠鏡群と伍して研究を行える能力と規模を有する唯一の国際計画としての役割が期待されていた。
- 銀河団中の高温ガスの運動や非熱的エネルギーの研究、遠方銀河団のダイナミックな進化の解明、厚いガスに含まれた巨大ブラックホールの進化と銀河形成の関連、超新星残骸などでの宇宙線加速の研究では、ASTRO-Hによる超高分解能分光や広帯域でのX線観測が必須である。このような新しい観測結果により、X線天文学のみならず、宇宙物理学全体に大きなインパクトを与えることができる。別の言い方をすると、極限状態での物理現象の解明や、そこでの物理法則の検証を通して「物理学の発展」に寄与することができる。
- ASTRO-H初期運用（3ヶ月と想定）後の試験観測期間における最初の6ヶ月間に対しASTRO-Hプロジェクトサイエンスチームから84件の観測提案がされていたが、衛星喪失までに観測できたものは3提案のみ（他に較正目的で3観測を実施）ではあるものの、次頁に示す成果が得られている。

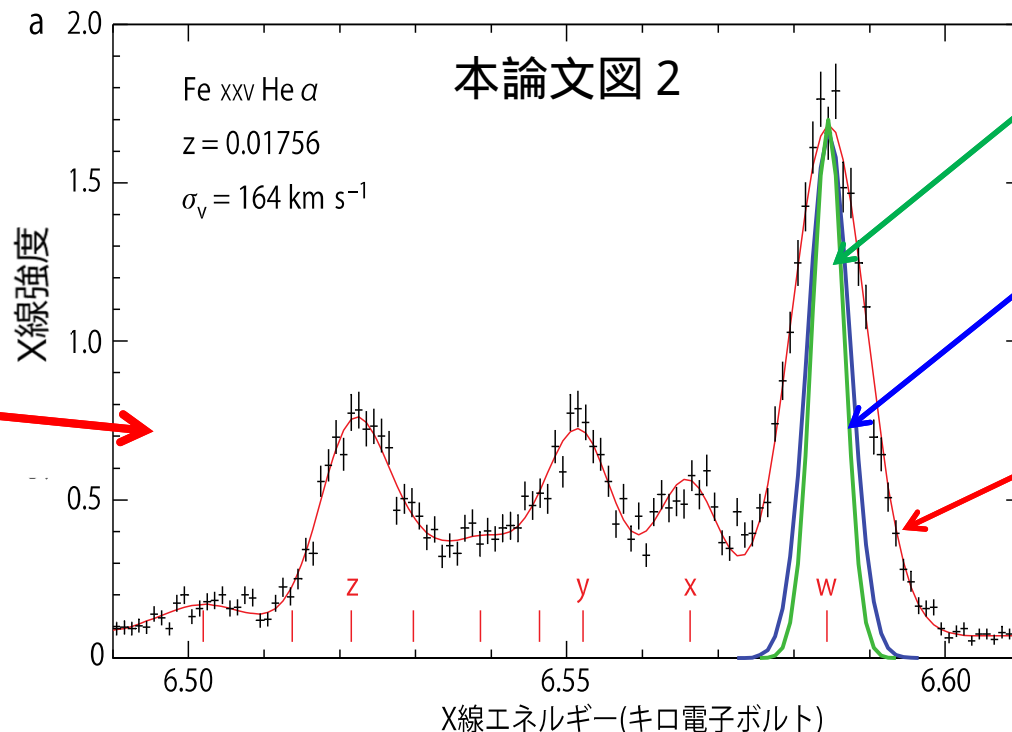
# ASTRO-H成果： Nature (7/7付け) 掲載論文要旨



- ASTRO-H搭載の軟X線分光検出器は、要求値を上回る優れた分光性能を達成。
- ペルセウス座銀河団中心領域を観測。超巨大ブラックホールから吹き出す高エネルギー粒子の泡が、ガスの激しい乱雑運動を引き起こしていると言われていた。
- 高階電離した鉄の特性X線の幅を測定し、ガスの乱雑運動の速度を求めたところ、予想外に静かなことが判明した(視線速度150-200 km/s)。
- 超巨大ブラックホールによるガスの加熱という、長年の課題を解く重要な手がかりが得られた。
- ダークマターの質量推定にガスの乱雑運動の影響が小さいことを初めて示した。



本論文図3  
チャンドラ衛星画像と  
検出器の視野



本論文図2

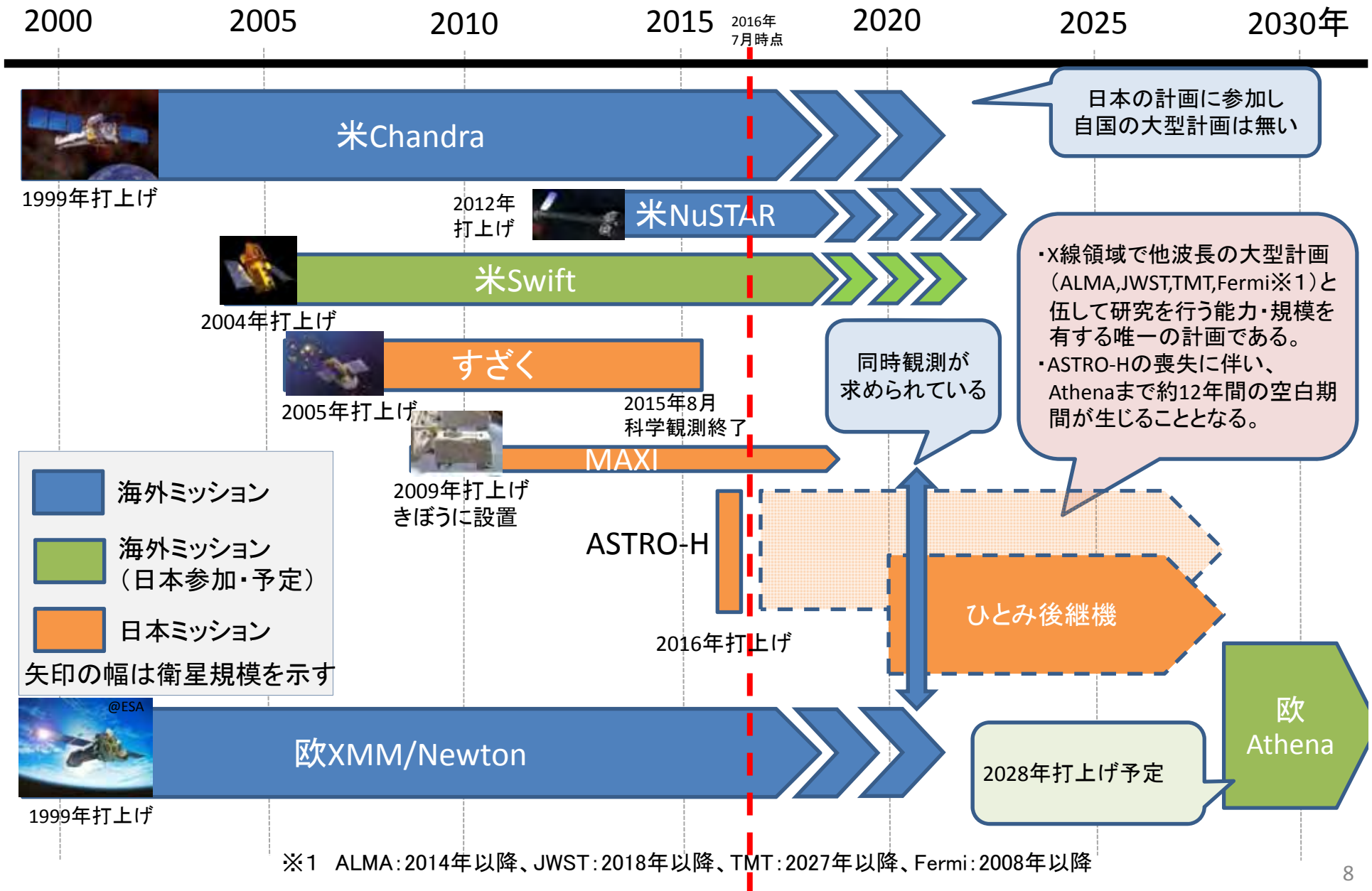
ガスが静止している時  
鉄イオンの熱運動 (80km/s)  
熱運動(80km/s) + ガスの乱雑な運動(164km/s)

# 現在のX線天文衛星の状況と国際的期待

- これまでの日本のX線天文学の実績と能力を基に、NASAやESAは2010年代は自国の独自の計画でなくASTRO-Hに国際協力に参加することを選択しており、ASTRO-Hには、世界唯一の大型X線天文衛星としての活躍が期待されていた。
- X線分野では、「すざく」衛星が2015年8月に科学観測を終了した。2016年7月現在、Chandra, XMM-Newtonの衛星が運用中であるがすでに稼働年数が15年以上と長く、検出器の劣化も見られる。米NuSTAR衛星は2012年打上げで新しいが、硬X線の波長域に特化した衛星である。
- 次の大型X線天文衛星計画は、欧州主導で計画しているAthena(2028年打上げ目標)まで無い。すなわち、2010年代後半の他の波長での大型観測が始まる大事な時期にX線天文学の最も重要な部分が空白期となってしまう。(次ページ線表参照)。
- ALMA(電波地上望遠鏡)は日米欧国際協力、米国はFermi(ガンマ線衛星)とJWST(可視・赤外衛星)など、X線以外の波長は日本以外の国が主導し、国際協力と競争のなかで観測が実施されている。観測センサー等の開発の技術を維持し続けるためにも、我が国の強みであるX線観測において我が国が主導的に開発をすることは必須である。

# 世界のX線天文学将来計画

2016年7月現在、  
Chandra, NuSTAR, Swift, XMM/Newton, MAXIは、  
いずれも2018年までの運用延長予定





# 今後の対応について



- ASTRO-Hに搭載された機器、特にSXS(軟X線分光計)について初期観測データは素晴らしく、軌道上性能が実証されており、継続的に観測できれば数多くの科学的成果の創出が可能であった。
- ASTRO-Hの試験観測成果は、すでにNature誌(2016/7/7号)に掲載されるなど、その超高分解能分光能力は圧倒的な性能を持つ。今後も、Nature級の論文が、何編かは期待できる。打上げ前に掲げていた目標はもちろん、それ以上の成果が現実味を帯びてきており、国際的な期待も高い。
- 現代宇宙物理の基本的な課題である宇宙の構造と進化にかかる数々の謎の解明に資することを目的とした、ASTRO-H同様にX線超精密分光による高感度観測を実現するミッションの意義は、さらに高くなったと考えられる。
- 国内外の宇宙物理学の意義を踏まえ、ひとみ喪失に伴うX線領域観測12年の空白を埋める為に、ASTRO-Hの超高分解能分光性能を活かすことに基本とした後継機を速やかに製作して、目指していた科学的成果を早期に創出することが重要と考えている。また、人材育成等の観点からも速やかにX線領域の観測を行い、空白期を短くする必要がある。
- 海外機関(NASA・ESA)は、ASTRO-Hと同様の役割分担で参加する計画である。
- 実行に当たっては調査報告書の対策を具体化して確実に反映する。

# ASTRO-H後継機の概要(案)



- 打上スケジュール 2020年打上げ目標
- 機体規模 H2A打上げ
- 軌道 地球周回円軌道

- ミッション  
軟X線分光検出器(SXS)を中心とする。

- 設計  
早期かつ確実な設計・製造を目的とするため、再製作を基本としつつ、ASTRO-Hの対策を取り込む。

軟X線望遠鏡 (SXT-S)  
軟X線望遠鏡 (SXT-I)



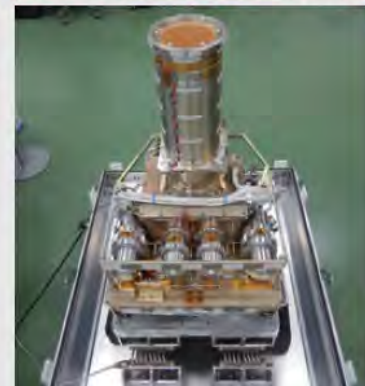
可視光の望遠鏡のレンズに対応するX線望遠鏡。ただし可視光の場合とは違い、1000枚以上の反射鏡を用いて、同心円状に200層以上並べた構造をしています。口径は45cm、焦点距離は5.6 mです。

軟X線

軟X線分光検出器(SXS)



軟X線撮像検出器(SXI)



# ASTRO-H事故を踏まえた設計見直し



## 『システム設計』

最先端の科学観測を実施しつつも、安全を重視したロバストなシステム設計を行う。

## 『ASTRO-H総点検』

ASTRO-Hの開発・運用を振り返り、その反映事項を抽出して適切に取り組む。

## 『姿勢制御系ソフトウェア』

ASTRO-Hの直接原因に対して複合的な対策を施し、慣性基準装置(IRU)バイアス誤差の推定値が高止まりが起こらない設計とする。



## 『太陽角異常検出条件』

十分広い視野の粗太陽センサを採用する等、セーフホールド姿勢移行の太陽方向異常検知に、姿勢決定系推定姿勢以外の情報を用いる設計とする。

## 『運用』

運用準備を確実にするための共通的な支援部門や「運用準備作業のガイドライン」を定義する。運用準備状況を打上1年前から確認し、最終的には第三者の視点も含めて審査する仕組みを構築する。

# 補足資料

# X線天文学の意義



- 宇宙の包括的理解には、様々な物理現象が特徴的にあらわれる様々な波長での観測が必要である。(次ページの概念図を参照)。
- X線は電磁波(光)の一種で可視光の1000倍ものエネルギーを持ち、透過力が極めて強いが、地球大気には吸収されるため、観測は衛星軌道上でのみ可能。
- X線で宇宙を観測することで、ブラックホールに吸い込まれようとする物質や、銀河団のダークマターに捉えられた物質など、数千万度の超高温物質がはじめて見える。実際、宇宙で我々が観測できる物質の80パーセントは高温状態にあり、宇宙の全貌を知る上で、X線観測は不可欠の手段であり、現代宇宙物理学の基本的課題である宇宙の構造と進化に関わる数々の課題の解明に挑むことができる。
- 1962年にアメリカの宇宙物理学者が観測ロケットでX線検出器を打上げ、予想をはるかに起える強いX線を世界で初めて観測した(この功績によりノーベル物理学賞授与)。その後の約50年間を経て、宇宙の全貌を知る上ではX線観測が不可欠の手段と考えられるようになり、X線天文学は宇宙物理学の重要な一分野に成長した。
  - 1971年には日本の研究者がX線天体「はくちょう座X-1」がブラックホール(周囲の物質を引き込むときに強烈なX線を放射)であることを示す論文を発表。それまで理論的予測に過ぎなかったブラックホールが宇宙に実在する天体であることを、世界で初めて観測結果で示した。

# X線天文学の意義



(宇宙の構造の進化の解明に向けた多波長観測の必要性とX線観測の特徴)



大規模構造は宇宙の進化とともに成長

# 日本が打上げた過去のX線天文衛星の観測実績とASTRO-H衛星の狙い



※論文数は、はくちょう・てんま・ぎんがは過去資料調べ。(2014年9月現在)  
あすか・すぎくはトムソン・ロイター社“Web of Science”データベースを用いたISAS集計。

名称	打上げ・運用停止年	査読付論文数	主な観測成果
はくちょう 	1979年(打上げ) 1985年(運用停止)	26	ブラックホール天体「白鳥座X-1」にちなんで命名された、日本初のX線天文衛星。小田稔博士(1971年ブラックホール論文の著者、後に宇宙研所長)が発明した「すだれコリメータ」の搭載により、X線天体の天空上の位置を高精度で決定できるようになった。これにより新たなX線バースト源を数多く発見して国際的に高い評価を受け、我が国のX線天文学を一気に世界トップレベルへと押し上げた。
てんま 	1983年(打上げ) 1988年(運用停止)	53	新開発のガス蛍光比例計数管によりエネルギー分解能を2倍以上に向上させて、X線天体の本格的な分光観測の道を拓いた。主な成果は、我々の銀河系の銀河面に沿って存在する超高温プラズマからのX線放射(銀河リッジ放射)の発見など。この銀河X線放射の起源と正体の解明を目指して、後続衛星では必ず観測が行なわれるなど、現在まで続くX線天文学の重要研究課題の一つとなった。
ぎんが 	1987年(打上げ) 1991年(運用停止)	448	当時最大級の面積を持ち高感度でX線天体を観測できる新たな観測装置を搭載。主な成果は、観測開始直後の超新星1987A※のX線検出成功や、多数のブラックホール候補天体の発見等である。この衛星から観測機器を海外研究者と共同開発するなど、国際協力が本格的にスタートした。 (※近傍銀河で4半世紀ぶりに発生した超新星だった。同じ超新星爆発から小柴昌俊博士が岐阜県のカミオカンデを用いてニュートリノを検出し、後にノーベル物理学賞を授与された。)
あすか 	1993年(打上げ) 2001年(運用停止)	2,287	日本で初めての本格的X線望遠鏡や世界初のX線CCDカメラ等を搭載したことにより、感度を飛躍的に向上。主な成果は、活動銀河核から放射されるX線に、ブラックホール近傍の一般相対論的效果によると考えられる特徴を発見し、銀河中心部に超巨大ブラックホールが存在することを支持する初めての直接的証拠を得た。また国際公募観測も初めて開始した。全観測データは世界中の研究者に公開・利用されており、論文数が飛躍的に増えることとなった。
すぎく 	2005年(打上げ) 2015年(科学観測終了)	681	「あすか」よりもさらに感度を高めたX線望遠鏡と広帯域をカバーする観測装置を搭載。主な成果は、超新星残骸中の電離非平衡プラズマの検出、衝撃波による宇宙線加速機構の研究、X線反射星雲の発見、厚いガスに埋もれた活動銀河核の発見、銀河団外縁部での重元素分布の観測による銀河団の進化の解明、マグネター(超強磁場中性子星)の放射機構の研究、などである。
ASTRO-H ひとみ 	2016年2月(打上げ) 2016年3月運用停止	—	従来より広帯域かつ10倍以上の感度を持つ検出器を開発して、宇宙の大規模構造とその進化の様子を捉え、その成長を支配していると考えられている暗黒物質の謎や銀河とブラックホールの共進化の謎に挑む。