

次期宇宙X線天文衛星ASTRO-H

JAXA宇宙科学研究所(ISAS)

高橋忠幸、満田和久

NASA/GSFC

Rich Kelley

他ASTRO-H チーム

2013/Jan



X線で探る宇宙 (X線天文発祥50年, ちなみに宇宙線は100年)



宇宙望遠鏡を用いた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あきらかにした。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明らかにして、人類の宇宙観を変えたといえる。



◆100万度から1億度の高温ガス

◆超新星残骸

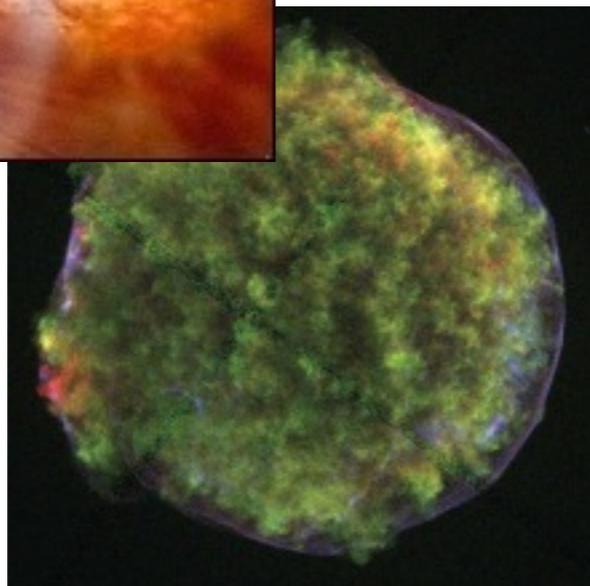
◆ブラックホールや中性子星に落ち込む物質

◆星のコロナ

◆磁場中で加速された電子からの放射 ($\sim 10^{12} - 10^{14}$ Gauss)



中性子星



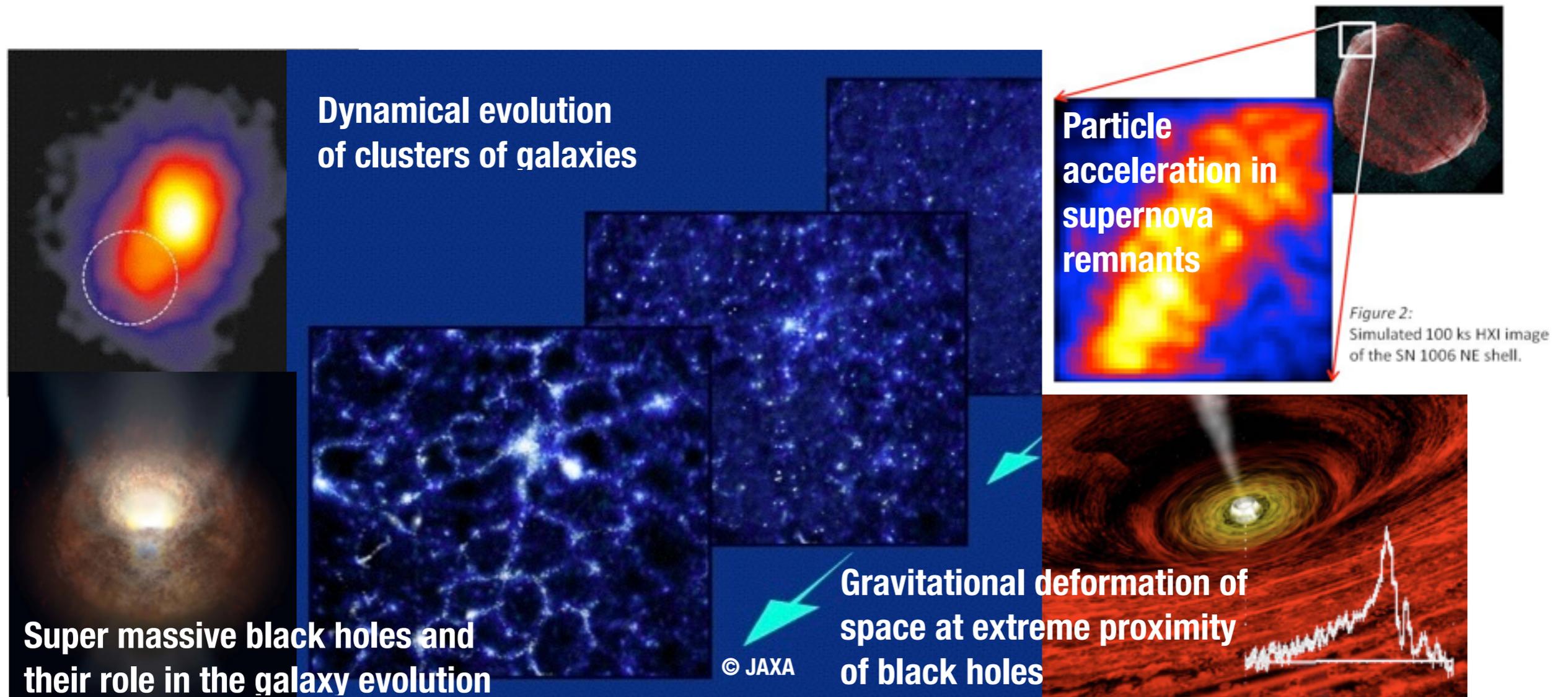
宇宙で我々が観測できる物質の80パーセントはX線でしか観測できない高温状態にあるとされている

(Fukugita & Peebles 2004, Read & Trentham 2005)。

宇宙の全貌を知る上で、X線観測は地上からの光学・電波観測などと並び不可欠の手段である。

硬X線は最も透過力の高い電磁波であり、塵やガスに隠されたブラックホールなど、これまで手の届かなかった未知の天体を探ることもできる。ASTRO-Hの観測により、X線天文学が飛躍的に発展し、宇宙物理学に大きなインパクトを与えることができる。

- 1) 高分解能のX線分光により、高温ガスの運動を100 km/sの精度で捉え、超新星・ブラックホール・銀河団の衝撃波・ジェットなどのガスの運動を測定する。
- 2) 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新たに行い、天体からのエネルギー解放過程を包括的に調べる。



次期X線天文衛星ASTRO-H

ブラックホールの周囲や星が爆発したあとに残る高温プラズマ、銀河団を満たす膨大な量の高温ガスなどから放出される「X線」および「ガンマ線」を過去最高感度で測定し、高エネルギー現象に満ちた宇宙の構造やその進化を探る。

ASTRO-H Member Agencies and Countries

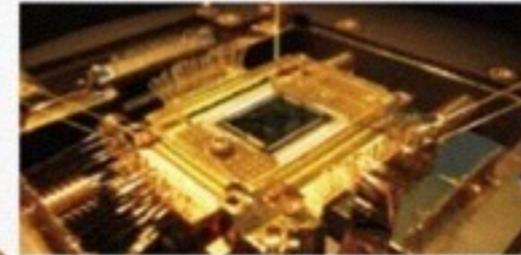


世界最先端の観測装置たち

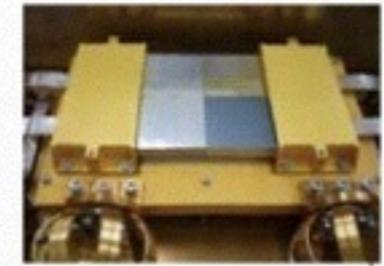


望遠鏡開口部の拡大写真
X線反射望遠鏡 (SXT/HXT)
天体からのX線を、観測装置に集める装置。可視光の望遠鏡でよく利用されるレンズや鏡とは異なり、X線を反射するアルミ板を同心円状に1000枚以上並べた構造をしています。

軟X線分光検出器 (SXS)
特殊な検出素子を、何台もの冷凍機をつかって絶対零度(摂氏-273度!)近くまで冷却し、その素子にX線があたったときの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の目玉の観測装置です。



検出素子の中心部(NASA/GSFC提供)



軟X線撮像検出器 (SXI)
大型のX線CCDを4個並べた、広視野のX線カメラ。0.5キロ電子ボルトから12キロ電子ボルトのエネルギーの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。衛星本体内部に設置されます。



軟ガンマ線検出器 (SGD)
半導体検出器を積層して感度を高めたガンマ線分光装置。密度の濃いガスで覆われた天体などで、X線よりも透過性の高いガンマ線で天体の性質を調べる時などに活躍します。



硬X線撮像検出器 (HXI)
シリコン半導体とテルル化カドミウム半導体を用いて、5キロ電子ボルト以上の「硬X線」と呼ばれる光を検出して天体のイメージを撮影。硬X線望遠鏡の焦点距離が1.2mもあるため、HXIは軌道上で伸びるブーム(腕)の先に設置されます。

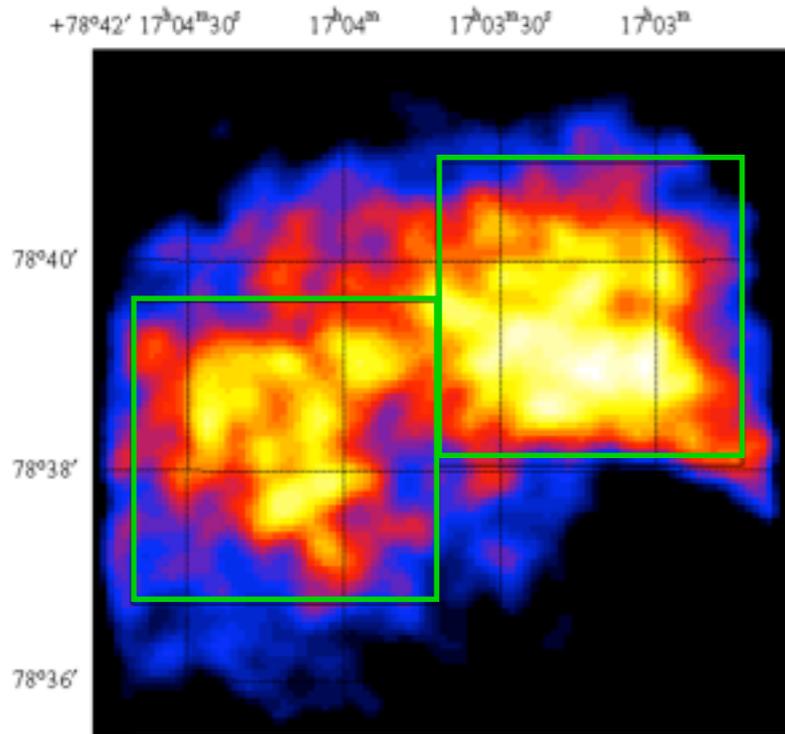
超広角
コンプトンカメラの
要素技術

重量 約 2.7 トン
全長 14 メートル

ASTRO-H Science : 衝突する銀河団

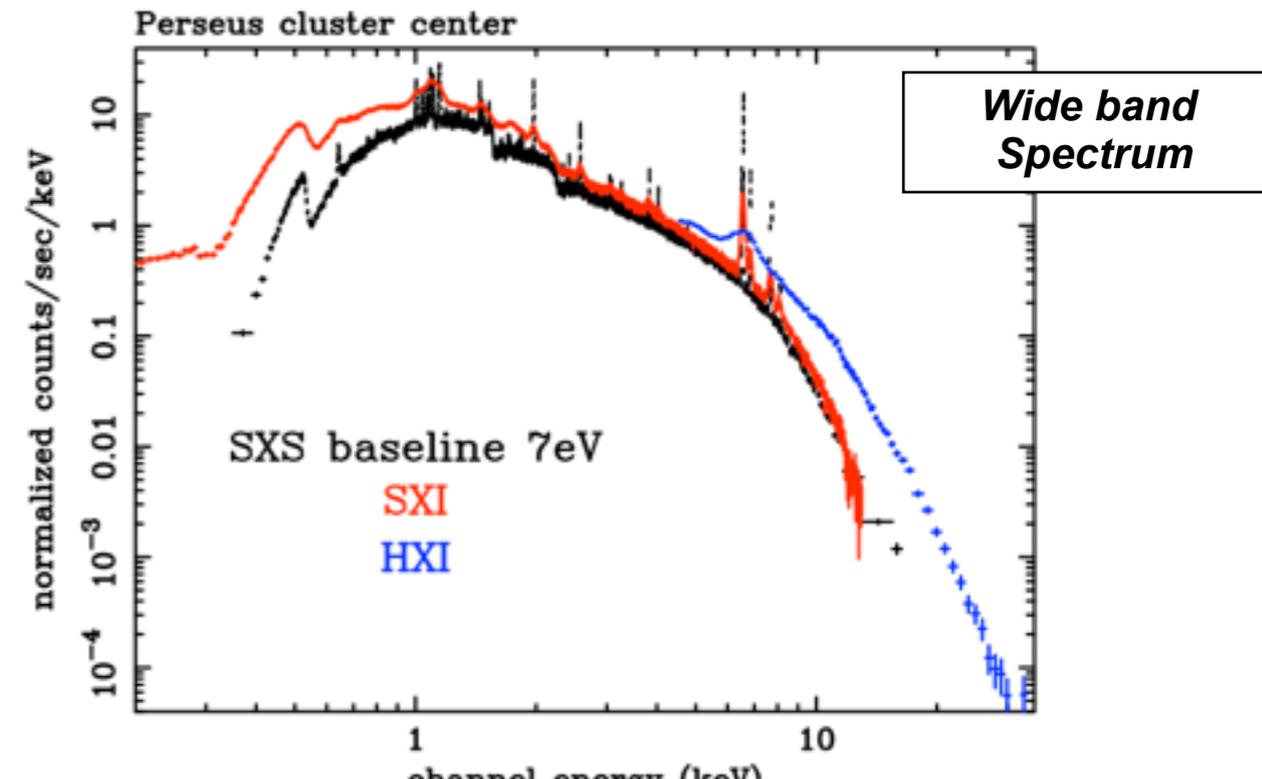
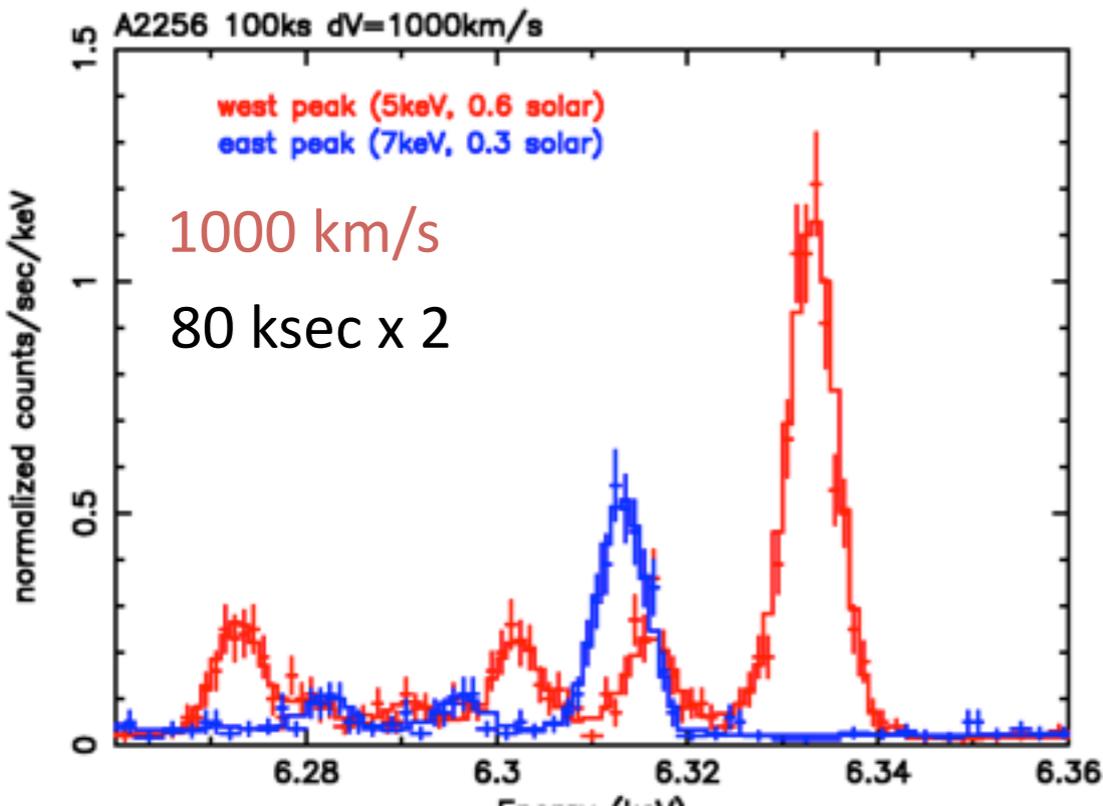
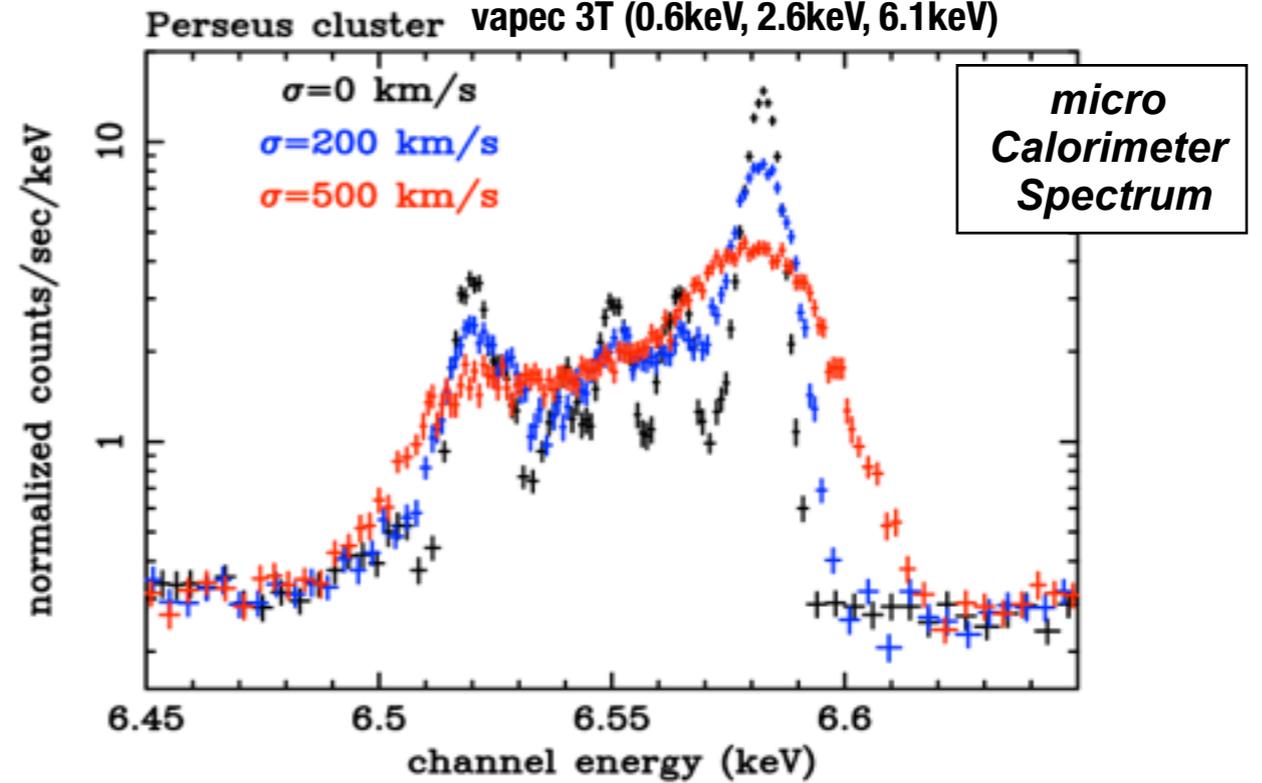


最近の宇宙X線望遠鏡は、銀河団という 10^{64} erg もの巨大エネルギーをもつ「超高温プラズマ球」が衝突と合体を繰り返し、より巨大な銀河団に進化するダイナミックな姿を明らかにしつつある。



A2256
($z = 0.058$)

Perseus cluster ($r < 2'$, 100ks)



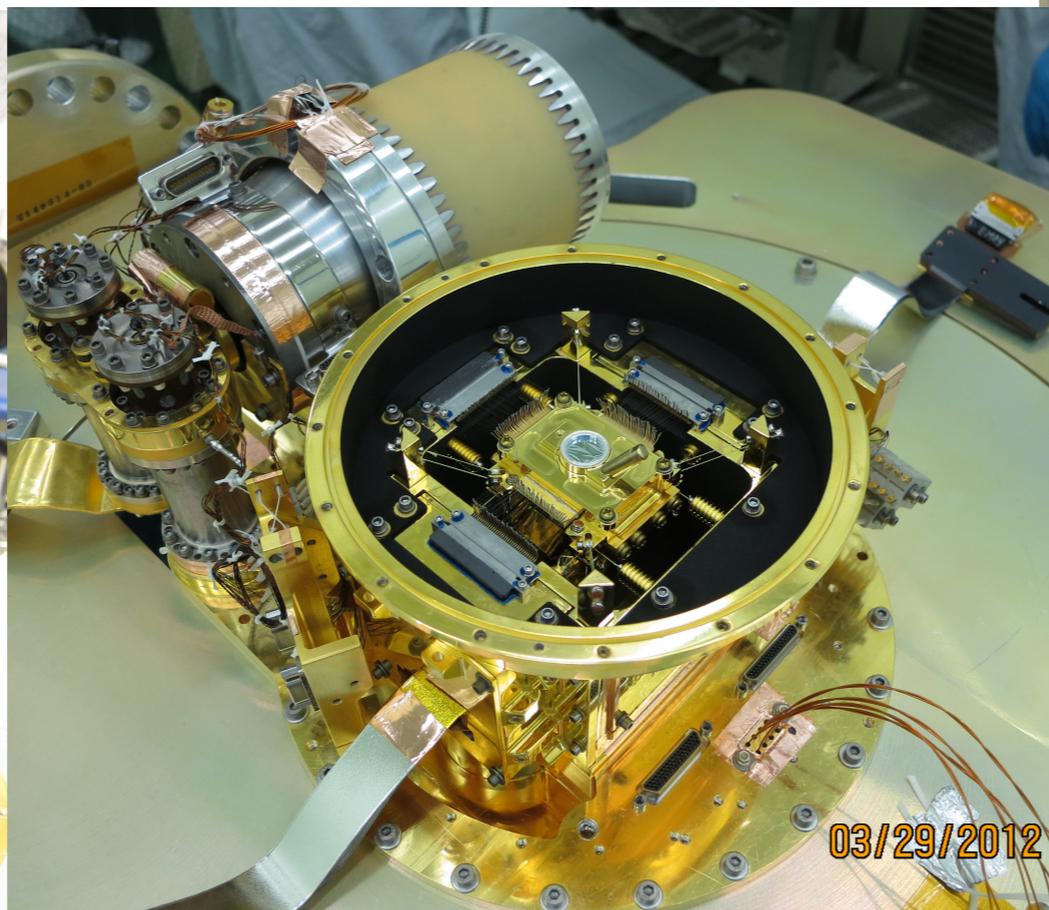
Micro Calorimeter System (SXS)



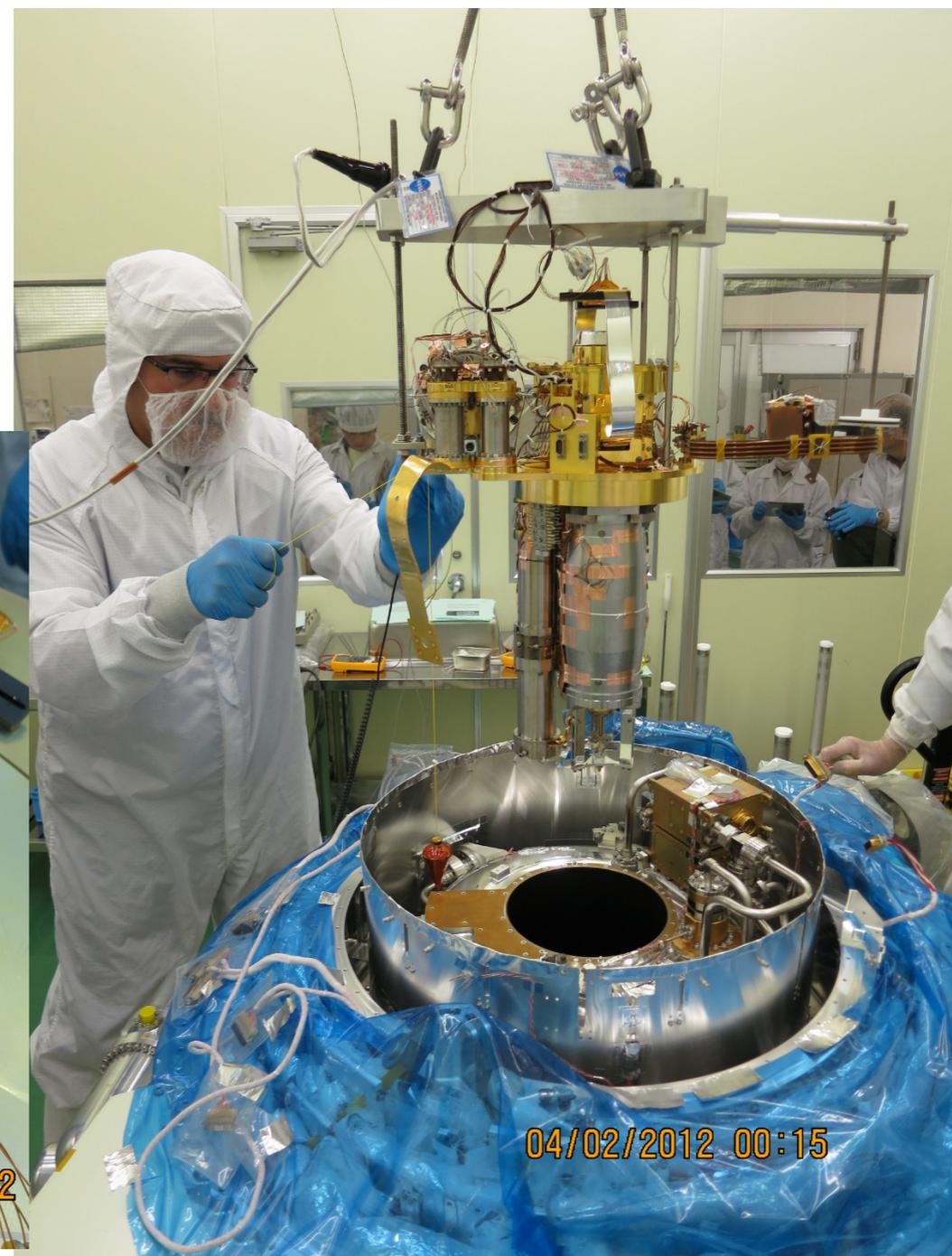
- X-ray micro-calorimeter spectrometer with energy resolution better than 7 eV (FWHM)
- 6 x 6 array with 3' x 3' field of view
- Operated at 50 mK
 - Nominal expected liquid He lifetime 3.3 years



SXS detector assembly



NASA/GSFC

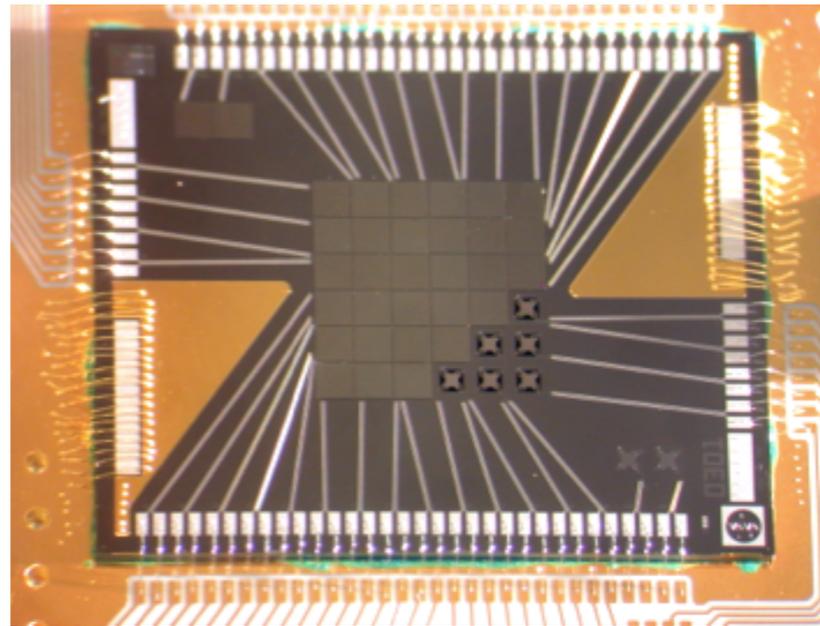
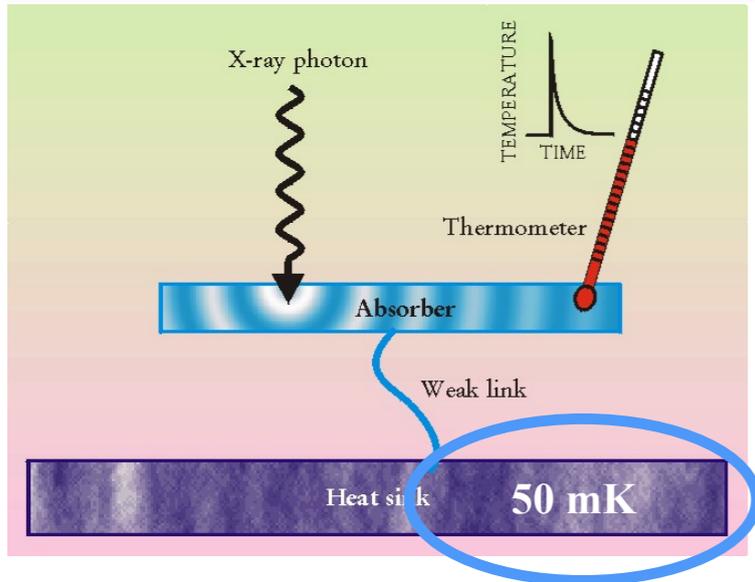


Sumitomo Heavy Industries, Ltd.
SXS dewar **JAXA**

Micro Calorimeter System (SXS)



Thermal Detection of X-Rays

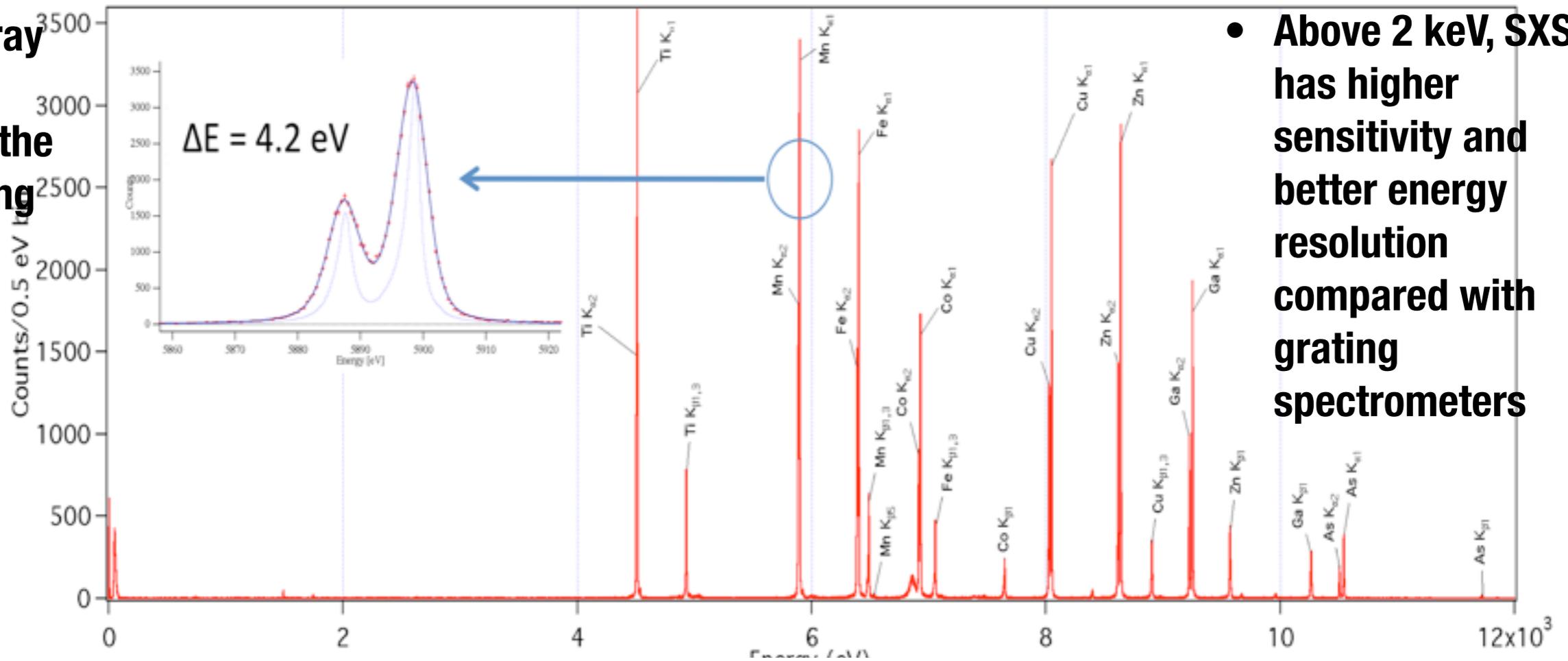


Ion-implanted Si thermometer

**HgTe absorber
(~ 8 microns thick)**

**Pixel size: 824 x 824 microns
(30 x 30 arcsec)**

**Laboratory X-ray spectrum
obtained with the
SXS Engineering
Model**



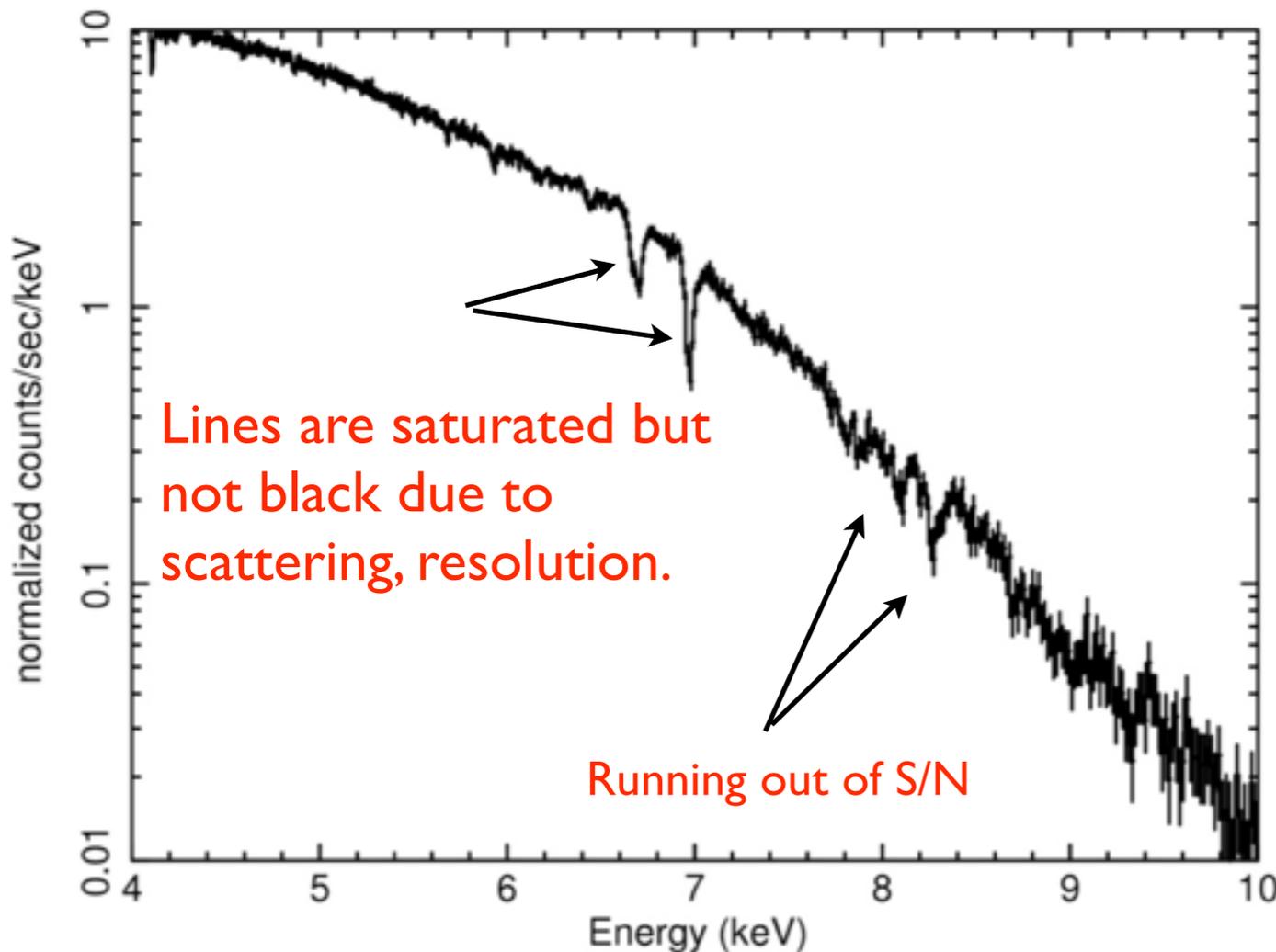
- Above 2 keV, SXS has higher sensitivity and better energy resolution compared with grating spectrometers**

GRO J1655-40 (Black Hole)

The superior resolution of SXS in the Fe K band enables the unambiguous detection of weak and narrow lines from a wind.

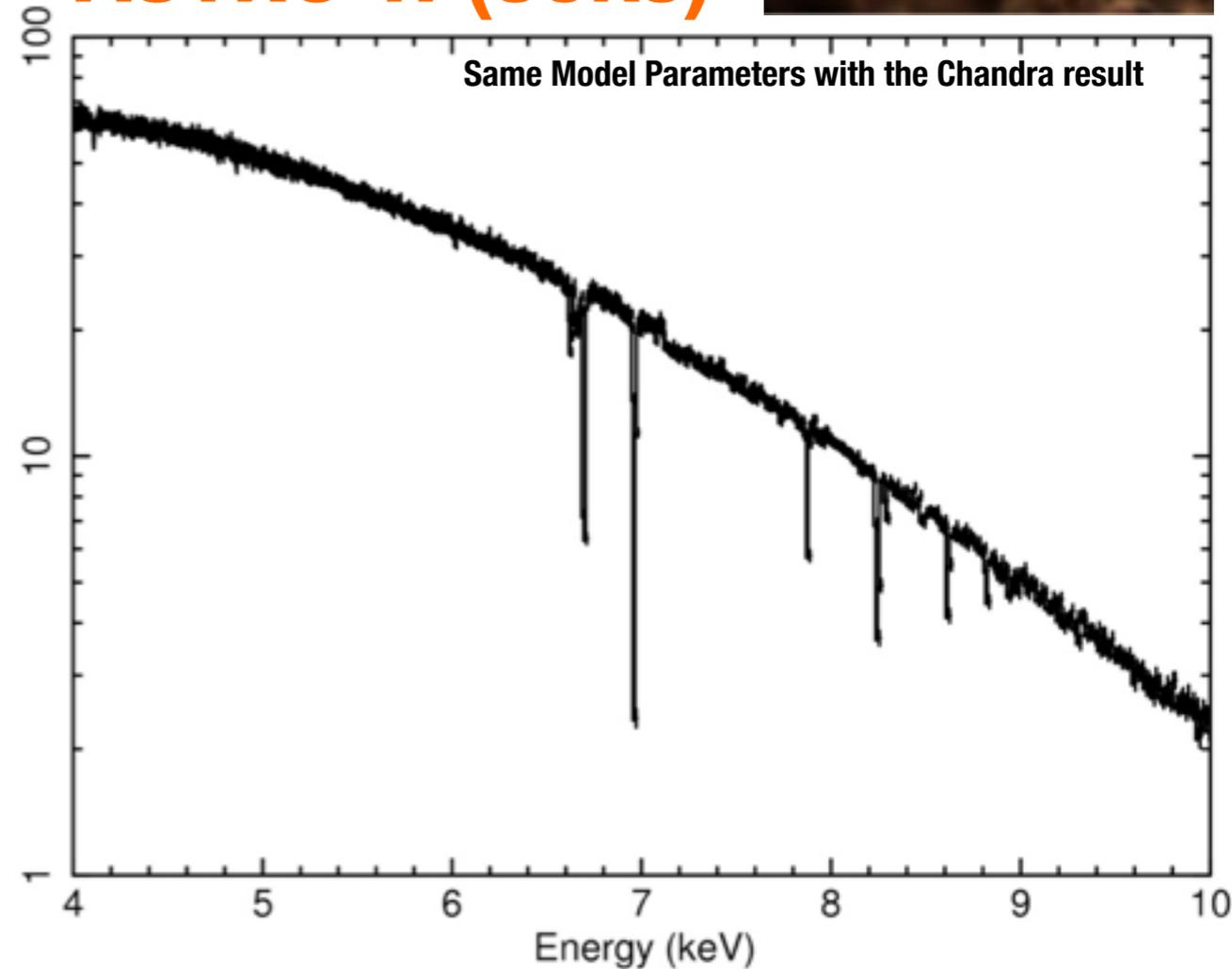


Chandra



(Simulation by J. Miller)

ASTRO-H (50ks)



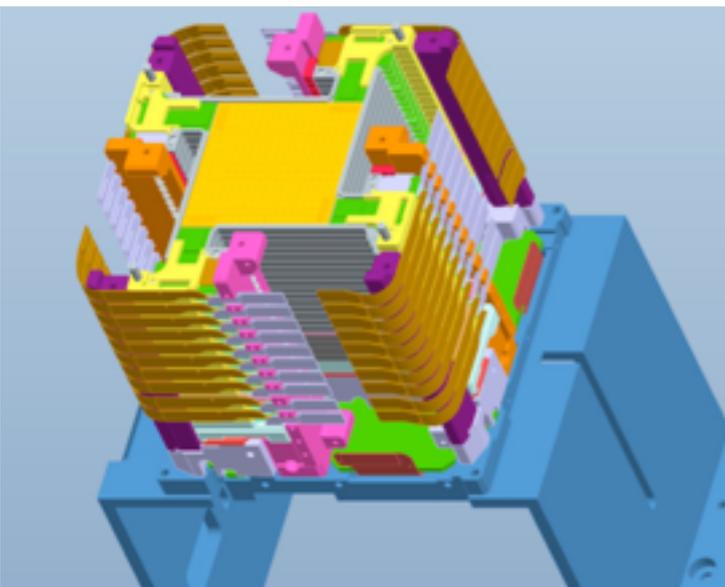
ASTRO-H SXS can handle 250 cts/s

ASTRO-H Features --- 硬X線、サブMeVガンマ線観測---

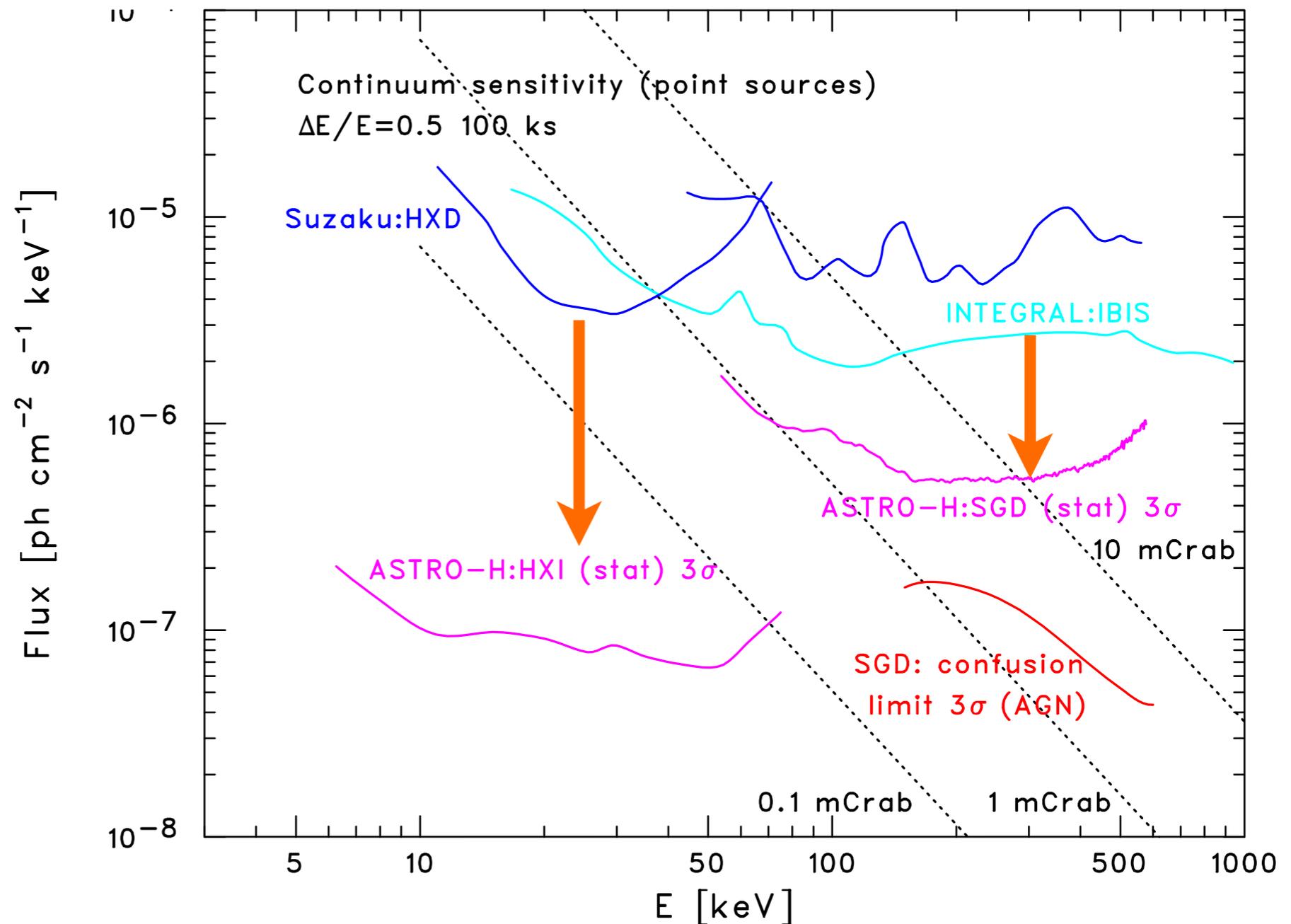
- Pt/C depth-graded multilayer Hard X-ray telescope + Imager



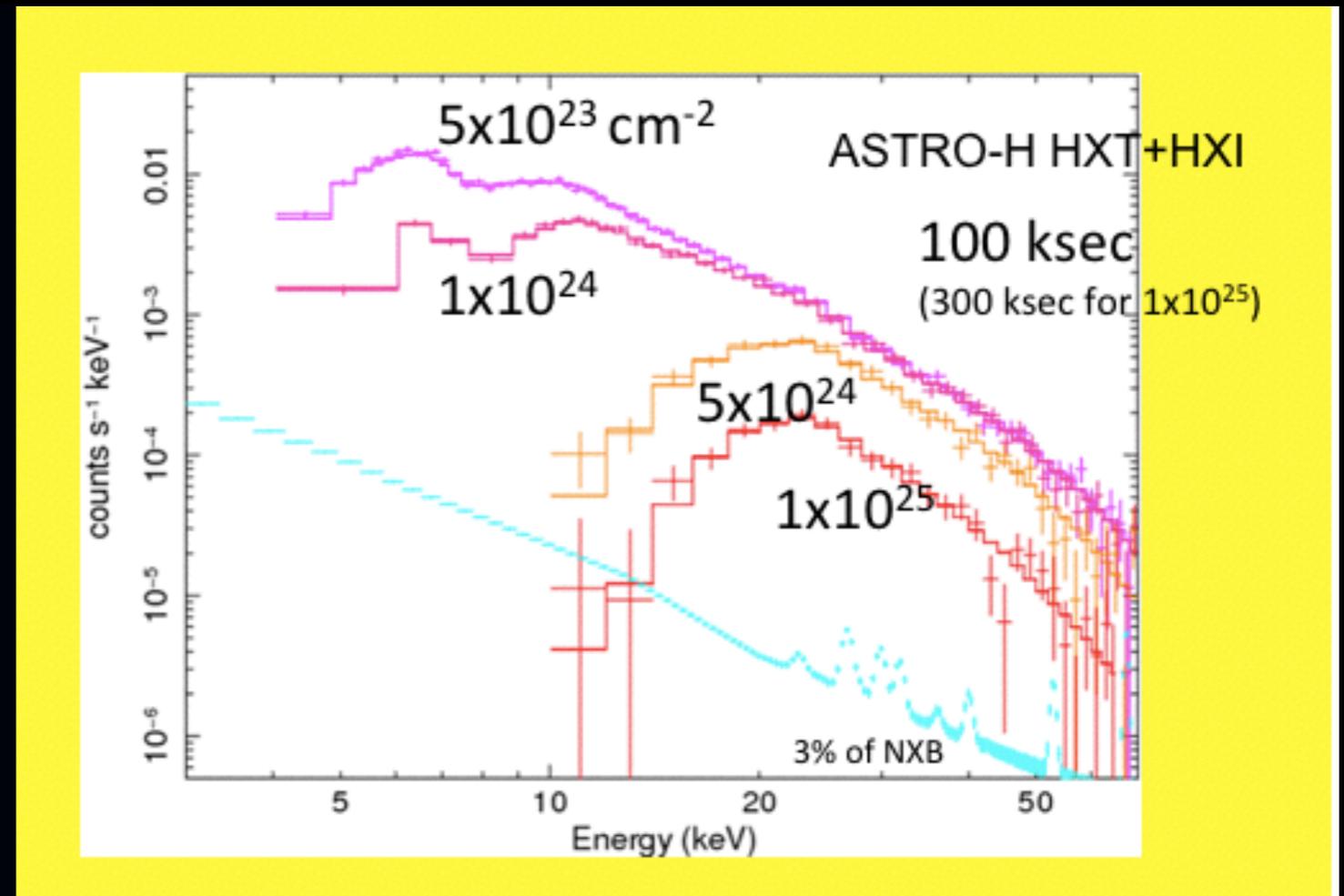
- Si/CdTe Compton Camera (upto 0.6 MeV)



Vast Improvements of the sensitivity in the energy window from 10 keV to 600 keV



巨大ブラックホールは、銀河と共に成長している気配が見え始めている。それを可能にする「物理」は何なのか。遠方の銀河の中心に隠された巨大ブラックホールを見つけだし、ブラックホールから銀河に送り込まれるエネルギーの正体を研究する。



Find Hidden Blackholes
with the unprecedented sensitivity

理工一体ミッションとしてのASTRO-H。工学的な挑戦

P2-008: X線天文衛星 ASTRO-Hの構造設計

著者リスト
河野 太郎, 石村 康生, 峯杉 賢治, 高橋 忠幸 (ISAS)
東海林 和典, 対馬 雅明 (NECE)
池田 瑞穂, 尾曲 邦之, 隈下 恭介 (NEC)
立川 清隆, 阿部 和弘, 鬼頭 玲 (NIPPI)
他ASTRO-Hチーム

1. 概要

ASTRO-Hの構造的な特徴は、全長12m質量2.4t (計画) という大型性と、高い指向精度要求にある。特に、その大きさに比べて非常に高い指向精度要求を軌道上で確実に満たすため、ASTRO-Hの構造検証計画の中には一般的な正弦波振動、音響、衝撃試験に加えて、熱変形と微小擾乱の検証試験が含まれており、現在それら検証試験のうち熱変形試験のSTEP 2までが終了している。熱変形試験の中では、熱的に過渡状態での計測、連続計測による温度変化と変位の相関性の検証、新規開発の変位計測装置の導入など極めて精度が高いと考えられる測定結果を得た。MTM試験や微小擾乱試験については、本年春以降の実施に向け資材などの準備を進めている。

2. ASTRO-H 衛星構造概要

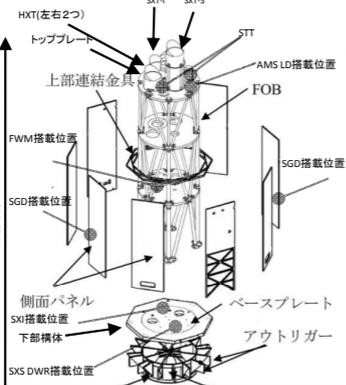
ASTRO-Hの軌道上での概形を図1に、ASTRO-Hの主要なサブシステムの位置と概要を表1に、衛星の構造概略と各サブの取り付け位置を図2に示す。中央に長焦点距離の望遠鏡を搭載するため、バスの1次構造が中央部を避けたパネル様式となっているのが特徴である。



図1 軌道上外観

表1 主要機器、サブシステムの概要

略称	概要
HXT	硬X線望遠鏡
SXT	軟X線望遠鏡
STT	スタートラッカー
SXS	精密軟X線分光装置。極低温まで冷やすための冷凍機とデューア (SXS DWR) を持つ。
SXI	軟X線カメラ
AMS	HXIプレートのアライメントモニター。レーザー光源 (AMS-LD) とターゲットマーカー (AMS-T) によりEOB伸張方向と直交する2軸の変位を検出。
SGD	軟γ線検出器。
HXI	硬X線検出器。
FWM	フィルターホルダー。SXSへの入射強度調整のためのフィルターと校正用の機器を含む。固定式の光学ベンチ、トッププレート (TP)、ミドルプレート (MP)、ロープレート (LP) の三段をCFRP柱及びアルミフィッティングで接続。望遠鏡と検出器の相対位置、相対姿勢を維持する。
FOB	軌道上で伸張する約6mの光学ベンチ。焦点距離の長いHXT(12m)に対応し、HXT-HXIの間に求められる相対位置、相対姿勢を維持する。
EOB	大半の電子機器、軟γ線検出器が取り付け衛星



3. 観測機器の指向精度要求

ASTRO-H構造として達成すべき目標となる各機器の指向精度要求は表2の通りである。軌道上で各機器がこの精度を達成するよう、アライメント、熱変形、微小擾乱などの各誤差要因に対して指向変動の許容値を機器ごとに割り当て、それを満たすかという観点で、解析及び試験を実施している。要因一覧とそれに対する検証計画は表3に示す。システムレベルではMTM、熱変形、微小擾乱に関して設計検証のための試験を実施する計画である。

表2 各観測機器の観測要求精度

	望遠鏡光軸	中心軸
SXS(X線分光装置)	<120 arcsec	<53 arcsec
SXI(X線検出器)	<120 arcsec	<184 arcsec
HXI(X線検出器)	<60 arcsec	<52 arcsec
SGD(軟γ線検出器)	<200 arcsec	NA

*光軸: 望遠鏡の性能が理想的な望遠鏡のみで決まる光学的な軸
*中心軸: 望遠鏡の評価点と観測機器の評価点を結んだ、各観測機器の観測軸
各誤差要因ごとに試験で検証すべき数値はこれよりおよそ一桁小さい値となる。

表3 検証計画

誤差要因	システム検証
アライメント調整残差	○
機械環境試験時変動	○
保管時変動	-
固定バイアス	○
打上時変動	○
1G振度	○
形変	○
熱変 (固定バイアス)	○
熱変 (経年劣化)	○

P2-009 X線天文衛星ASTRO-Hの熱制御システム

岩田直子, 小川博之, 高橋忠幸 (JAXA/ISAS), 臼井隆, 三木明彦, 池田瑞穂, 飯田浩 (NEC), 湯本隆宏, 小野ゆかり, 阿部和弘, 立川清隆 (NIPPI), 他ASTRO-Hプロジェクトチーム

1. 衛星熱設計概要

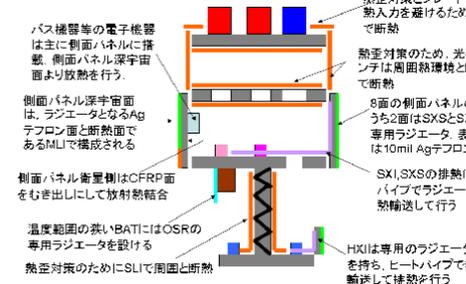
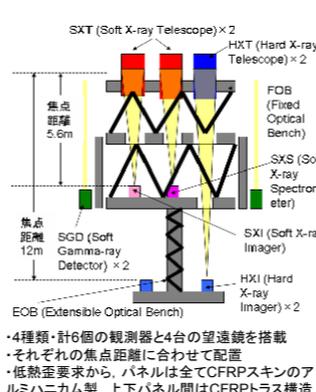
高いエネルギー分解能などの科学成果を得るための熱設計への重要な要求は次の2点:

1) 各観測機器の観測軸と光軸を正確に一致させるための低熱歪要求を満たす衛星構体の熱設計を実現すること

→ サーマルダブらは主として熱伝導率80W/mKのピッチ系CFRPを使用し、ダブラーパネル間で線膨張率に差異が出ないようにしている。FOB間の温度勾配を最小化するために、側面パネルから上部をMLIで覆い外部熱環境からFOBを断熱している。

2) 各観測機器が所定の性能を維持できるように各機器の熱設計要求を満たすこと

→ 観測機器のうち検出器に相当するSXS, SXI, SGD, HXIはそれぞれ独自のラジエータを有し、ラジエータまでの熱輸送はヒートパイプにより行う。ヒートパイプはすべて冗長構成となっており、dual channelのものあるいはsingle channelのものを2本以上並列して使用している。望遠鏡はその狭い許容温度範囲を維持するため周囲とは断熱し独立熱設計としている。



＜熱解析による熱設計成立性の確認＞
システムは観測機器を含む各サブシステムが作成した1/F熱数学モデルを統合し、合計で22000以上になるノード数の熱数学モデルを用いて軌道上熱解析を行う。解析ケースは次の14ケース: 初期運用2ケース、定常運用については高温最悪ケースが4ケース、低温最悪ケースが3ケース、UVCを含む異常運用ケースが3ケース、SXSとSXIの冷凍機が故障した際のケースが2ケース。

2. 代表的なミッション機器の熱設計

硬X線望遠鏡 (HXT)

HXTは結像性能を満たすために20°Cから31°Cの範囲に維持しなければならない。要求温度範囲が狭いため、周囲とは断熱されている。

軟X線分光器カリメータ (SXS-XCS)

検出器は、冷凍機・液体ヘリウム (LHe)、断熱冷凍機・冷却チェーンにより50mKまで冷却される。LHeを3年間以上使つたために、LHeへの熱リキーク量は0.1mW以下に抑えなければならない。

2つの排熱バス:
1) 側面パネルに取り付けられた2枚のラジエータから排熱。ラジエータまではヒートパイプ及びルーブヒートパイプによる熱輸送。
2) Dewar表面及び冷凍機表面 (いずれも銀蒸着テフロン面) から放射による排熱。Dewarの周囲は、アルミ蒸着面を最外層とするMLIで構成される「リフレクタ」で囲われており、Dewar表面からの放射熱がリフレクタで反射することにより直接深宇宙に面していない面も効率的に放射冷却できる。

P2-010: X線天文衛星 ASTRO-Hの姿勢制御系サブシステムの開発

坂東信尚, 坂井真一郎, 斎藤徹, 尾郷慶太, 春名泰之, 田近雅也, 堂谷忠靖, 国分紀秀, 高橋忠幸, ASTRO-H プロジェクトチーム

ASTRO-H 姿勢制御系サブシステムの特徴

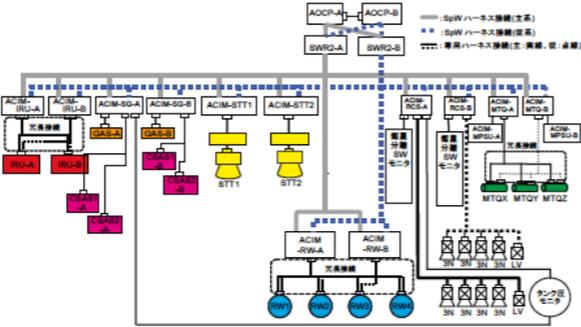
- 高い姿勢精度要求を満たし、さらに高い信頼性を確保するための機器構成になっていること
- 大きい外乱 (重力傾斜トルク) 下でもあっても高い制御精度を満たすゼロモーメント方式であること
- リアルタイム性が保証されている姿勢系 SpW ネットワークが構成されていること

主要性能

ASTRO-Hの観測要求を満たすために、下記のような姿勢制御/決定精度を満たす制御系システムの設計/検証が行われている。大型のASTRO-Hの姿勢制御 (姿勢維持・変更) のため蓄積角運動量の大きいRW (Reaction Wheel) を搭載し、現在開発が進められている世界最高レベルの姿勢決定精度を持つ STT (Star Tracker) により ASTRO-Hの姿勢決定系が構成されている。

機器構成・配置

姿勢制御系サブシステムは姿勢系 SpW ネットワークを介して AACP と各センサ/アクチュエータが接続されている。AACP、SpW ルータ、ハーネス、ACIM (Interface Module) は基本的に冗長構成となっており、FDIR (Fault Detection Isolation and Reconfiguration) 機能により、異常検出時には適切に主従機器の切り替えが行われる。



ASTRO-H 姿勢系機器構成図

項目	内容	
姿勢決定精度	X/Y 軸 [arcsec(3σ)]	10
	Z 軸 [arcsec(3σ)]	30
姿勢制御精度※	X/Y 軸 [arcsec(3σ)]	3
	Z 軸 [arcsec(3σ)]	12
姿勢安定度※	X/Y 軸 [arcsec/4s(3σ)]	0.8
	Z 軸 [arcsec/4s(3σ)]	4.0
姿勢変更※	180°姿勢変更時間:	
	100分 (観測要求) 72分 (設計値: RW4 台時)	

※RW3 台時を除く

P2-011 X線天文衛星 ASTRO-H 電源系サブシステムの開発

嶋田 貴信、廣瀬 和之、久木田 明夫、池田 博一、大串 義雄、尾崎 正伸、堂谷 忠靖、岡崎 健、高橋 忠幸 (ISAS/JAXA)、野崎 幸重、村松 文志 (NTSpace)、水島 和代 (NEC)

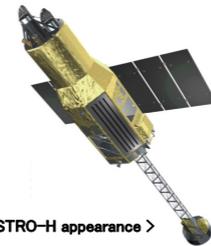
ASTRO-H の概要

観測システムおよび衛星構造

- X線望遠鏡、X線検出器、CCDカメラ、マイクロカリメータ
- 望遠鏡は固定式光学ベンチ (FOB) 上部に搭載
- 八角形をしたベースパネル (2.4 m × 2.4 m) の下部構造と8枚のサイドパネルから構成

電源系に対する設計要求

- 電力要求: 観測系負荷 (890 W) + バス (950W) + 充電電力 (1.4kW)
- SAP 許容入射角: 30° 以下
- バッテリー充電サイクル数: 3年以上
- NEA (non-explosive actuators) I/F: SXS パネルに必要なI/Fを有すること



＜ASTRO-H appearance＞

＜ASTRO-H Mission Overview＞

Launch	Date	Summer in 2014
Vehicle	JAXA H-IIA rocket	
Mass (Observation instruments)	2,700 kg (inc. 1,450 kg)	
Power	3,500 W @EOL	
Total length	14 m (after deploying EOB)	
Orbit	Type	Approximate circular orbit
	Altitude	Approx. 550 km
	Inclination	< 31 degree
	Period	96 minutes
Mission duration	> 3 years (goal of 5 years)	

電源系サブシステムの概要

設計結果・仕様

- SAP発生電力: 3,500 W 以上 at EOL (θs: 30° SAP電圧: 55 V)
- バッテリー総電力量: 200 Ah at BOL
- 充電電流 (レベル切替え可能): 16 A / 30 A of constant current (CC)

電源系の主な機能

- バス電源供給 (1.86 kW@日照中)
 - バス電源安定起動 (POC)
- 日照時バス電圧安定化制御 (50 V)
 - コマンド・テレメトリ処理
- バッテリー充電制御
 - RCS系へのバス電源供給インヒビット
- バッテリー充電電管理 (OCCV, OV, OT, UVC)
 - 地上試験装置I/F
- NEA駆動電源供給



Specifications for the electrical power subsystem as of 2012.10

Component	Specifications
Solar array paddles (SAPs)	- Configuration: 2 paddle wings, 3 panels / wing
	- Generated power: 3,500 W or more at EOL
	- Solar cells: Triple-junction cells
Power control unit (PCU)	- Bus voltage range: 51.0 V to 52.0 V
	- Bus power supply distribution: 54 ch
	- Ground test equipment interface
Shunt dissipater (SAP2)	- Shunt method: Concomitant of analog & digital
	- Shunt control power: 2,695 W at 50 V
	- No. of shunt stages: 14 digital and 7 analog stages

世界中の科学者を「巻き込んだ」開発



システムCDR1を終了(2012年2月)

ベースプレート、固定光学ベンチ、サイドパネル等の構造体にPFMを使用した供試体 を用い

1)熱ひずみ試験(2012年4~6月)

2)システムTTM(熱試験モデル)による熱バランス試験(2012年6月~8月)

3)望遠鏡を設置するトッププレートと、光学伸展ベンチ(EOB)のソーラー光照射試験(2012年8月~9月)を終了。

ASTRO-Hの高い指向性能要求を確保する上で、懸念であった熱構造設計について、その妥当性を検証中。現時点では大きな問題は見つかっていない。

搭載機器のEM(エンジニアリングモデル)を使った試験と共に、FM製造がはじまっている。EMで見つかった課題を解決し、それをFMに反映させる作業を遅延なく行う必要がある。

今後、擾乱試験、システムMTM試験とつづき、6月より1次噛み合わせ試験。

2014年度中に衛星を完成予定。様々な周辺状況から、打ち上げは2015年度になる公算である。

ケンブリッジ大学での

ASTRO-Hサイエンス会議 (2012年7月)





表3 計測系

名称	台数	型番等
レーザー変位計(LD)	最大 12 台	キーエンス LK-H155 直線性: ±0.02% of 80mm 計測レンジ: ±40mm
オートコリメータ(AC)	最大 6 台	Nikon インストルメンツ 6D 面の傾斜角(2軸)を秒角精 度で計測可能。画像処理ソ フトAD-4改により1秒毎の連 続計測・記録が可能。
長距離間の高精度面 内変位計測装置 (レーザー光源及び PSD)	最大 2 台	新規開発品 ⁽⁶⁾
カメラシステム (望遠レンズ搭載の CCDカメラ、マーカー)	最大 2 台	新規開発品。 画像解析により長距離間の 高精度な面内変位計測を実 現。上述のレーザー光源を 利用した新規開発品と機能 的には同等



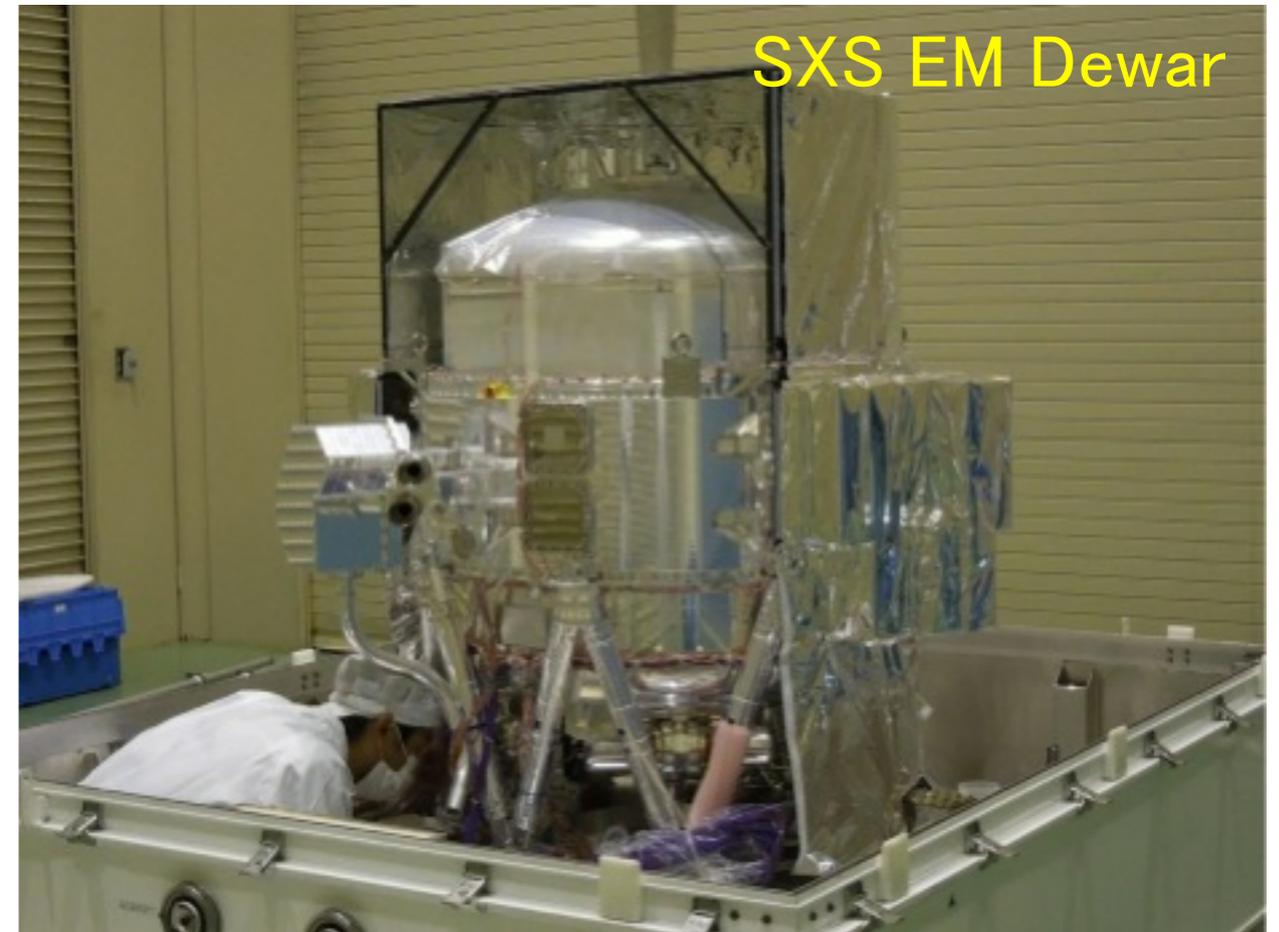
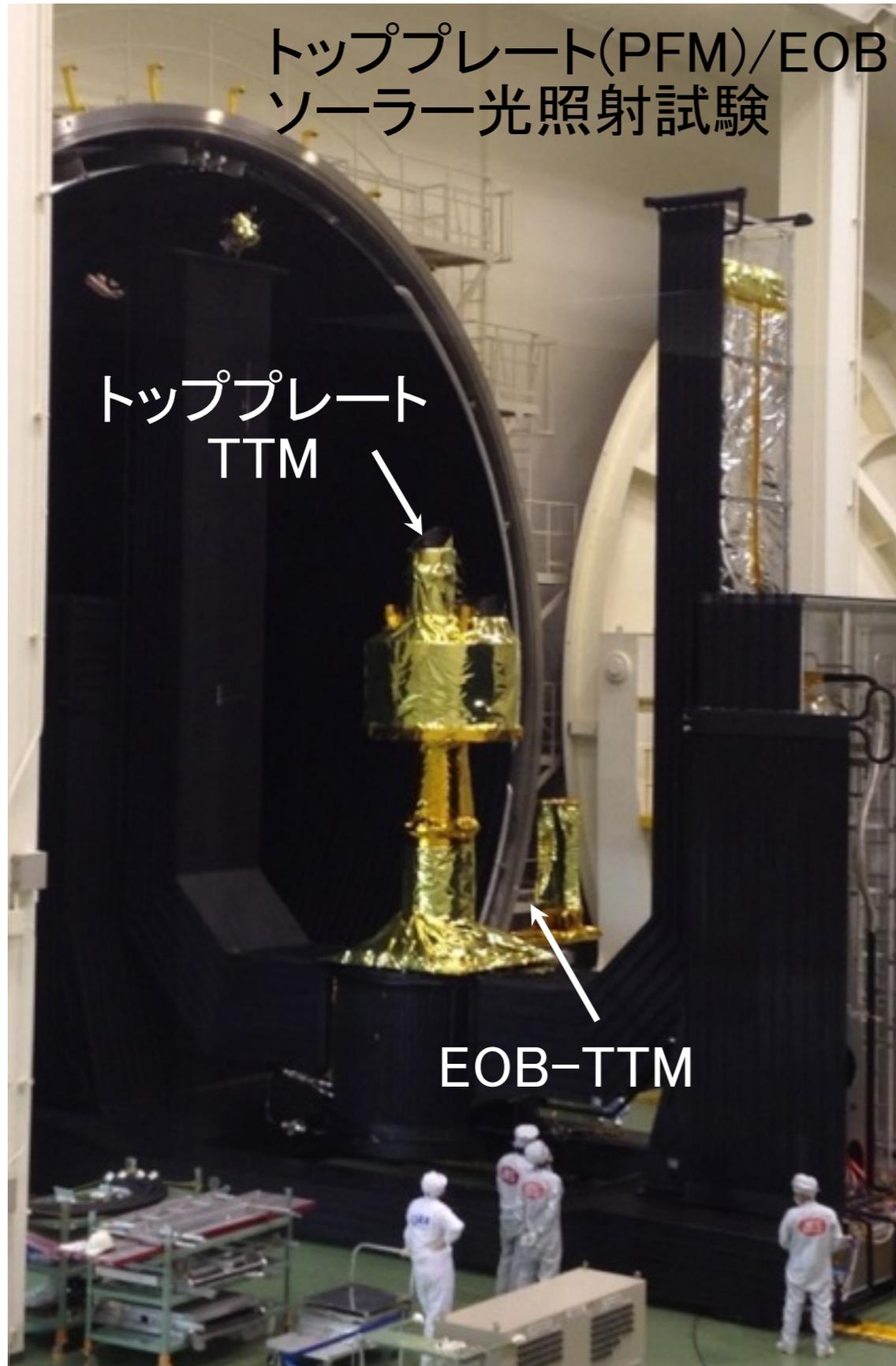
System TTM (Thermal Test Model) test (Aug-Sep, 2012)



ASTRO-H in JAXA's 13 m thermal-vacuum chamber

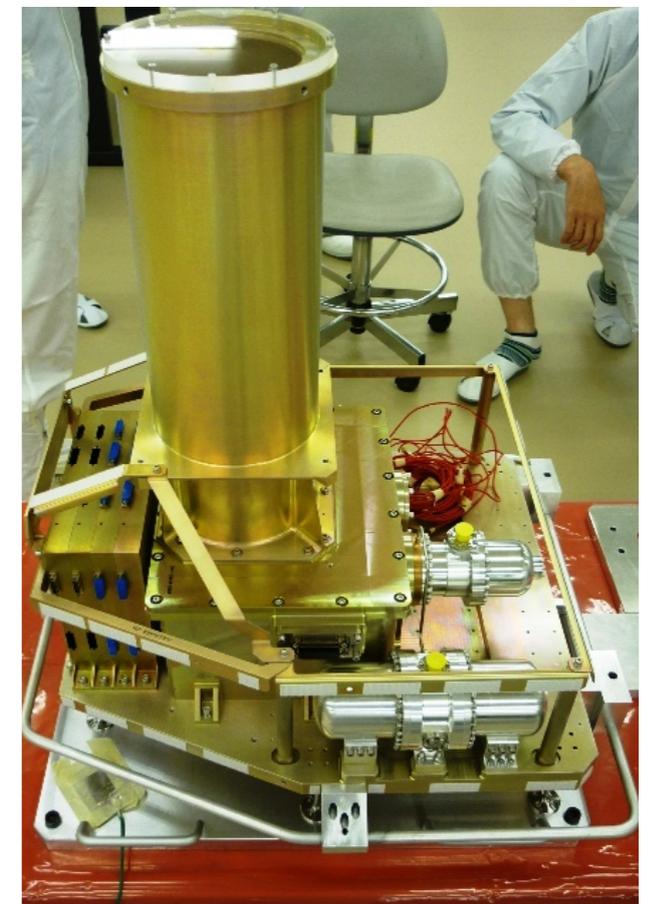
ASTRO-H衛星の進捗

(2012/Sep)



SXI EM

SXI X線CCD

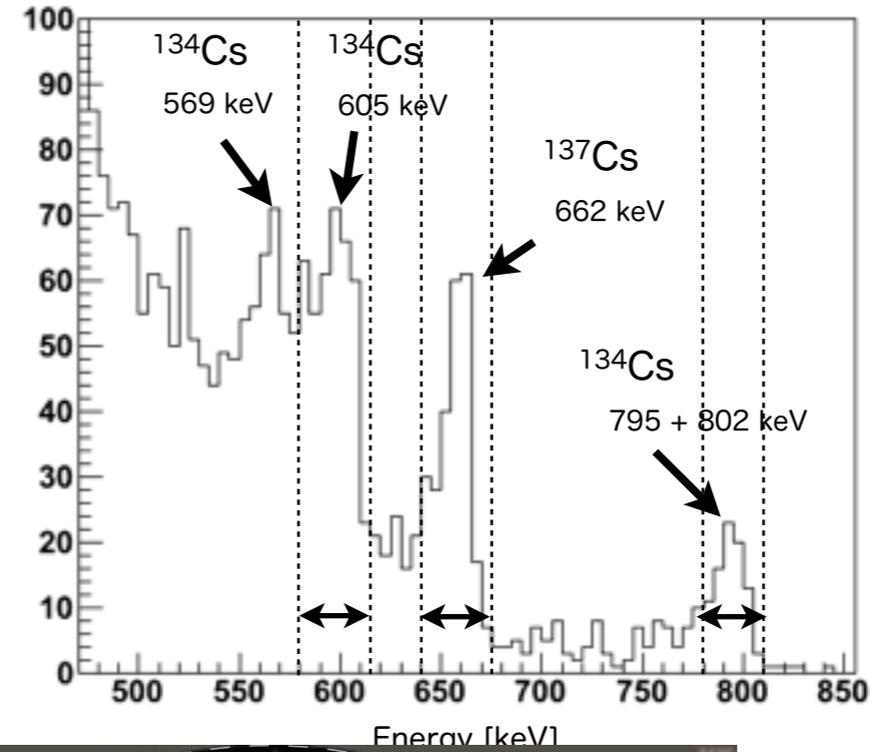


ASTRO-Hの社会貢献：福島における放射線分布測定試験(2月)

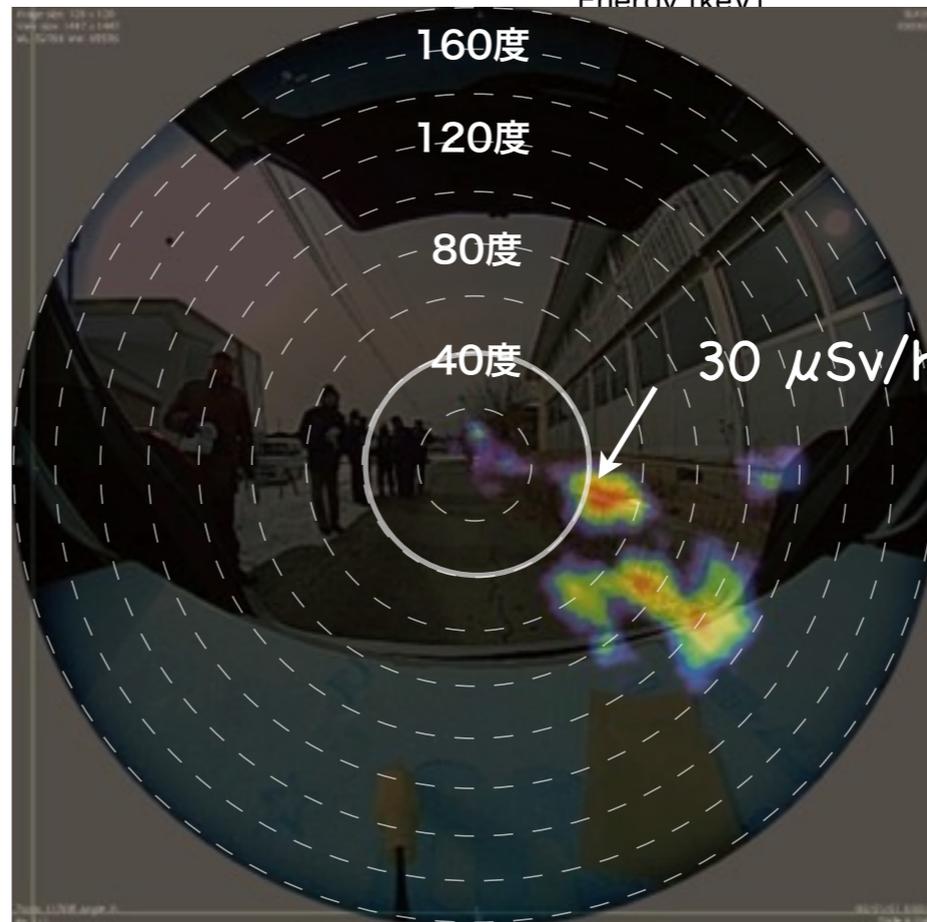
「超広角コンプトンカメラ」による測定・撮像

(ASTRO-Hのために開発した技術の応用) JAXA プレスリリース(H24/3/29)

超広角コンプトンカメラ
実証モデルユニット



2012年2月



左は魚眼レンズを付けたカメラ、右は超広角コンプトンカメラで撮影した画像。セシウム134,137から直接放出される605, 662, 795, 802キロ電子ボルトのガンマ線の強度(フラックス)分布、赤が強度が高く、青が強度が低い。

<まとめ>

- 現在の宇宙物理学では、電波からガンマ線までの全ての電磁波を用いて総合的に現在の姿、進化の歴史を捉えることが必要。可視光・サブミリ波がより遠方での天体探査に適しているのに対し、**X線は非常に高温(100万度以上)の環境、極限重力環境を探るのに適している。**
- 超新星残骸や銀河団中の高温ガスの運動、遠方銀河団のダイナミックな進化、ガスに含まれた巨大ブラックホールの形成と銀河形成の関連などの研究では**ASTRO-Hによる超高分解能分光や広い波長域にわたる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線天文学が飛躍的に発展し、**宇宙物理学に大きなインパクトを与えることができる。
- 2012年7月 SPIE ASTRO-Hセッション
2012年7月 ヨーロッパ天文学会、ASTRO-H特別セッション
2013年3月20日天文学会 ASTRO-H 特別セッション



ASTRO-Hチーム

