

# X線天文衛星—ASTRO-H—

## 高橋 忠 幸

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉  
e-mail: takahasi@astro.isas.jaxa.jp



X線天文衛星ASTRO-Hはすざく衛星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名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。大規模な国際協力で開発された4種類の新型観測システムにより、すざく衛星に比べて、1/10から1/100の明るさの天体の分光観測が可能である。また、初めて、X線マイクロカロリメーターが搭載され、超新星残骸や銀河団などの高温プラズマの化学組成や原子状態を正確に決定するばかりではなく、ドップラー分光によりその運動を高い精度で明らかにする。

### 1. はじめに

日本の主導によって開発が進められてきたX線天文衛星ASTRO-Hが完成に近づき、2016年初頭には打ち上げられる予定となっている(図1, 2)。ASTRO-H衛星は、X線マイクロカロリメーターによる超高分解能分光観測、硬X線望遠鏡による80 keVまでの撮像分光観測、そして0.3 keVの軟X線から600 keVの軟ガンマ線までカバーする高感度広帯域観測によって、2010年代後半の高エネルギー天文学を牽引する役割を担う<sup>1), 2)</sup>。特に、超高分解能分光観測による乱流を含めた高温プラズマの運動学の研究、そして広帯域観測による非熱的放射の観測を通じた粒子加速現象の研究に新しい展開が期待される。

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明らかにした。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発見して、人類の宇宙観を変えたといえる。今や、X線による宇宙観測は宇宙に存在する通常物質(バリオン)の8割以上を直接調べることができるとともに、銀河の中心にあり、銀河

とともに成長する巨大ブラックホールの形成などの高エネルギー過程を私たちに教える極めて重要な手段であるとみなされている。

宇宙は約138億年前に始まり、ビッグバン直後の火の玉のような、ほぼ一様な宇宙から、星、銀河、銀河団といったさまざまな構造をもつ現在の宇宙に、ダイナミックに膨張しながら成長を続けてきた。現代科学において、こうした宇宙の構造が、太古の密度揺らぎから、どのように進化してきたかを探るのは、基本的な課題の一つである。また、地上では実現できないような極限的な物理環境、ブラックホールの近傍の重力場、中性子星



図1 ASTRO-H衛星の軌道上想像図。

の超高密度と超強磁場、超新星残骸や活動銀河核ジェットにおける超高エネルギー粒子（宇宙線）の生成現場など、X線でこそ探ることが可能な物理学の未開拓フロンティアが、宇宙には豊かにあり、ASTRO-Hの挑戦するテーマとなる。

## 2. ASTRO-H衛星開発プロジェクト

わが国は、約50年前のX線天文学の発祥より、「はくちょう」、「てんま」、「ぎんが」、「あすか」、「すざく」と、特徴のある衛星を連続的に打ち上げ、国際的に大きな役割を担ってきた。わが国で6番目のX線天文衛星となるASTRO-Hは、X線天文学の分野で世界をさらにリードし、宇宙科学の分野に新たな流れを作るために提案された。2003年に最初の提案が行われ（当時はNeXT衛星）、2005年の二度目の提案が採択された。2007年のJAXAプリプロジェクト化を経て、2008年にプロジェクトとして開始された。プロジェクトの主な推移を表1に示す。

日本の動きに並行するように、2007年にNASAの“Mission of Opportunity in the Explorer Program”が通り、マイクロカロリメーターと軟X線望遠鏡、さらにパイプライン処理などのソフトウェア開発を米国が担当する形で大掛かりな国際共同プロジェクトが開始された。また、2009年には、JAXA、NASA、ESAのそれぞれの宇宙機関から、サイエンスアドバイザーが公募され、13名の研究者が選ばれた。

同じ2009年に、オランダのSRONがスイスのジュネーブ大学とともに参加し、軟X線分光検出

器（SXS）の軌道上キャリブレーション装置とフィルターホイールを担当することが正式に決まり、また、設計を進めていく過程で、硬X線望遠鏡のアライメント計測が必要となったことからカナダがその装置を供給することとなった。2011年に、ESAがさらに、各搭載装置に貢献することになり、フランスの協力も加えて、国際協力の形態が確定した。

ASTRO-Hは、国内では34、海外を合わせると61もの大学や研究機関が参加した極めて大掛かりなコラボレーションを実現している。プロジェクトを開始した段階から、ハードウェア開発、ソフトウェア開発、サイエンス検討、教育・広報（EPO）などから、新たに導入した衛星内ネットワーク標準SpaceWireを用いた衛星アーキテクチャー設計などのバス系に至るまで、きちんと役割分担を決め、全員参加でプロジェクトを実施する体制をとった。

## 3. 搭載装置と期待される科学成果

日本が、これまで打ち上げたX線天文衛星は、天体が放射するX線について、広い範囲のエネルギースペクトルを精密に分解することで、発生源の物理状態を明らかにしてきた<sup>3)</sup>。巨大ブラックホールの強い重力場のために一般相対論の効果で歪められた鉄輝線、濃いガスに包まれた成長途中の活動銀河核、銀河団プラズマ中での重元素の空間分布の解明、超新星残骸で宇宙線が加速される様子など、多くの発見を行い、日本のX線天文学が、世界の高エネルギー天文学コミュニティーにもたらした成果は数知れない。

ASTRO-Hでは、軟X線領域に2台、硬X線領域に2台、合計4台のX線望遠鏡が搭載される。軟X線望遠鏡（SXT）の焦点面検出器の一つとして、マイクロカロリメータ<sup>4)</sup>が搭載され、7 eV以下という、半導体に比べ1桁よいエネルギー分解能を持つセンサーが、非分散系として初めて実現される。これがSXSである。このセンサーを実

表1 ASTRO-Hプロジェクトの推移。

2003	第1回提案（NeXT衛星）
2005	第2回提案（NeXT衛星）
2008	JAXA ASTRO-Hプロジェクト発足
2010	基本設計終了（PDR）
2012	詳細設計終了（CDR）
2014	一次噛み合わせ試験終了
2014	総合試験開始（11月より）

表2 ASTRO-Hの搭載観測装置.

諸元	軟X線 分光検出器 (SXS)	軟X線 撮像検出器 (SXI)	硬X線 撮像検出器 (HXI)	軟ガンマ線検出器 (SGD)
検出器	micro calorimeter	X-ray CCD	Si/CdTe cross-strips	Si/CdTe Compton camera
焦点距離	5.6 m	5.6 m	12 m	—
有効面積	210 cm <sup>2</sup> @6 keV 160 cm <sup>2</sup> @1 keV	360 cm <sup>2</sup> @6 keV	300 cm <sup>2</sup> @30 keV	>20 cm <sup>2</sup> @100 keV Compton mode
エネルギー範囲	0.3–12 keV	0.4–12 keV	5–80 keV	60–600 keV
エネルギー分解能 (FWHM)	<7 eV (@6 keV)	<200 eV (@6 keV)	2 keV (@60 keV)	<4 keV (@60 keV)
角度分解能	<1.3 arc min	<1.3 arc min	<1.7 arc min	—
Effective field of view	~3×3 arc min <sup>2</sup>	~38×38 arc min <sup>2</sup>	~9×9 arc min <sup>2</sup>	0.6×0.6 deg <sup>2</sup> (<150 keV)
時間分解能	5 μs	4 s/0.1 s	25.6 μs	25.6 μs

現するために、50 mKという極低温環境を軌道上で実現するための冷却システムが新たに開発された。これを補完し、10 keV以下で汎用の撮像と分光を行ない、38分角の広い視野をカバーするのが、SXTと国産X線CCDカメラ (SXI) の組み合わせである。

数keV以上から約80 keV までのエネルギーでは、12 mの焦点距離をもつ、多層膜を利用した硬X線望遠鏡 (HXT) の焦点面に、シリコンやテルル化カドミウム (CdTe) の両面ストリップ検出器からなる硬X線撮像検出器 (HXI) が設置されている。さらにシリコンとテルル化カドミウムのイメージング検出器を多層に段重ねし、コンプトン運動学を利用して40–600 keVのエネルギー範囲を受けもつのが、軟ガンマ線検出器 (SGD) である。HXIとSGDの両者とも「すざく」に搭載された硬X線検出器 (HXD) の流れを汲み、結晶シンチレータのアクティブシールドで徹底したバックグラウンドの削減を図っている。この結果、硬X線から軟ガンマ線の領域で、すざく衛星の1/10から1/100の明るさの天体の観測が実現する。また、SGDでは、コンプトン散乱の散乱角の分布を用いた偏光観測も可能である。搭載観測装置の一覧を表2に、また、その写

真を図2にまとめる。

ASTRO-Hは、 $\Delta E \leq 7$  eVというこれまでより30倍も優れたエネルギー分解能をもつマイクロカロリメーターを搭載することで、高温ガスの原子状態を正確に決定するばかりではなく、ドップラー分光により高温ガスの運動を高い精度で明らかにする (図3, 4)。硬X線から軟ガンマ線の領域でも、すざく衛星の1桁以上も高い感度をもつ (図5)。そのため、プラズマの運動とそれによる加熱、そして、粒子加速の両面からダイナミカルな天体現象を調べることが初めて可能になるのである。これは、X線天文学において、これまで宇宙や天体の姿を静止画として見ていたのに比べ、運動すなわち動画を見ることに相当する進歩であり、宇宙の進化を探るうえで極めて重要な役割を果たす。

プロジェクト移行時に、ASTRO-Hが目指すべき科学目的として定義された五つの項目を表3に示す。われわれは、搭載する装置の性能がほぼ確定した段階で、これらの装置の性能を最大限に生かして行うべき観測の具体的な戦略の立案作業をチームを挙げて行った。そして、その結果を、天体の種別やそれらを横断した科学テーマごとに16編の論文 (White Paper) としてまとめ、昨年

表3 ASTRO-Hの科学目的（提案書から）.

- 1 銀河団という宇宙最大の天体におけるエネルギーと物質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ことで、膨張宇宙の中での構造形成の理解に取り組む。
- 2 遠方（過去）の銀河の中心に隠された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。
- 3 ブラックホールのごく近傍の物質の運動を測定することで、相対論的な重力による時空の歪みを明らかにする。
- 4 宇宙に存在する超高エネルギー粒子（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。
- 5 距離（年齢）の異なる銀河団内の暗黒物質の分布と総質量を測定し、銀河団の進化に果たす暗黒物質と暗黒エネルギーの役割を探求する。

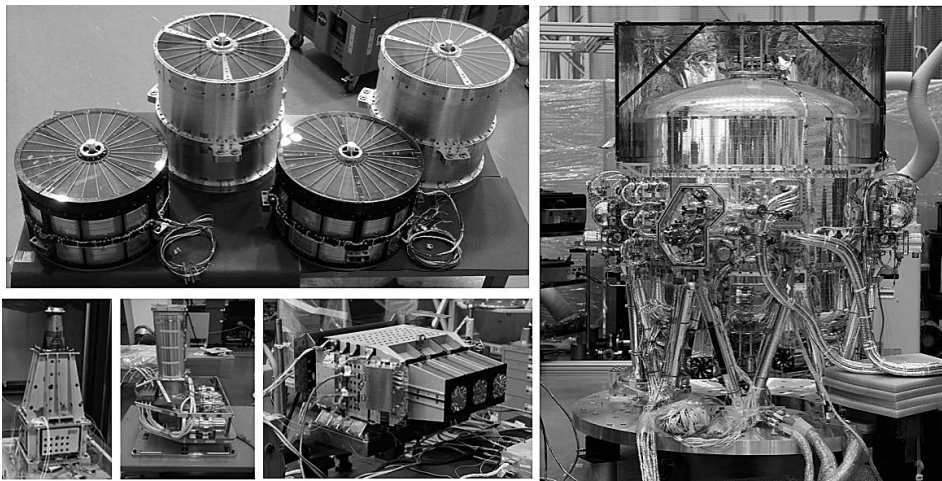


図2 ASTRO-H搭載の搭載観測装置の写真。左上から時計回りに、軟X線望遠鏡（SXT）と硬X線望遠鏡（HXT）、50 mKの極低音環境を実現するSXS Dewar, 軟ガンマ線検出器（SGD）、軟X線撮像装置（SXI）、硬X線撮像分光装置（HXI）。

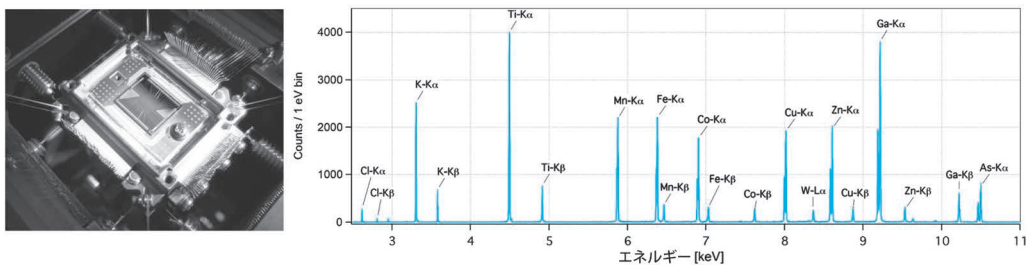


図3 SXSに搭載されたマイクロカロリメーターのセンサーと、それを用いて取得された36ピクセルをまとめたX線スペクトル。エネルギー分解能として約5 eVが実現している（NASA/GSFC提供）。

末に公開した<sup>5)</sup>。

#### 4. 衛星システム

ASTRO-Hプロジェクトは、H-IIA ロケットと

いう大型ロケットの飛翔機会を活用することで、これまでに比べて、大型の衛星に最先端の観測装置を搭載し、それによって大きな成果の創出を目指したものである。ASTRO-Hは日本が今まで打

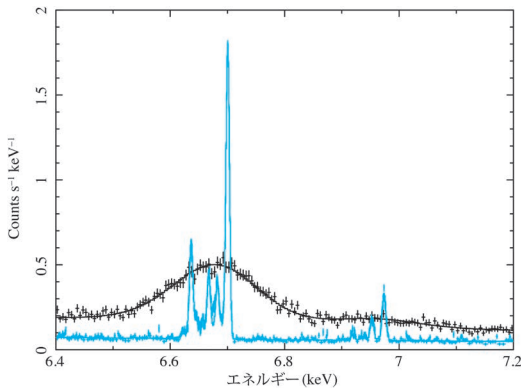


図4 A1795銀河団を100 ks, 観測を行った場合のASTRO-HのSXSとXMM-NewtonのPN検出器によるスペクトルの比較(シミュレーション). 5 keVの電離平衡プラズマを仮定.

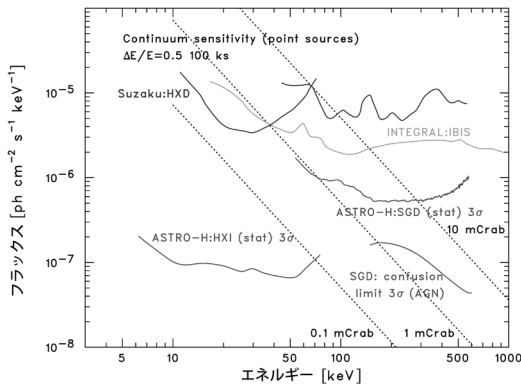


図5 硬X線領域から軟ガンマ線領域で期待されるASTRO-H衛星の感度. エネルギー分解能の二倍のエネルギー幅での到達感度.

ち上げたX線天文衛星の中で、最も規模が大きく、重量約2.7トン、宇宙での観測モード移行時には約14 mの長さには達する(図6, 表4)。一方で、観測系の大型化、高精度化に伴い、衛星システムに対する要求も、より厳しいものになった。

ASTRO-Hでは50秒角の指向制御精度要求、7秒角の指向安定度要求が課せられた。さらに、同一の天体をすべての観測装置が同時に観測するために、5.6 mの焦点距離をもつ軟X線望遠鏡の焦点に置かれた約5 mm角のマイクロカロリメータのための望遠鏡と12 mの焦点距離をもつ硬X線

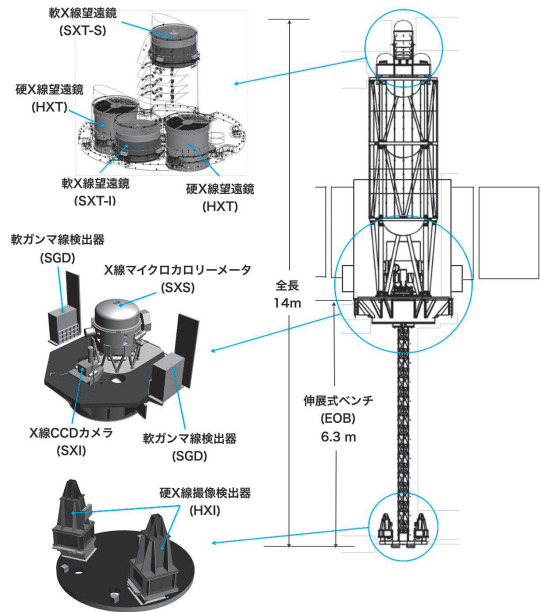


図6 ASTRO-H衛星の軌道上でのコンフィギュレーション.

表4 ASTRO-H衛星の諸元.

全長	14メートル(伸展ベンチ(EOB)伸展後)
重量	2.7トン
発生電力	3,500 W
予定軌道	円軌道, 高度約575 km
軌道傾斜角	31度
寿命	3年(要求, 目標は5年)

望遠鏡の指向軸(望遠鏡とセンサーをつなぐ軸)を合わせる必要がある。そのため、姿勢制御・姿勢決定の高精度化に加えて、固定式光学ベンチや伸展式光学ベンチの低熱歪化や内部擾乱源による指向軸変動への影響を最小限にする必要があった。これを実現するため、熱や構造の工学の研究者と一体となった設計が行われるとともに、その検証のために熱変形試験や微小振動試験などの試験が考案され、実施された。

これまでの科学衛星は質量などリソースの制約により、部分的な冗長系を採用するにとどまっていた。ASTRO-Hでは質量制約が緩和されたこと、および、複数の大型観測装置を搭載するとい

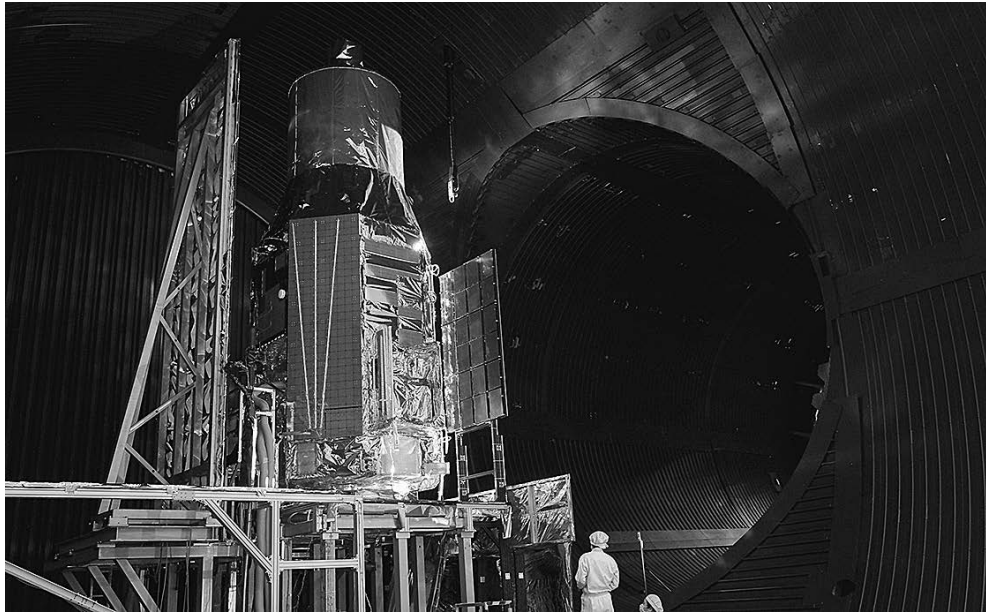


図7 熱真空チェンバーに搬入される ASTRO-H. 右側から太陽光を模擬した光が衛星に照射され、軌道上での熱真空環境を模擬した試験が行われた (2015年6月撮影).

う観点から、衛星バスに対して信頼性向上が要求された。そのため主要バスコンポーネントの並列冗長化を図った。その過程で、SpaceWire標準を用いた衛星アーキテクチャを新たに考案し、コンポーネントのモジュール化を行い、それらをネットワーク結合させることで、衛星全体の見通しの良い設計を保ちながら、並列冗長化を実現した。また、観測装置のデータ取得装置についてもSpaceWireを用いた標準化を図った。こうした新しい試みが効を奏し、観測装置の衛星上での動作を統一的に扱うことが可能になり、すざく衛星よりもはるかに規模が大きな衛星でありながら、衛星の電気試験に要する時間を同程度に保つことができた。ASTRO-H衛星で提案され、実証された方式は新しい国際標準規格に取り込まれると同時に、日本の科学衛星で広く使われることとなった。

## 5. おわりに

宇宙は人類の歴史の中で、数えきれないほどの

夢と謎とで人々をひきつけてきた。高度に科学が発達した現在であっても、宇宙の謎はむしろかつてないほどに深まっているといえる。宇宙の膨張が、ほとんど理解不可能な暗黒エネルギーなるものに支配され、巨大ブラックホールが驚くべき宇宙現象の数々を引き起こし、地上では到底達し得ないほどの超高エネルギーをもつ粒子が未知の場所で生成されることがわかってきている。

こうした謎への挑戦は、人類にとって新たな知の探求であり、究極的な技術と文化を人類にもたらす。ASTRO-H衛星は、21世紀に人類が解くべき謎への挑戦を行うものとして開発され、その後続く将来ミッションの方向性を定めるものと認識されている。

ASTRO-Hの準備は、国内外のチームメンバー、担当メーカーの努力により順調に進んでいる(図7)。打ち上げは2016年初頭、打ち上げ後の3カ月の衛星・観測装置立ち上げフェーズの後、性能確認フェーズとして試験観測が6カ月間行われる。試験観測を開始する頃に観測提案の公

募を始め、性能確認フェーズの後、公募観測のフェーズに入る予定である。ASTRO-Hを開発してきたメンバーばかりではなく、広い分野の研究者が観測データをすぐに解析できるように、ソフトウェア開発の作業も進んでおり、衛星試験で得られたデータを実際にパイプラインで処理する試験もすでに行われている。

今後、天文コミュニティーの皆様がASTRO-Hの性能を十分に理解していただき、さまざまな波長域の観測や理論との連携について議論を進めさせていただきたいと考えている。

## 謝 辞

ASTRO-Hは、これまでのX線天文衛星と比べて規模が大きく、衛星開発には非常にたくさんの方々の力が注がれています。2014年にSPIEに発表した衛星全体を記述した論文<sup>1)</sup>には、254名の著者が並んでいます。このほかに参加大学の多くの大学院生が貢献しています。X線コミュニティーが一体となったばかりではなく、熱、構造、姿勢制御、電源など、宇宙科学研究所の工学グループやJAXA研究開発部門の多くのエンジニアの方々の力を合わせてASTRO-Hの開発が行われてきました。また、プロジェクト遂行にあたって、JAXAや参加機関のさまざまな部門の方々に多大な協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Takahashi T., et al., 2014, Proc. SPIE 9144 (id. 914425), arXiv:1412.1356 (ASTRO-Hの搭載機器についてはこの論文の参考文献一覧を参照)
- 2) ASTRO-Hプロジェクト, ホームページ (<http://astro-h.isas.jaxa.jp>)
- 3) 牧島一夫, 高橋忠幸, 2012, 日本物理学会 67, 854
- 4) Mitsuda K., Kelley R. L., et al., 2014, Proc. SPIE 9144 (id. 91442A)
- 5) Takahashi T., Mitsuda K., Kelley R. L., Fabian A., Mushotzky R., Ohashi T., Petre R., 2014, arXiv: 1412.2351v1 (ASTRO-HのWhite Paperへのリンク一覧)

### X-ray Astronomy Satellite—ASTRO-H— Tadayuki TAKAHASHI

*Institute of Space and Astronautical Science  
(ISAS), JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku,  
Sagamihara 181-0015, Japan*

Abstract: The ASTRO-H mission is the sixth in a series of highly successful X-ray missions developed by the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), with a planned launch in early 2016. ASTRO-H is equipped with a suite of sensitive instruments with the highest energy resolution ever achieved at  $E > 3$  keV and a wide energy range spanning over three decades in energy from soft X-rays to gamma-rays. The simultaneous broad band pass, coupled with the high spectral resolution of  $\Delta E \leq 7$  eV of the microcalorimeter, will enable a wide variety of important science themes to be pursued. ASTRO-H is expected to provide breakthrough results in scientific areas as diverse as the large-scale structure of the Universe and its evolution, the behavior of matter in the gravitational strong field regime, the physical conditions in sites of cosmic-ray acceleration, and the distribution of dark matter in galaxy clusters at different red-shifts.