

X-RAY OBSERVATORY

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 ASTRO-H プロジェクトチーム 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1 042-759-8008 (宇宙科学研究所 広報・普及係) http://www.isas.jaxa.jp

ASTRO-H プロジェクトサイト http://astro-h.isas.jaxa.jp/

JAXA 2515

宇宙は冷たく静穏に見えますが、X線を用いると、爆発・衝突・突発現象など、激動に満ちた 熱い姿が見えてきます。こうしたX線での宇宙観測を飛躍的に進めるべく、日本がNASAや 世界各国の協力をえて開発した新世代のX線天文衛星がASTRO-Hです。そこに搭載される 最先端の装置「X線マイクロカロリメータ」は、宇宙からのX線を世界最高の分光性能で 観測します。また同時に搭載される3種類の検出器は、軟X線から軟ガンマ線までの広い 波長帯域で、高感度を実現します。ASTRO-Hはこれらの新機能を駆使し、暗黒エネルギーや 暗黒物質(ダークマター)の支配のもとで「見える物質」が宇宙最大の天体である銀河団を 作ってきた過程や、多数の銀河の中心に君臨する巨大ブラックホールの生い立ちに切り込み、 また中性子星やブラックホールにおける極限状態での物理法則を探ります。





# ASTRO-Hの科学目標

熱く激しい宇宙とは何か。宇宙からのX線を用いて何を知るのか。 ASTRO-Hが解明を目指す科学目標を紹介します。

### ■1.1 ASTRO-Hの目的

ASTRO-Hは、宇宙の成り立ちと、熱く激しい宇宙に潜む物理現象を解明することを目指し、次のような科学目的を掲げています。

#### 目的1. 宇宙の成り立ちを調べる

宇宙最大の天体である銀河団(図1.1)において、暗黒物質 (ダークマター)の重力に閉じ込められた高温プラズマ(電離 気体)がもつ乱流、衝突、衝撃波などの運動エネルギーを 測定し、銀河団の成長過程とエネルギー収支を解明する。 さらに背後にある暗黒物質や暗黒エネルギーの性質を 推定する。

星の大集団である銀河と共に生まれて進化する、銀河中心 の巨大ブラックホールを、近傍から遠方まで観測し、巨大 ブラックホールが銀河の進化に果たした役割を解明する。

銀河団の高温プラズマに含まれる各種元素の量を、レア メタルまで含め測定し、いかにして宇宙が現在の元素量や 元素組成をもつに至ったかを明らかにする。



図1.1: 可視光で見た銀河団の想像図。暗黒物質の作る重力により数百個の銀河が 集まり、そこにはX線を出す高温プラズマ(この図では見えない)も充満している。

#### 目的2. 極限状態での物理法則を検証・解明する

中性子星やブラックホール(図1.2)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 などに特有な物理現象を検知し、相対論的な時空の歪み など、背後にある物理法則を検証・探求する。

パルサー、超新星残骸、ブラックホール、銀河団などで荷電 粒子が加速され、光速に近い速度をもつ超高エネルギー 粒子(宇宙線)となる現場を特定し、そこでの物理過程を 究明する。



図1.2: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噴き出し、そこからもX線などが放射される。



#### NASA ESA and A Simon (Goddard Space Flight Center) NASA/CXC/SwRI/R.Gladstone et al.

図1.3 様々な天体の大きさの比較(上)と、それらの天体の可視光とX線で見た姿(下)

## ■1.3 宇宙をX線で観測すると

ASTRO-HはX線で宇宙を観測します。X線は光(電磁波)の一種で、図1.4のように可視光の1万分の1から数十万分の1の 波長をもち、1光子あたりのエネルギーは可視光の1万倍から数十万倍になります。光子エネルギーはキロ電子ボルト(keV)で 表されることが多く、その値は波長に反比例します。改めてX線で宇宙を観測する利点をまとめると、以下の4点になります。

#### 1.3.1 宇宙の物質の大部分を検知できる

X線を放射する高温プラズマは、星々より大量に存在し、 それは宇宙にある「見える物質」の8割を占めています。し たがってX線を用いることで、宇宙の「見える物質」の大 部分を検知できることになります。

#### 1.3.2 エネルギーの集中する場所がわかる

温度およそ36度の人体はおもに赤外線、およそ6000度の 太陽はおもに可視光を放射するなど、物質は高温になる ほど波長の短い光を発します。図1.3や図1.5のように、 X線は、数百万度~数億度の超高温のプラズマや、高エネ ルギーに加速された粒子から放射されます。そこでX線 を用いると、超高温、強重力、高速回転、激しい衝突、 爆発、強磁場、核反応など、宇宙でエネルギーが集中する 場所を選択的に検知できます。

#### 1.3.3 高い透過力が利用できる

レントゲン写真(図1.6)の例でわかるように、X線は高い 透過力をもちます。よってX線を発する天体が分子雲など 濃い物質に覆われていても、X線はそれらの物質を透過 して飛来することができます。ちなみに同じ炭素でも、 ダイヤモンドは透明で木炭は真っ黒なように、可視光の 透明度は化合状態に依存しますが、X線の透過率は元素 の化合状態にはよりません。

#### 1.3.4 元素組成が測定できる

ローソクの炎に少量の食塩を入れると、黄色の光が強く なります。これは元素に固有な波長の光(ナトリウムなら 黄色)が強く放射される現象で、炎色反応と呼ばれます。 同様の現象はX線でも起き、元素ごとに決まった波長の X線、すなわち「特性X線」が放射されるため、その強度を 測定することで、天体における各種元素の存在量を知る ことができます。図1.7は、星が爆発した残骸「カシオペヤ 座A」において、酸素、鉄、カルシウムなどの特性X線の 波長ごとに描いた画像で、これにより、どの元素がどのよう に分布するかがわかって来ました。



図1.6:レントゲン写真の例



図1.7:超新星残骸カシオペヤ座Aにおける様々な元素の分布 (NASA/GSFC/U.Hwang et al.)



### ■1.4 X線天文学の歴史とASTRO-H

#### 1.4.1 大気圏外から観測する理由

X線は人体を透過できますが、図1.8のように、地球大気 の「壁」を貫いて、宇宙から地表へと到達することはでき ません。なぜなら大気に含まれる原子の個数(地表から 上空まで足し合わせると1cm<sup>2</sup>あたり約10<sup>25</sup>個)は、 レントゲン撮影の際、X線が通り抜ける人体に含まれる 原子の個数より50倍も多いからです。このため宇宙からの X線を捉えるには、人工衛星などで大気圏外から観測を 行うことが必須となります。ASTRO-Hは、高度約575km の円軌道を周回しながら天体観測を行います。



図1.8: 様々な波長の光と地球大気の透過率。 大気の窓とは、大気の影響が小さく、光が地上まで届く波長域のことをいう。

#### 1.4.2 X線天文学の始まりと現状

X線天文学は、1962年に全天最強のX線源「さそり座X-1」がロケット実験で偶然に発見されたことで始まった、若い学問分野 です。それから今日まで、恒星、中性子星、ブラックホール、超新星残骸、銀河、銀河団など、多くの天体がX線を放射することが 明らかになりました。日本もこの間、ロケット能力の向上や衛星技術の進展に合わせて新しいX線観測装置を開発し、図1.9の ように、「はくちょう」(1979)、「てんま」(1983)、「ぎんが」(1987)、「あすか」(1993)、「すざく」(2005)という5機のX線天文衛星を 継続的に打上げ、世界をリードして来ました。日本の代表的成果として、ブラックホールの実在を支持する観測的根拠の強化、 超新星残骸で宇宙線が加速される直接的証拠の発見、銀河団プラズマ中での重元素の空間分布の解明、中性子星の磁場の 精密計測などがあります。こうして熱く激しい宇宙の姿が徐々に見えてきましたが、それにつれ、より根源的ないくつもの問いが 姿を現して来ました。それが1.1節に述べたASTRO-Hの挑戦課題です。



### ■1.5 ASTRO-Hの特徴

図1.10は世界の主なX線天文衛星の特徴を比較したものです。ASTRO-Hは、画像の解像度では他の衛星に譲りますが、 マイクロカロリメータによりX線光子のエネルギーを超高精度で測定する能力、および複数の検出器を組み合わせた幅広い エネルギー帯域を同時に観測する能力に、特に重点を置いて設計されました。これらの特徴をより詳しく説明します。

#### 特徴1:X線光子のエネルギーを超高精度で測定する能力

マイクロカロリメータは、個々のX線光子のエネルギー (ないし波長)を、従来の約30倍の精度で測定できるため、 以下のような豊富な情報をもたらすと期待されます。

元素組成:図1.11のように、微弱な特性X線まで測定できる ため、酸素や鉄などの主要元素に加え、宇宙ではより微量 なアルミニウムやナトリウム、さらにはレアメタルまで検出 可能となり、天体の元素の情報が飛躍的に豊富になります。

運動:放射源が視線方向に運動していると、X線光子の エネルギーが、ドップラー効果により変わります。マイクロ カロリメータでは、従来より微小なエネルギーのずれまで 計測できるので、超新星残骸の膨張速度、銀河団同士の 衝突速度、衝突によりプラズマ中に発生する衝撃波や乱流 の速度などが、初めて測定可能となり、天体がもつ運動 エネルギーを推定できるようになります。

**強い重力**:ブラックホール近傍では強い重力により、吸い 込まれる物質が出すX線のエネルギーに、「重力赤方偏移」 が生じます。その測定により、ブラックホール周辺の時空 の歪みを知ることができます。

#### 特徴2: 広いエネルギー域を同時に観測する能力

ASTRO-Hに搭載される複数の検出器は、同じ天体を 観測するので、それらの協調により、0.3~600 keVという 3桁を超える広いエネルギー帯域で同時にデータが取得 できます。その結果、従来は測定できなかった超高温プラ ズマの温度を測定し、厚いガスに囲まれた銀河中心の巨大 ブラックホール(図1.12)を検出し、超新星残骸や高速で 自転する中性子星の近傍で粒子が加速される様子を調 べるなど、格段に進んだ研究が可能となると期待されます。 さらに中性子星やブラックホールの周辺で、陽電子(電子 の反粒子)が生成される証拠もつかめるかもしれません。

#### 世界の期待を背負うASTRO-H

ASTRO-HはJAXAとNASA(アメリカ航空宇宙局)を主軸と する衛星計画で、日本を中心に、アメリカ、オランダ、カナダ など8カ国が協力し、さらにESA(欧州宇宙機関)の協力も 得て、大規模な国際協力として進められてきました。 打上げ後は全世界から観測公募を受け付ける予定です。 公開データまで含めると、ASTRO-Hは今後10年以上に わたり、全世界の研究者が利用できる、ほぼ唯一の大型 公開X線天文台と位置づけられ、「熱く激しい宇宙に潜む 物理法則を知りたいという世界の研究者の熱い期待を 一身に背負っています。



図1.11: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 は予測で、ナトリウムやアルミニウムなど、宇宙では稀少な 元素の特性X線まで検出でき、それらの存在量を精度よく推定できる。

X線のエネルギー(keV)

1.5



図1.12: ブラックホールが、それを取り囲む厚いガスを照らす 様子の想像図。(池下章裕)

## 01 ASTRO-Hの科学目標

■1.6 ASTRO-Hが解明する宇宙の謎

#### 1.6.1 宇宙の成り立ちを調べる 巨大ブラックホールはどのように成長し、 周囲にどんな影響を与えたのか?

ほぼ全ての銀河の中心には、太陽の百万倍から1億倍もの 質量をもつ巨大ブラックホールが1個づつ存在します。 しかし138億年の宇宙の歴史の中で、それらがどのように 作られ成長してきたかは、長年の謎でした。ASTRO-Hは 約80億光年の遠方まで巨大ブラックホールの探査を行い、 その個数やX線光度の時間推移を追うことで、巨大ブ ラックホールがガスを吸い込んで成長したのか、合体を 繰り返して大きくなったのかなどの可能性を検証します。

ブラックホールは物質を吸い込むだけでなく、銀河の外 まで物質を噴き出すこともあります。特に成長途上の若 く活発な巨大ブラックホールは、銀河や銀河団の進化に 強く影響を与えた可能性がありますが、これはミカン大の 物体が地球に影響を及ぼすことに相当するほどです。 ASTRO-Hで、巨大ブラックホールに落ち込むガスの量や、 逆にそこから高速に吹き出す物質の流速・流量を計測 することにより、巨大ブラックホールが銀河や銀河団に 与える影響の大きさを、より直接的に推定できるように なります。

#### 1.6.2 極限状態での物理法則を検証・解明する 超高密度・超強磁場の極限状態で、 どんな物理現象が起きているのか?

中性子星や白色矮星と呼ばれる天体は、地上では実現で きない超高密度や超強磁場の世界です。そのような極限 状態では、高密度に伴う陽子の超流動や、超強磁場による 光子の分裂など、多くの奇妙な現象が起きると期待され ます。これらの物理現象を、その現場から放射されるX線 や軟ガンマ線を用いて検知することで、現象を支配する 物理法則を検証し、より深く理解します。また、現存の物理 法則を超えるような新しい法則の可能性を探ります。

#### ブラックホール近傍では、 確かに時空は歪んでいるのか?

X線天文学が始まって50年。「はくちょう座X-1」などのX線 源が、隣りの星からガスを吸い込むブラックホールである こと、また太陽の数千万倍の重さに達する超巨大ブラック ホールが銀河の中心に存在することが、様々な形で検証 され強化されて来ました。しかしアインシュタインの一般 相対論の予言どおり時空が歪んでいることを直接に検証し、 さらにその歪みを通じてブラックホールの回転を検知する 作業は、まだ緒についたばかりです。ASTRO-Hは、ブラック ホールに落ち込むガスの運動を精密に測定することで、 これらの課題に挑みます。

#### 銀河団はどのように形成され、 進化して来たのか?

宇宙で最も大きな天体である銀河団たち。どの銀河団も 可視光では銀河の集まりに見えますが、その数倍もの質量 をX線で輝く高温プラズマが担い、さらにこうした「見える」 物質の約5倍におよぶ大量な暗黒物質が潜んでいます。 ASTRO-HはX線のドップラー効果により、今までわから なかったプラズマの流れや乱流の測定を、初めて可能に します。そこからプラズマの運動エネルギー、暗黒物質の 総量などが計算でき、さらに計算機シミュレーションなどと 比較することで、宇宙の歴史の中で銀河団がどのように 形成され、衝突し、進化して来たかが明らかにできると 期待されます。

#### 宇宙では各種の重元素が、 いつ、どれだけ作られて来たのか?

生まれたての宇宙には、水素、ヘリウム、リチウムの三種類 しか元素がありませんでした。その後、星の内部や超新星 などにより、炭素、酸素、鉄、金など100種類に近い重元素 が合成され、惑星系や生命系を含む、多様性に満ちた 今日の宇宙が形成されました。ASTRO-Hにより、重元 素の主要な生産現場である超新星残骸や、重元素の蓄積 場所である銀河団プラズマを観測し、クロム、マンガンなど のレアメタルも含め各種重元素の出す特性X線の強度を 測定することで、それらが宇宙の歴史の中で、いつ、どこで、 どれだけ作られて来たか明らかになるでしょう。

#### 宇宙線は、 どこでどのように作られているのか?

光の99.9999..%(9が10~20個も並ぶ)の速度で宇宙から 降り注ぐ高エネルギー粒子、すなわち宇宙線が発見されて 約100年。「あすか」・「すざく」などの活躍で、超新星残骸が 宇宙線の重要な発生源であることが明らかになって来ま した。しかし、宇宙線がどのような機構で加速されていく のかは、まだ十分に解明されてはいません。さらに宇宙線 の中でも特に高エネルギーなものは、加速現場すら特定 できていません。ASTRO-Hは、超新星残骸のX線を広帯域 で観測することで、加速機構の解明を目指し、また巨大 ブラックホールや銀河団が最高エネルギー宇宙線の源 である可能性を探ります。

# ASTRO-Hの観測装置

どのようにして熱く激しい宇宙を解き明かすのか、ASTRO-Hに搭載される観測装置を紹介します。 ASTRO-Hには、最先端のX線装置とそれを実現する衛星技術が詰まっています。

### ■2.1 観測装置の搭載位置

02

4台の望遠鏡と2台の軟ガンマ線検出器は、同じ方向を向き、同一天体を同時に観測します。4種類(6台)の検出器はいずれも、 天体からやってきたX線光子を1つずつ検出します。



## ■2.2 2種類の望遠鏡と4種類の検出器

ASTRO-Hには2種類の望遠鏡と4種類の検出器が搭載されており、それぞれ特徴があります。



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







マイクロカロリメータと呼ば れる技術を用います。何段も の冷凍機を用いて、センサー を絶対零度(-273,15度)近く まで冷却し、センサーにX線 が入射したときの微小な温度 上昇を計測することで、入射 したX線のエネルギーをこれ までにない高い精度で測定 します。世界中の研究者が期待 をよせる、ASTRO-Hの目玉 の装置です。

大型のX線CCDを4個並べる ことで、38分角という広い視野 を持つX線カメラ。軟X線帯域 で天体のX線撮像と分光観測 を同時に行います。衛星本体 内部で、SXT-Iの焦点面に 設置されます。

ASTRO-Hはこれらの観測装置を組み合わせることで、0.3~600 keVという、3桁にもわたる幅広いエネルギー帯域で同時に 観測することができます。これらの検出器の感度は、「すざく」の10倍から100倍にも達します。表3.1を参照のこと。



図2.2:4種類の検出器それぞれの観測エネルギー帯域





	軟ガン	マ線検出	出器(SGD)		
X線撮像検出器(HXI)					
keV	100	keV		1 MeV	
			エネルギー	・(単位:キロ電子ボ	ルト)

光学系

検出器



## ■2.3 ASTRO-Hを支える技術

2.3.1 X線を集める望遠鏡 (SXT・HXT)

「すざく」よりも8倍も高いエネルギーまで集光できる

X線を効率よく観測するためには、可視光と同じように 望遠鏡を使います。しかし、X線は透過力が高いため、 普通のレンズや鏡で集めることができません。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す。これを 利用してX線を1点に集めるのです。

#### ■ 軟X線望遠鏡 (SXT-S・SXT-I)

アメリカで開発された軟X線望遠鏡は、表面を金でコーティン グした薄い円筒形の鏡をバウムクーヘンのように同心円状 に入れ子にして、エネルギー12 keV以下のX線を集めます。

#### ■ 硬X線望遠鏡 (HXT)

硬X線望遠鏡では鏡の表面に、日本のナノ技術を駆使して 厚さ数ナノメートルの反射膜を何層もコーティングする ことで、これまで反射させることが難しかった、より高エネ ルギーの硬X線を集めることができるようになりました。 従来の多くのX線天文衛星では10 keVまででしたが、この 技術により、80 keVまで集光ができます。

## 2.3.2 超精密にエネルギーを測る軟X線分光検出器(SXS)

#### 従来より30倍も正確に精密に分光できる

X線観測では、分光、すなわち個々のX線光子のエネル ギーを測ることは極めて強力な手段です。ASTRO-Hの 軟X線分光検出器は、「すざく」など従来の衛星の装置より 30倍も優れた分解能(エネルギーの測定精度)を実現し、 新しい宇宙が見えてくると期待されます。

#### ■ マイクロカロリメータ

マイクロカロリメータの原理はとてもシンプルで、物質が X線を吸収するとX線光子のエネルギーが熱に変わります。 それに伴う温度上昇を精密に測定することで、光子1個の エネルギーを求めるのです。しかし、その温度上昇はたい へん小さいため、装置を絶対零度の近くまで冷やさなけ ればなりません。1980年代からアメリカを中心に開発が 始まりましたが、ようやくASTRO-Hで搭載され、世界で 初めて軌道上での観測を行います。

#### ■ 冷却システム

マイクロカロリメータを宇宙空間で実現する際の難しさ のひとつは冷却技術にあります。ASTRO-Hに搭載される 冷却システムは日本で開発され、コンパクトながら高い 冷却性能を発揮します。多層の真空断熱容器(デュワー)、 多段の冷凍機、液体ヘリウムなどを組み合わせることで 効率的に極低温(0.05K)を実現し、それを宇宙空間で3年 以上も維持することができます。



#### ■ アラインメント計測システム (AMS)

硬X線望遠鏡の焦点距離は12mと長いため、高い指向精度 が要求されます。アラインメント計測システムは望遠鏡の 近くから12m先に置いた鏡にレーザーを照射することで、 EOBのわずかな歪みを測定し、その補正を可能にします。 カナダで開発されました。



 

メータのセンサー部分。セン サーそのものは5mm四方を 6x6に区切った36素子から なる。視野は3分角程度。
カロリメータの 模式図。X線の 入射による温度 上昇を精密に 測定する。

NASA
和ロリメータの

● 「「「」」」」
小口リメータの

● 「「」」」
※の 二月を精密に 測定する。

● 「」」」
※

● 「」」」
※

● 「」」」
※

● 「」」」
※

● 「」」」
※

● 「」」
※

● 「」」
※

● 「」」
※

● 「」」
※

● 「」」
※

● 「」」
※

● 「」」
● 「」

● 「」」
● 「」

● 「」」
● 「」

● 「」」
● 「」

● 「」」
● 「」

● 「」」
● 「」

● 「」」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」

● 「」
● 「」</t

図27・マイクロ

図2.8: SXSの冷却システムの断面図

図26:SXSのマイクロカロリ

#### フィルターホイール (FWM)

X線天体がSXSにとって強すぎるとき、それを適切な強度 にするための各種フィルターが選べるシステムです。X線 エネルギー測定精度を較正するための特性X線発生器も 備えています。オランダとスイスを中心に開発されました。

#### 2.3.3 世界に誇る日本の半導体技術を用いた検出器 (SXI・HXI・SGD)

「すざく」より10~100倍も暗い天体まで観測できる

■ 軟X線撮像検出器 (SXI)

これまでX線天文衛星に搭載された CCDカメラの中では、最大の視野を 誇ります。新開発した日本製X線 CCDを採用しています。アナログ読 み出し回路のLSI化により、小型化・ 低消費電力化を実現しています。



#### ■ 硬X線撮像検出器 (HXI)

日本独自の新型検出器で、高エネル ギーのX線やガンマ線の撮像を目的 に開発された、シリコンやテルル化 カドミウム(CdTe)半導体の両面ス トリップ検出器を用います。



■ 軟ガンマ線検出器 (SGD) 日本独自のコンセプトである「狭視野 Si/CdTe多層半導体コンプトンカメラ」 をASTRO-Hに応用した装置です。 軟ガンマ線領域で世界最高感度で 観測することができます。



図2.9: 各半導体検出器 のセンサー部分。上から SXI, HXI, SGDを示す。

#### 2.3.4 新しい人工衛星技術

#### ■ 衛星内データ通信に「SpaceWire」を採用

ASTRO-Hは、衛星内の装置間を接続するデータ通信インタ フェースとして、SpaceWire(ECSS-E-ST-50-12C規格) を採用しています。これは地上の通信インタフェース ではEthernetやUSBに対応するもので、衛星内の高速 (1Mbps以上)データ通信を統一規格で行うために作ら れた世界標準規格です。ASTRO-Hでは、従来型の低速 通信インタフェース(MIL-1553B規格など)を廃し、衛星の 共通機器部分(データ処理系、通信系、姿勢制御系)と、 観測装置のほぼすべてをSpaceWireで接続するという 先進的な設計を採用しています。ネットワークに接続され た各機器は、衛星搭載計算機「SpaceCube2」とTRON系 のリアルタイムOS「T-Kernel」上で動作するソフトウエア により制御されます。これにより衛星の開発が、従来よりも 低い予算とより短い期間で行われ、信頼性も向上します。



ASTRO-HのX線撮像検出器(SXI・HXI)では、可視光と同じ ように天体からやってくるX線を捉えて画像を撮影すること ができます。原理は普通のデジカメとあまり変わりません。 多数の微小な半導体素子が並んでおり、その1つに入った X線が電子に変換され、電気信号に変わることで画像を 得ます。ただ、可視光線の場合は光子が1つ当ると電子が 1つだけ飛び出すのに対して、X線の場合は光子エネル ギーが大きいために1つの光子で多くの電子が飛び出し ます。これにより、個々のX線光子のもつエネルギーも測る ことができるのです。さらにASTRO-Hは、従来のCCDを 用いたSXI装置に加えて、化合物半導体を用いたHXI装置 を搭載して、より高いエネルギーで撮像・分光を行い、 「すざく」の100倍の感度を実現します。

SGDの主要部であるコンプトンカメラは1台あたり112枚 の半導体イメージングセンサーからなります。SGDに ガンマ線が入射すると、これらのセンサーのどこかで何回か 反応するので、それぞれの位置とエネルギーを記録すれば、 ガンマ線の到来方向とエネルギーを求められます。こう して求めた到来方向が装置の視野と一致しない場合は、 バックグラウンドとして除去することができます。このよう に極限までバックグラウンドを下げることで、これまでの 10倍に達する高い感度を実現します。

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 しました。今後も放射性物質の分布の可視化や医療分野 への応用が期待されています。

#### ■ 観測装置用の搭載計算機・I/Oボードの標準化

ASTRO-Hには4種類(計6台)のX線検出器が搭載されて います。これらの開発・試験を効率化するため、検出器の 制御や信号処理に汎用に使用できる、標準CPUボードと 標準デジタルI/Oボードを開発しました。「SpaceCard」 とよばれるCPUボードは、SpaceWireインタフェース内蔵 の高信頼CPU「SOI-SOC2」を搭載し、µITRON規格に もとづくリアルタイムOS「TOPPERS」が動作しています。 このような構成により、検出器ごとにことなる機能・性能 要求に柔軟に応えられます。ASTRO-Hには4種類の検出器 のために10枚のCPUボードと12枚のデジタルI/Oボード が使用されており、CPUボードのうち1枚は、万が一どれか の機器のCPUボードが故障した時のための予備となって います。

<sup>\*1:</sup>シリコン酸化膜層の上に集積回路を構築することで、消費電力を低減し、 耐放射線性を高められる技術。

<sup>\*2:</sup> 複数の機能を担当する回路ブロックをひとつのチップにまとめて集積する 技術。



# ASTRO-Hの衛星概要

### ■3.1 ASTRO-Hの全体像

#### 3.1.1 構造設計

1分角を切る精度で長大な衛星を目標天体に向けるために、構造システムは

・X線望遠鏡およびX線検出器が搭載される2台の光学ベンチ(FOB・EOB) ・各種機器を搭載している8枚の側面パネル

・これらをつなぎ、衛星をロケットと結合している下部構造 (ベースパネル、スラストチューブ)

に分かれています。

#### **3.1.2 長い焦点距離の確保**

光学ベンチは、低熱歪な構造材料を採用し、軌道上での環境変化に対して高い 形状安定性を実現する設計となっています。また、打上げ時の制約条件と軌道上での 12mの焦点距離を実現するために、光学ベンチのうちの1つ(伸展式光学ベンチ) は軌道上で6m伸展します。

#### 3.1.3 熱設計

熱設計のポイントは、低熱歪要求を満たした上で、各機器から発生する合計 2000W以上にもなる発熱を排熱し、各機器が要求温度範囲に収まるようにする ことです。機器の発熱は、極力、熱歪みを嫌う固定式光学ベンチやベースパネルに は流さず、側面パネルに搭載のラジエータから排熱します。4つの検出器の発熱の 熱輸送には全てヒートパイプが用いられ、そのためASTRO-Hにはこれまでの科学 衛星には類をみないほど多くのヒートパイプが搭載されています。

### ■3.2 衛星諸元

打上げ時期	2015年度
打上げ場所	種子島宇宙センター
打上げロケット	H-IIA
全長	約14m (観測時)
質量	2.7t
電力	3500W
目標寿命	3年
<b>軌道</b> (高度·傾斜角·周期)	円軌道(約575km·31度·96分)
テレメトリ	8 Mbps (X-band)
	2 Mbps (S-band)
記憶容量	12 Gbits
搭載機器	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)
	軟X線望遠鏡 (SXT)
	硬X線望遠鏡(HXT)



## ■3.3 観測装置の諸元

角度分解能

視野

X線望遠鏡と焦点面検出器の組み合わせ

軟X線望遠鏡 SX SX	T-S 軟X線分光検出 (T-I 軟X線撮像検出	硬X線望遠鏡 器(SXS) 出器(SXI)	HXT x2 硬X編 望遠鏡無し	線撮像検出器(HXI) x2 > 軟ガンマ線検出器(SGD)
	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)
検出技術	X線マイクロカロリメータ	X線CCD	Si/CdTe両面検出器	Si/CdTeコンプトンカメラ
焦点距離	5.6 m	5.6 m	12 m	-
有効面積	310 cm <sup>2</sup> @ 6 keV	360 cm <sup>2</sup> @ 6 keV	300 cm <sup>2</sup> @ 30 keV	20 cm <sup>2</sup> 以上@ 100 keV
観測帯域	0.3 ~ 12 keV	$0.4 \sim 12 \text{ keV}$	5 ~ 80 keV	60 ~ 600 keV
エネルギー分解能 (FWHM)	7 eV以下	200 eV以下 @ 6 keV	2 keV @ 60 keV	4 keV以下 @ 60 keV

1.3分角以下

38分角×38分角

表3.1: 各検出器の性能

1.7分角以下

9分角×9分角

## ■3.5 打上げ・衛星分離後のシーケンス

衛星を分離した後は、太陽捕捉、太陽電池パドル展開 などのクリティカルイベントを実施し、衛星に対して安全な 状態を確保します。その後、姿勢系の調整、バス機器の 動作確認、ミッション機器の立上げ、EOB伸展などを 行い、定常運用に向けた各種の調整を行います。

最初の3ヶ月(Phase0)は、初期立ち上げ・動作確認 (1.5ヶ月)、キャリブレーション観測(1.5ヶ月)に割り当て られています。

その後の運用形態は、3.9.2項に述べます。

時間(目安)	打上げ後の主要イベント
4分後	衛星フェアリング分離(A)
6分後	ロケット第1段・第2段分離(B)
14分後	ASTRO-H 分離 (C)



1.3分角以下

3分角×3分角



0.6度×0.6度

■3.4 開発スケジュール

最初の提案から12年、プロジェクト開始から7年を経て、 2015年度にJAXA種子島宇宙センターからH-IIAロケット で打上げられる予定です。ASTRO-Hは相模原では組 み上げられないほど大きいので、筑波宇宙センターで組み 上げて、様々な試験を行ってきました。

2003年 11月 第1回目提案 2004年 9月 第2回目提案 2008年10月 ASTRO-Hプロジェクト発足



図3.5: ASTRO-Hミッションスケジュール(年度)



## ■3.6 ASTRO-Hの軌道

ASTRO-Hは上空およそ575kmで軌道傾斜角31度の 円軌道を周回します。96分に地球を1周しながら、ある 一定時間(たとえば1~2日)、衛星の姿勢を保ち、1つの 天体を連続的に観測します。

観測を行う定常制御モードでは、ASTRO-Hの姿勢(向き) を約17秒角の精度で制御します。この際、恒星センサー (STT)と呼ばれる星像カメラの画像から衛星の姿勢を 決定し、リアクションホイール(RW)により、ASTRO-Hの 姿勢を変更・維持します。ある天体の観測が済むと、事前の 計画に従い、次の目標天体に姿勢を向けます。





図3.7: ASTRO-H分離から観測開始までのASTRO-Hの様子。打上げ後、太陽電池パドルを展開して、EOBを伸展させます。



図3.8: ASTRO-Hの軌道

## ■3.7 システムブロック図

バス系・ミッション系ともSpaceWireを全面的に用いたデータ通信を行うネットワーク型衛星になります。 バス系は科学衛星では初めてとなるフル冗長構成を採用しています。



#### 3.7.1 衛星バスシステム

D	HS	データ処理系 Data Handling System
	SMU	衛星マネージメントユニット Satellite Management Unit
	DR	データレコーダー Data Recorder
	SWR	28-port SpaceWireルータ 28-port SpaceWire Router
	TCIM-S	テレメトリコマンドインタフェースモジュールS Telemetry Command Interface Module-S
	TCIM-X	テレメトリコマンドインタフェースモジュールX Telemetry Command Interface Module-X
	MSE	ミッションサポート装置 Mission Support Equipment
R	F	通信系 Communication System
	SANT	Sバンドアンテナ S-band Antenna
	SHYB	Sバンドハイブリッド S-band Hybrid
	SDIP	Sバンドダイプレクサ S-band Diplexer
	STRP	Sバンドトランスポンダ S-band Transponder
	SLPF	Sバンドフィルタ S-band Filter

	XANT	Xバンドアンテナ X-band Antenna
	ХНҮВ	Xバンドハイブリッド X-band Hybrid
	XFIL	Xバンドフィルタ X-band Filter
	XMOD	Xバンド変調器 X-band Modulator
	ХРА	Xバンドパワーアンプ X-band Power Amplifier
E	PS	電源系 Power Supply System
	SAP	太陽電池パドル Solar Array Paddle
	PCU	電力制御器 Power Control Unit
	SHNT	シャント装置 Shunt Dissipater
	BCCU	バッテリ充電制御器 Battery Charge Control Unit
	BAT	バッテリ Battery
	NEAC	NEA制御器 NEA Controller
т	CS	熱制御系 Thermal Control System
	HCE	ヒータ制御装置 Heater Control Electronics

A	ocs	姿勢起動制御系 Attitude and Orbit Control System
	AOCP	姿勢起動制御計算機 Attitude and Orbit Control Proccessor
	ACIM-RW	姿勢インターフェイスモジュールRW AC Interface Module RW
	ACIM-IRU	姿勢インターフェイスモジュールIRU AC Interface Module IRU
	ACIM-STT	姿勢インターフェイスモジュールSTT AC Interface Module STT
	ACIM-SG	姿勢インターフェイスモジュールSG AC Interface Module SG
	ACIM-MTQ	姿勢インターフェースモジュールMTQ AC Interface Module MTQ
	ACIM-MPSU	姿勢インターフェースモジュールMPSU AC Interface Module MPSU
	ACIM-RCS	姿勢インターフェースモジュールRCS AC Interface Modulee RCS
	RW	リアクションホイール Reaction Wheel
	MTQ	磁気トルク Magnetic Torquer
	STT-S	恒星センサー Star Tracker Sensor
	STT-E	恒星センサー制御装置 Star Tracker Electronics
	IRU	慣性基準装置 Inertial Reference Unit

#### 3.7.2 ミッション機器

0	B	光学ベンチ Optical Bench
	EOB	伸展式光学ベンチ Extensible Optical Bench
	FOB	固定式光学ベンチ Fixed Optical Bench
	EOB-E	伸展式光学ベンチ制御装置 Extensible Optical Bench Electronics
х	RT	X線ミラー系 X-ray Telescope
	НХТ	硬X線望遠鏡 Hard X-ray Telescope
	SXT-S	軟X線望遠鏡 Soft X-ray telescope (SXS)
	SXT-I	軟X線望遠鏡 Soft X-ray telescope (SXI)
S	xs	軟 X 線分光検出器 Soft X-ray Spectrometer
	SXS-DWR	SXS デュワー(真空断熱容器) SXS Dewer
	SXS-SCD	SXSシールド冷凍機駆動装置 SXS Shield Cooler Driver
	SXS-PCD	SXS前段冷凍機駆動装置 SXS Pre Cooler Driver
	SXS-JTD	SXSジュールトムソン冷凍機駆動装置 SXS Joule-Thomson Cooler Driver
	SXS-ADRC	SXS断熱消磁冷凍機制御装置 SXS ADR Controller
	SXS-XBOX	SXS アナログ波形処理装置 SXS X-ray BOX
	SXS-PSP	SXS デジタル波形処理装置 SXS Pulse Shape Processor
	SXS-FWM	SXSフィルターホイール SXS Filter Wheel Mechanics
	SXS-FWE	SXSフィルターホイール制御装置 SXS Filter Wheel Electronics
	SXS-PSU	SXS 電源装置 SXS Power Supply Unit

	CSAS	粗太陽センサー Coarse Sun Aspect Sensor
	GAS	磁気センサー Geomagnetic Aspect Sensor
	SWR	14-port SpaceWireルータ 14-port SpaceWire Router
R	CS	<mark>推進系</mark> Reaction Control System
	3N-THR	3Nスラスタ 3N Thruster
	VLVM	バルブモジュール Valve Module
	TNK	燃料タンク Propellant Tank
A	MS	<mark>アラインメント</mark> 計測系 Alignment Measurement System
	AMS-LD	光源検出器 Laser and Detector
	AMS-T	ターゲットマーカー Target Marker
0	DS	軌道決定系 Orbit Determination System
	GPSA	GPSアンテナ GPS Antenna
	GPSP	GPS受信機 GPS Processor
	GPSL	GPS LNA GPS LNA

	SXS-SWR	SXS SpaceWireルータ SXS SpaceWire Router
	SXS-DIST	SXS電力分配器 SXS Distributer
S	xı	軟 X 線撮像検出器 Soft X-ray Imager
	SXI-S	SXI センサー SXI Sensor
	SXI-CD	SXI冷凍機駆動装置 SXI Cooler Driver
	SXI-PE	SXIピクセル処理装置 SXI Pixel Processing Electronics
	SXI-DE	SXIデジタル装置 SXI Digital Electronics
	X-MDE	エクストラミッションデジタル装置 eXtra - Mission Digital Electronics
н	XI	硬 X 線撮像検出器 Hard X-ray Imager
	HXI-S	HXI センサー HXI Sensor
	HXI-DPU	HXI データ処理装置 HXI Data Processing Unit
	HXI-DE	HXIデジタル装置 HXI Digital Electronics
	HXI-AE	HXIアナログ装置 HXI Analog Electronics
	HXI-HCE	HXI熱制御装置 HXI Heater Control Electronics
S	GD	軟ガンマ線検出器 Soft Gamma-Ray Detector
	SGD-S	SGD センサー SGD Sensor
	SGD-DPU	SGDデータ処理装置 SGD Data Processing Unit
	SGD-DE	SGDデジタル装置 SGD Digital Electronics
	SGD-AE	SGDアナログ装置 SGD Analog Electronics

## 03 ASTRO-Hの衛星概要

## ■3.8 地上システムと運用体制

軌道上にあるASTRO-Hとの通信には、主に鹿児島県の 内之浦宇宙空間観測所(USC)にある34m/20mアンテナ、 および千葉県の勝浦宇宙通信所にあるKTU4局を用います。 通信の際には、S帯(2GHz帯)とX帯(8GHz帯)という二 種類の電波帯域を使い分けます。前者は安定性が高いので、 衛星制御コマンドの送信や電力・温度・姿勢といったハウ スキーピング情報の受信に、後者はS帯と比べて約4倍の 通信速度を持つので、サイズの大きい科学観測データの 受信に用います。また、打上げ時の追尾(受信のみ)に増田 宇宙空間観測所にあるMSD1局を、普段の運用の補助に 海外局であるサンチアゴ局(SNT1)・マスパロマス局 (MSP1)・ミンゲニュー局(MGN1)も用います。これらの局は X帯の受信機能を持たないため、S帯のみの通信となります。





図3.11: ASTRO-Hと交信を行う地上局の位置と、ASTRO-Hの軌道(15周分)。ASTRO-Hは96分で地球を1周し、日照と日陰は2:1程度になります。1日に地球を15周し、 このうち日本上空を5回通過します。日本上空を通過する際に10分程度の交信が可能で、この間にコマンドを衛星に送り、観測データを受信します。

## ■3.9 公開天文台としてのASTRO-H

#### 3.9.1 国際公募観測

ASTRO-Hは、打ち上げ直後の初期立ち上げ・キャリブ レーション観測(Phase0)、サイエンスワーキンググループ (SWG)による試験観測(Phase1)に続いて、世界に公開 された天文台として、国際公募観測を行います。提出さ れた観測提案書の専門家による競争的審査を経たのち、 採択された提案には観測時間が配分されます。全ての データは一定の占有期間の後、世界共有の財産となる公開 データとして、解析ソフトウェアとともに誰でもアクセス できるようになります。

#### 3.9.2 公募観測までのスケジュール

Phase0	3ヶ月	初期立ち上げ・キャリブレーション観測 100%
Phase1	6ヶ月	試験観測 100%
Phase2	12ヶ月	試験観測 25%, 公募観測75%
Phase3	残り	試験観測 10%, 公募観測 90%

#### 3.9.3 解析ソフトウェア

ASTRO-Hの科学目標を達成する観測精度を確保するために、検出器チームとソフトウェア開発チームが一体となって、搭載機器の特性や個性などの較正情報をすべて データベース化し、較正情報を最大限に活かす解析アル ゴリズムを開発してきました。公開天文台として ASTRO-Hの観測データを広く利用してもらうために、 NASAの世界標準のフォーマットを採用し、誰でも間違い がなく科学的結果が導ける、使い易い解析ソフトウェア を無償で公開します。

#### 3.9.4 世界の公開天文台として

ASTRO-Hは、公開天文台として開発チーム以外の広い 分野の科学者に門戸を開きます。観測提案を受け付ける だけではなく、分かりやすい解析の手引書、搭載機器の 詳細を記述した技術文書を公開し、常に最新の情報となる ように更新し続けます。また、国内外にヘルプデスクを 開設し、各国の各ユーザーが解析の際に遭遇した問題点 や疑問点などを個別に対応します。

## ■3.10 全国の大学・世界の研究機関との共同作業

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250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。

#### ASTRO-Hに参加する61の参加機関

