



# X線天文衛星 ASTRO-H による精密分光

**江副 祐一郎**

首都大学東京 理工・物理

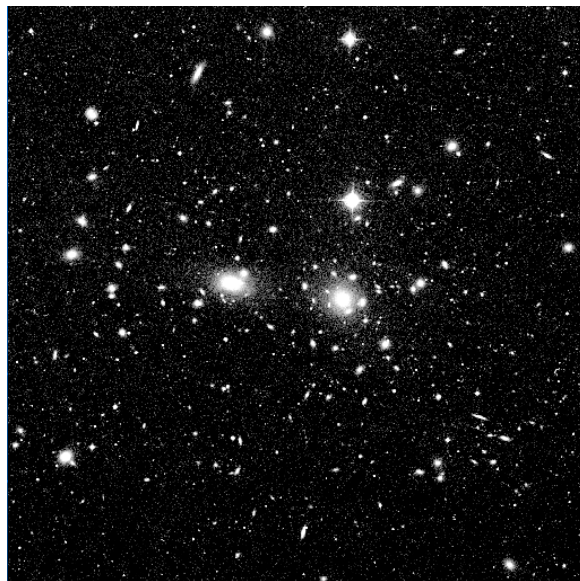
2016年1月27日(水)、合同研究会 @ 核融合研究所

# 本日の内容

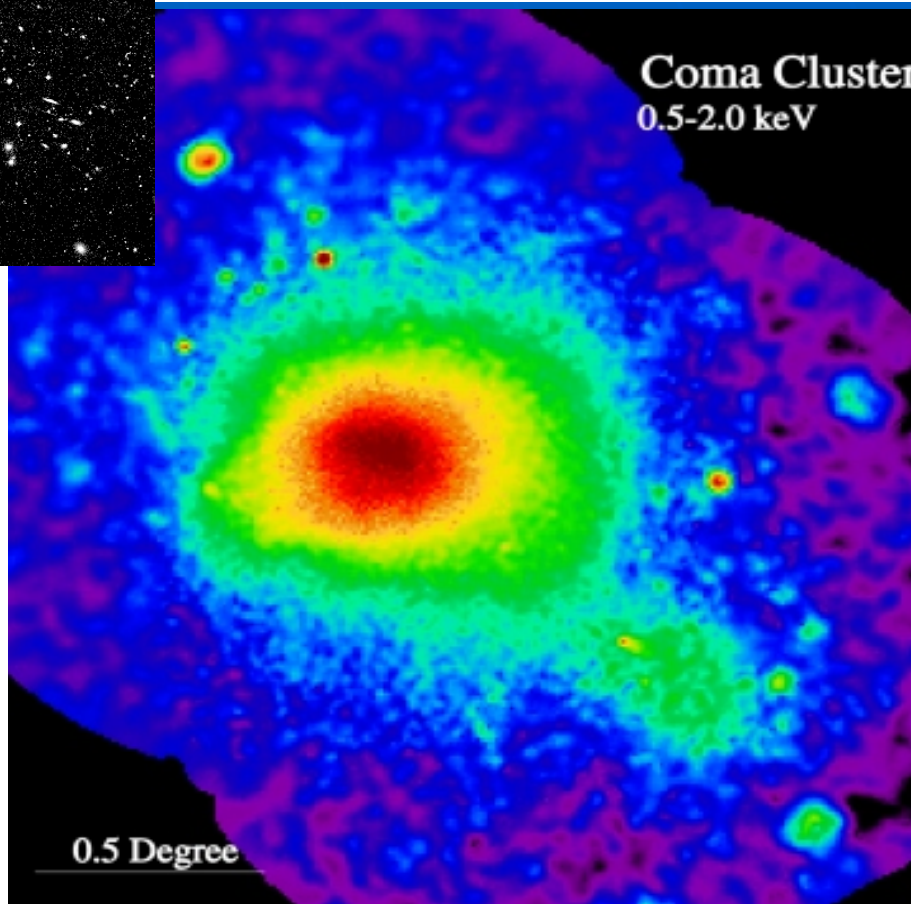
- **X線天文と ASTRO-H**
- **ASTRO-H による精密分光**
- **Beyond ASTRO-H**
- **まとめ**

# 宇宙物理とX線天文学

- 宇宙物理の大目標：宇宙の物質・構造の起源と進化を知る
- さまざまな手段(電磁波, 宇宙線, 重力波)での観測が必要



髪の毛座銀河団  
可視光 (銀河 ~1000 個)



X線 (高温プラズマ)  
暗黒物質の重力に束縛  
~100万光年に分布

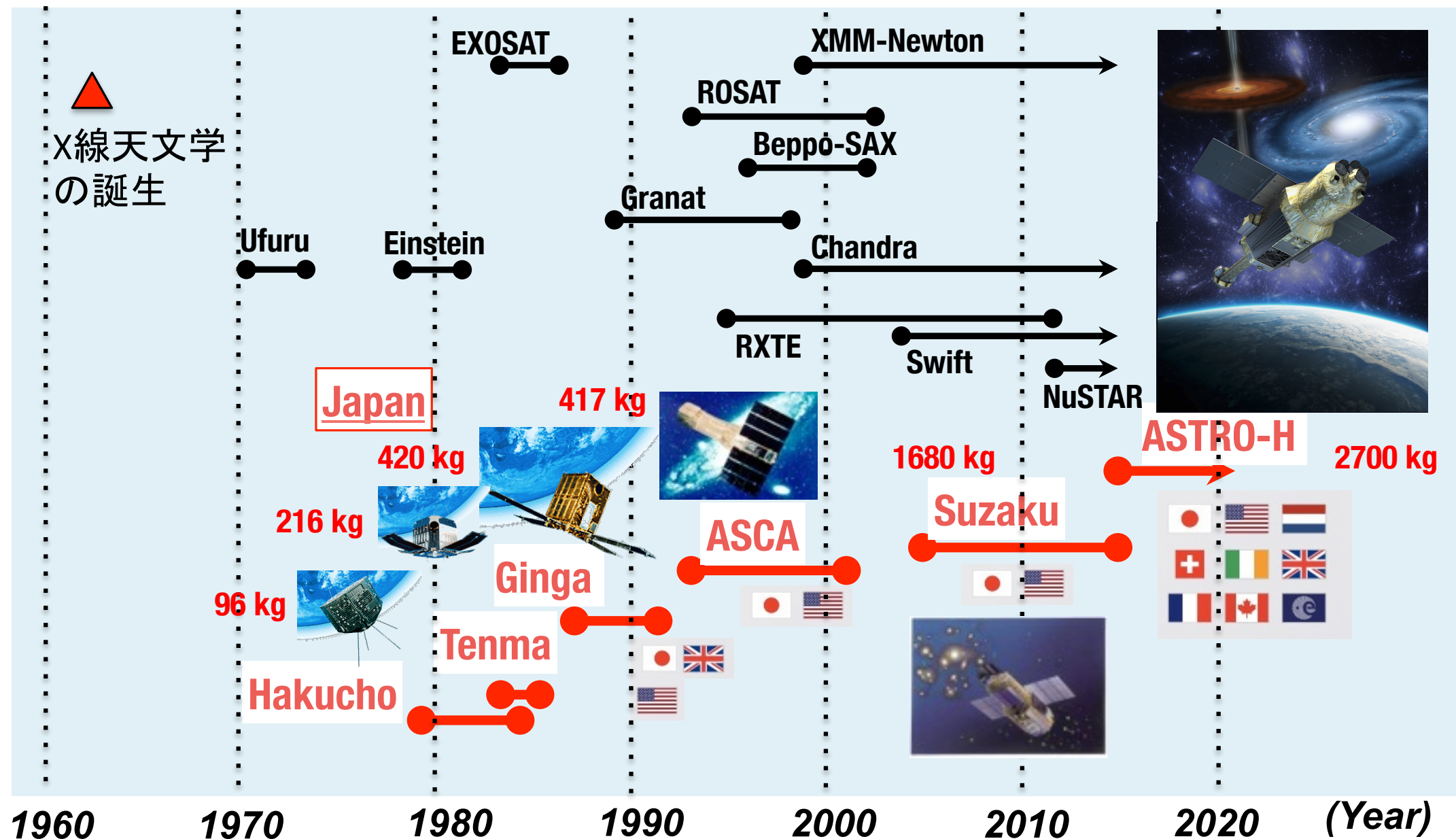
## 「X線の利点」

典型的に 0.3-600 keV

- 宇宙の**高エネルギー現象**を探る
  - 粒子加速 (keV-TeV), プラズマ加熱
- 輝線・吸収線を使った**プラズマ診断**
  - 化学組成, 密度, 温度, 運動
- そもそも宇宙の**物質(バリオン)**の約80%はX線でしか観測できない  
(Fukugita & Peebles 2004, Read & Trentham 2005)

# 日本のX線天文衛星

- 宇宙からのX線は地球大気で吸収, **飛行体**が不可欠
- 日本は**継続した衛星計画**で世界を牽引, 活動的宇宙を明らかに





# ASTRO-H 概要

14 m, 2700 kg  
Low earth orbit  
550 km, 31°

X-ray Telescopes

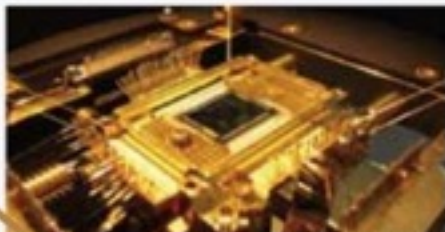


## Reflecting X-ray Telescopes (SXT/HXT)

This instrument focuses X-rays from celestial objects onto the detectors. Unlike the single lenses and mirrors usually used for visible light, this X-ray reflecting telescope is made up of over one thousand reflector-coated aluminum foils stacked into concentric circles.

## Soft X-ray Spectrometer (SXS)

Specialized detector elements are cooled down to near absolute zero (-273 degrees Celsius) using a series of refrigeration units. When an X-ray hits a detector element, its temperature slightly rises. This increase in "heat" is measured, and from this the energy of the incident X-ray can be estimated to a higher degree of accuracy than any achieved to date. Researchers from around the world have great expectations for this instrument, the centerpiece of ASTRO-H.



Close-up view of the main sensor part.

Micro Calorimeter

CCD



## Soft X-ray Imager (SXI)

This is a wide field-of-view X-ray camera using an array of four large-format X-ray CCD chips. It provide simultaneous imaging and spectroscopic data in the energy range of 0.5 keV to 12 keV. The detector will be placed in the main body of the satellite.

Si/CdTe Compton Camera



## Soft Gamma-ray Detector (SGD)

Many layers of semiconductor sensors are stacked to optimize the sensitivity of the gamma-ray spectrometer. Since gamma-rays have a higher penetrating power than X-rays, this instrument plays an important role investigating astronomical objects surrounded by dense gas.



X-ray sensor and signal-processing electronics

## Hard X-ray Imager (HXI)

This produces images of objects in the hard X-rays above 5 keV using a combination of silicon and cadmium telluride semi-conductors. Since this imaging telescope has a 12-meter focal length, this sensor will be placed at the end of a boom which will be extended in orbit.

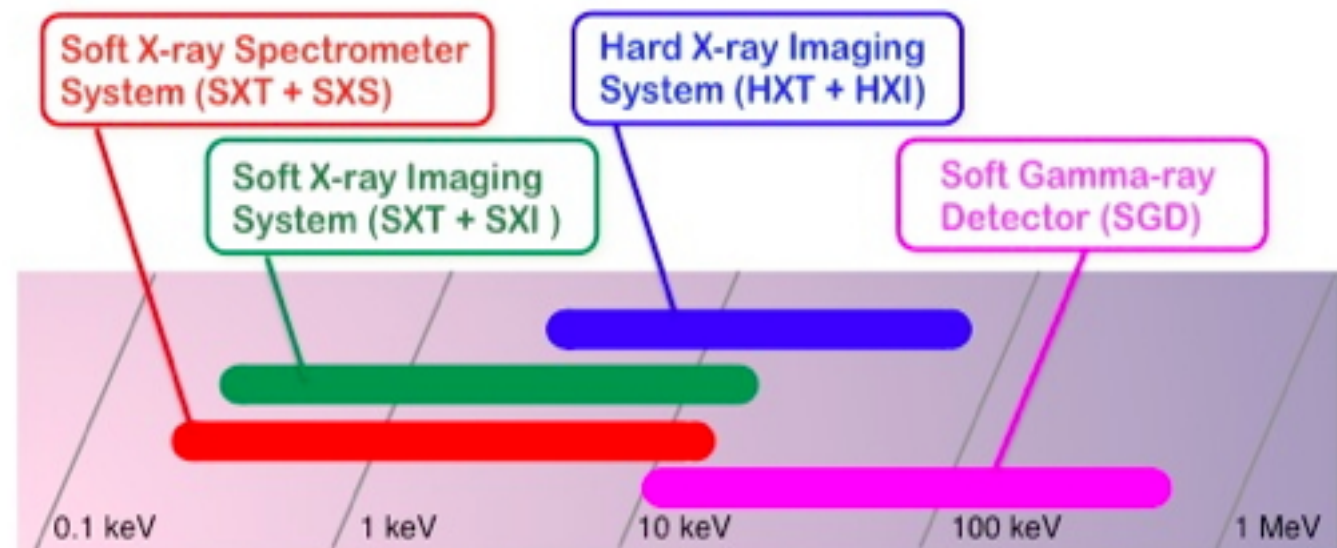
Si/CdTe Imager

- 1. High Resolution Spectroscopy by a micro-calorimeter array

- Extended objects, Fe K lines

- 2. Wide-Band/High Sensitivity Observation

- 0.3-600 keV, thermal + non-thermal emissions



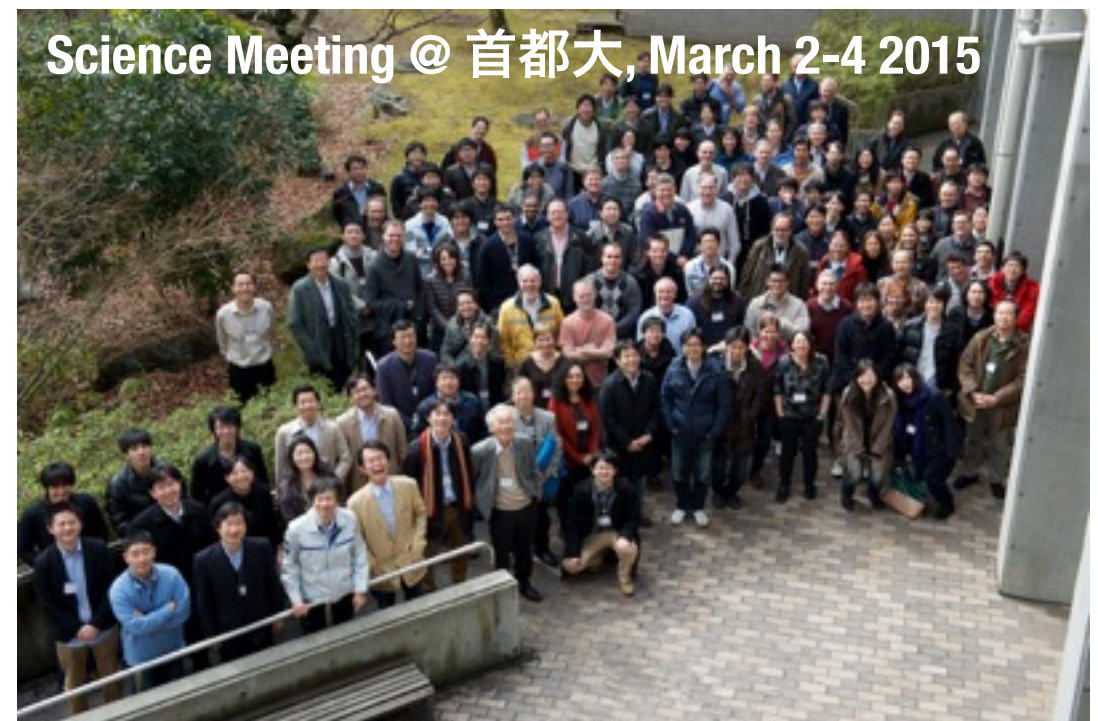


# ASTRO-H collaboration

国内34機関, 海外27機関, メーカー

## The ASTRO-H X-ray Observatory

Tadayuki Takahashi<sup>a</sup>, Kazuhisa Mitsuda<sup>a</sup>, Richard Kelley<sup>b</sup>, Henri Aarts<sup>c</sup>, Felix Aharonian<sup>d</sup>, Hiroki Akamatsu<sup>c</sup>, Fumie Akimoto<sup>e</sup>, Steve Allen<sup>f</sup>, Naohisa Anabuki<sup>g</sup>, Lorella Angelini<sup>b</sup>, Keith Arnaud<sup>h</sup>, Makoto Asai<sup>f</sup>, Marc Audard<sup>i</sup>, Hisamitsu Awaki<sup>j</sup>, Philipp Azzarello<sup>i</sup>, Chris Baluta<sup>a</sup>, Aya Bamba<sup>k</sup>, Nobutaka Bando<sup>a</sup>, Mark Bautz<sup>l</sup>, Roger Blandford<sup>l</sup>, Kevin Boyce<sup>b</sup>, Greg Brown<sup>m</sup>, Ed Cackett<sup>n</sup>, Maria Chernyakova<sup>d</sup>, Paolo Coppi<sup>o</sup>, Elisa Costantini<sup>c</sup>, Jelle de Plaa<sup>c</sup>, Jan-Willem den Herder<sup>c</sup>, Michael DiPirro<sup>b</sup>, Chris Done<sup>p</sup>, Tadayasu Dotani<sup>a</sup>, John Doty<sup>q</sup>, Ken Ebisawa<sup>a</sup>, Megan Eckart<sup>b</sup>, Teruaki Enoto<sup>r</sup>, Yuichiro Ezoe<sup>s</sup>, Andrew Fabian<sup>n</sup>, Carlo Ferrigno<sup>i</sup>, Adam Foster<sup>t</sup>, Ryuichi Fujimoto<sup>u</sup>, Yasushi Fukazawa<sup>v</sup>, Stefan Funk<sup>f</sup>, Akihiro Furuzawa<sup>e</sup>, Massimiliano Galeazzi<sup>w</sup>, Luigi Gallo<sup>x</sup>, Poshak Gandhi<sup>a</sup>, Keith Gendreau<sup>b</sup>, Kirk Gilmore<sup>f</sup>, Daniel Haas<sup>c</sup>, Yoshito Haba<sup>e</sup>, Kenji Hamaguchi<sup>h</sup>, Isamu Hatsukade<sup>y</sup>, Takayuki Hayashi<sup>a</sup>, Kiyoshi Hayashida<sup>g</sup>, Junko Hiraga<sup>z</sup>, Kazuyuki Hirose<sup>a</sup>, Ann Hornschemeier<sup>b</sup>, Akio Hoshino<sup>u</sup>, John Hughes<sup>aa</sup>, Una Hwang<sup>ab</sup>, Ryo Iizuka<sup>ac</sup>, Yoshiyuki Inoue<sup>f</sup>, Kazunori Ishibashi<sup>e</sup>, Manabu Ishida<sup>a</sup>, Kosei Ishimura<sup>a</sup>, Yoshitaka Ishisaki<sup>s</sup>, Masayuki Ito<sup>ad</sup>, Naoko Iwata<sup>a</sup>, Naoko Iyomoto<sup>ae</sup>, Jelle Kaastra<sup>c</sup>, Timothy Kallman<sup>b</sup>, Tuneyoshi Kamae<sup>f</sup>, Jun Kataoka<sup>af</sup>, Satoru Katsuda<sup>r</sup>, Hajime Kawahara<sup>s</sup>, Madoka Kawaharada<sup>a</sup>, Nobuyuki Kawai<sup>ag</sup>, Shigeo Kawasaki<sup>a</sup>, Dmitry Khangaluyan<sup>a</sup>, Caroline Kilbourne<sup>b</sup>, Masashi Kimura<sup>g</sup>, Kenzo Kinugasa<sup>ah</sup>, Shunji Kitamoto<sup>ai</sup>, Tetsu Kitayama<sup>aj</sup>, Takayoshi Kohmura<sup>ak</sup>, Motohide Kokubun<sup>a</sup>, Tatsuro Kosaka<sup>al</sup>, Alex Koujelev<sup>am</sup>, Katsuji Koyama<sup>an</sup>, Hans Krimm<sup>b</sup>, Aya Kubota<sup>ao</sup>, Hideyo Kunieda<sup>e</sup>, Stephanie LaMassa<sup>o</sup>, Philippe Laurent<sup>ap</sup>, François Lebrun<sup>ap</sup>, Maurice Leutenegger<sup>b</sup>, Olivier Limousin<sup>ap</sup>, Michael Loewenstein<sup>b</sup>, Knox Long<sup>aq</sup>, David Lumb<sup>ar</sup>, Grzegorz Madejski<sup>f</sup>, Yoshitomo Maeda<sup>a</sup>, Kazuo Makishima<sup>z</sup>, Geneviève Marchand<sup>am</sup>, Maxim Markevitch<sup>b</sup>, Hironori Matsumoto<sup>e</sup>, Kyoko Matsushita<sup>as</sup>, Dan McCammon<sup>at</sup>, Brian McNamara<sup>au</sup>, Jon Miller<sup>av</sup>, Eric Miller<sup>l</sup>, Shin Mineshige<sup>am</sup>, Kenji Minesugi<sup>a</sup>, Ikuyuki Mitsuishi<sup>s</sup>, Takuya Miyazawa<sup>e</sup>, Tsunefumi Mizuno<sup>v</sup>, Hideyuki Mori<sup>a</sup>, Koji Mori<sup>y</sup>, Koji Mukai<sup>b</sup>, Toshio Murakami<sup>u</sup>, Hiroshi Murakami<sup>ai</sup>, Richard Mushotzky<sup>h</sup>, Housei Nagano<sup>e</sup>, Ryo Nagino<sup>g</sup>, Takao Nakagawa<sup>a</sup>, Hiroshi Nakajima<sup>g</sup>, Takeshi Nakamori<sup>af</sup>, Kazuhiro Nakazawa<sup>z</sup>, Yoshiharu Namba<sup>aw</sup>, Chikara Natsukari<sup>a</sup>, Yusuke Nishioka<sup>y</sup>, Masayoshi Nobukawa<sup>an</sup>, Masaharu Nomachi<sup>g</sup>, Steve O' Dell<sup>ax</sup>, Hirokazu Odaka<sup>a</sup>, Hiroyuki Ogawa<sup>a</sup>, Mina Ogawa<sup>a</sup>, Keiji Ogi<sup>j</sup>, Takaya Ohashi<sup>s</sup>, Masanori Ohno<sup>v</sup>, Masayuki Ohta<sup>a</sup>, Takashi Okajima<sup>b</sup>, Atsushi Okamoto<sup>ay</sup>, Tsuyoshi Okazaki<sup>a</sup>, Naomi Ota<sup>az</sup>, Masanobu Ozaki<sup>a</sup>, Frits Paerels<sup>ba</sup>, Stéphane Paltani<sup>i</sup>, Arvind Parmar<sup>bb</sup>, Robert Petre<sup>b</sup>, Martin Pohl<sup>i</sup>, F.Scott Porter<sup>b</sup>, Brian Ramsey<sup>ax</sup>, Rubens Reis<sup>av</sup>, Christopher Reynolds<sup>h</sup>, Helen Russell<sup>au</sup>, Samar Safi-Harb<sup>bc</sup>, Shin-ichiro Sakai<sup>a</sup>, Hiroaki Sameshima<sup>a</sup>, Jeremy Sanders<sup>n</sup>, Goro Sato<sup>a</sup>, Rie Sato<sup>a</sup>, Yoichi Sato<sup>ay</sup>, Kosuke Sato<sup>as</sup>, Makoto Sawada<sup>k</sup>, Peter Serlemitsos<sup>b</sup>, Hiromi Seta<sup>ai</sup>, Yasuko Shibano<sup>a</sup>, Maki Shida<sup>a</sup>, Takanobu Shimada<sup>a</sup>, Keisuke Shinozaki<sup>ay</sup>, Peter Shirron<sup>b</sup>, Aurora Simionescu<sup>f</sup>, Cynthia Simmons<sup>b</sup>, Randall Smith<sup>t</sup>, Gary Sneiderman<sup>b</sup>, Yang Soong<sup>b</sup>, Lukasz Stawarz<sup>a</sup>, Yasuharu Sugawara<sup>ac</sup>, Hiroyuki Sugita<sup>ay</sup>, Satoshi Sugita<sup>e</sup>, Andrew Szymkowiak<sup>o</sup>, Hiroyasu Tajima<sup>e</sup>, Hiromitsu Takahashi<sup>v</sup>, Shin-ichiro Takeda<sup>a</sup>, Yoh Takei<sup>a</sup>, Toru Tamagawa<sup>r</sup>, Takayuki Tamura<sup>a</sup>, Keisuke Tamura<sup>e</sup>, Takaaki Tanaka<sup>an</sup>, Yasuo Tanaka<sup>a</sup>, Makoto Tashiro<sup>bd</sup>, Yuzuru Tawara<sup>e</sup>, Yukikatsu Terada<sup>bd</sup>, Yuichi Terashima<sup>j</sup>, Francesco Tombesi<sup>b</sup>, Hiroshi Tomida<sup>a</sup>, Yoko Tsuboi<sup>ac</sup>, Masahiro Tsujimoto<sup>a</sup>, Hiroshi Tsunemi<sup>g</sup>, Takeshi Tsuru<sup>an</sup>, Hiroyuki Uchida<sup>an</sup>, Yasunobo Uchiyama<sup>f</sup>, Hideki Uchiyama<sup>z</sup>, Yoshihiro Ueda<sup>an</sup>, Shiro Ueno<sup>ay</sup>, Shinichiro Uno<sup>be</sup>, Meg Urry<sup>o</sup>, Eugenio Ursino<sup>w</sup>, Cor de Vries<sup>c</sup>, Atsushi Wada<sup>ay</sup>, Shin Watanabe<sup>a</sup>, Norbert Werner<sup>f</sup>, Nicholas White<sup>b</sup>, Takahiro Yamada<sup>a</sup>, Shinya Yamada<sup>r</sup>, Hiroya Yamaguchi<sup>t</sup>, Noriko Yamasaki<sup>a</sup>, Shigeo Yamauchi<sup>az</sup>, Makoto Yamauchi<sup>y</sup>, Yoichi Yatsu<sup>ag</sup>, Daisuke Yonetoku<sup>u</sup>, Atsumasa Yoshida<sup>k</sup>, Takayuki Yuasa<sup>a</sup>



Science Meeting @ 首都大, March 2-4 2015



# ASTRO-H の状況

- 衛星は**種子島**に到着, 発射台へ移動
- 2月12日(金) 17:45 (JST) H-IIA ロケットで打ち上げ予定

2016年1月13日 種子島 報道公開



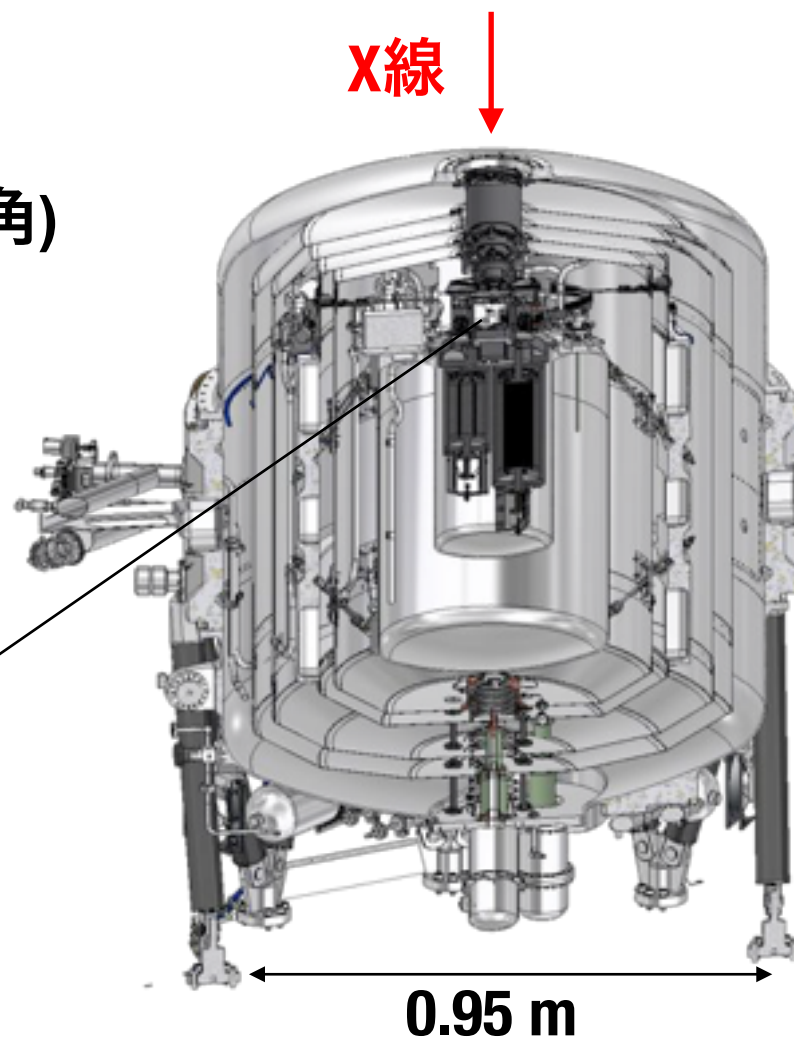
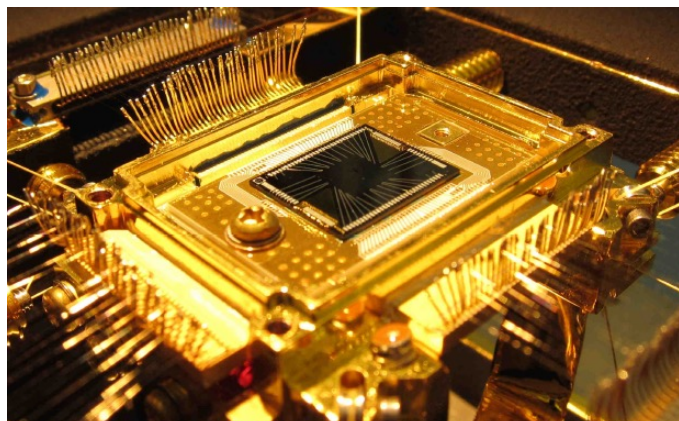
PI: JAXA 宇宙研 高橋先生

# SXS : Soft X-ray Spectrometer

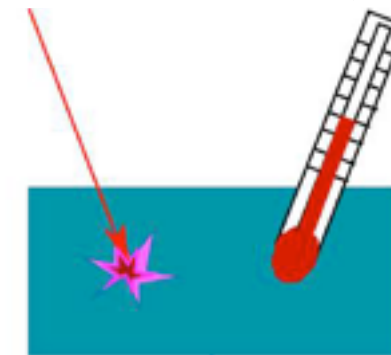
- X線熱量計 : 極低温 = 高エネルギー分解能, 非分散 = 大面積 @ 0.3-10 keV
  - $\Delta E$  (FWHM) < 7 eV @ 5.9 keV (CCD の20倍)
  - > 2 keV で世界最高の分光計
  - 広がった天体でも  $\Delta E$  劣化なし

6x6 アレイ (5 mm 角 = 3分角)

- 820  $\mu\text{m}$  角 HgTe 吸収体
- Si 半導体温度計



X線光子  $E \sim 1 \text{ fJ}$     温度変化  $\Delta T = E/C \sim 1 \text{ mK}$



熱容量  $C \sim 1 \text{ pJ/K}$

熱浴温度 50 mK

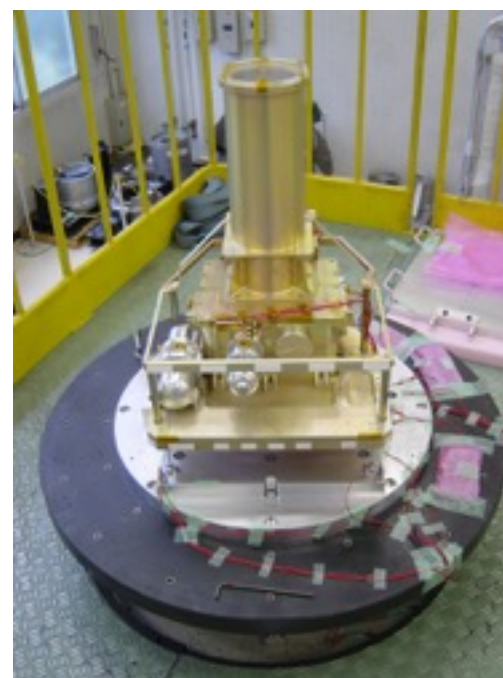
- 重量 390 kg
- 電力 570 W
- X線天文衛星で  
最重量・最大電力の検出器



# 代表的な宇宙X線分光計

## • X線CCD

- X線を electron hole pair に変換
- $\Delta E$  (FWHM)  $\sim 150$  eV @ 5.9 keV
- **Mega pixel** = imager として使用



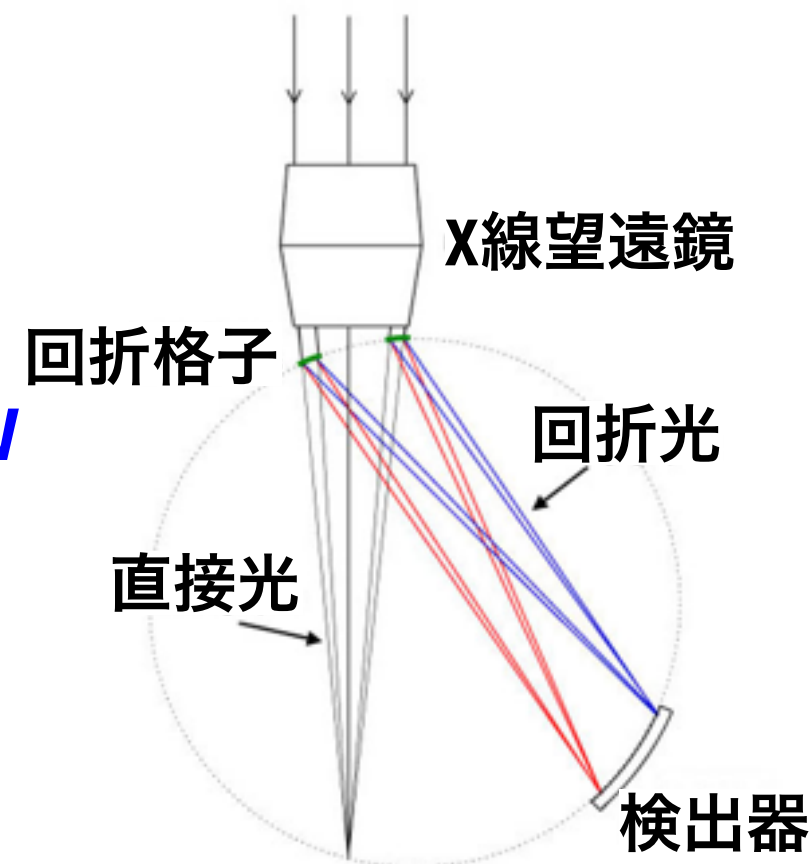
## ASTRO-H SXI

- 4 CCD chips
- 62 mm 角 = 38分角



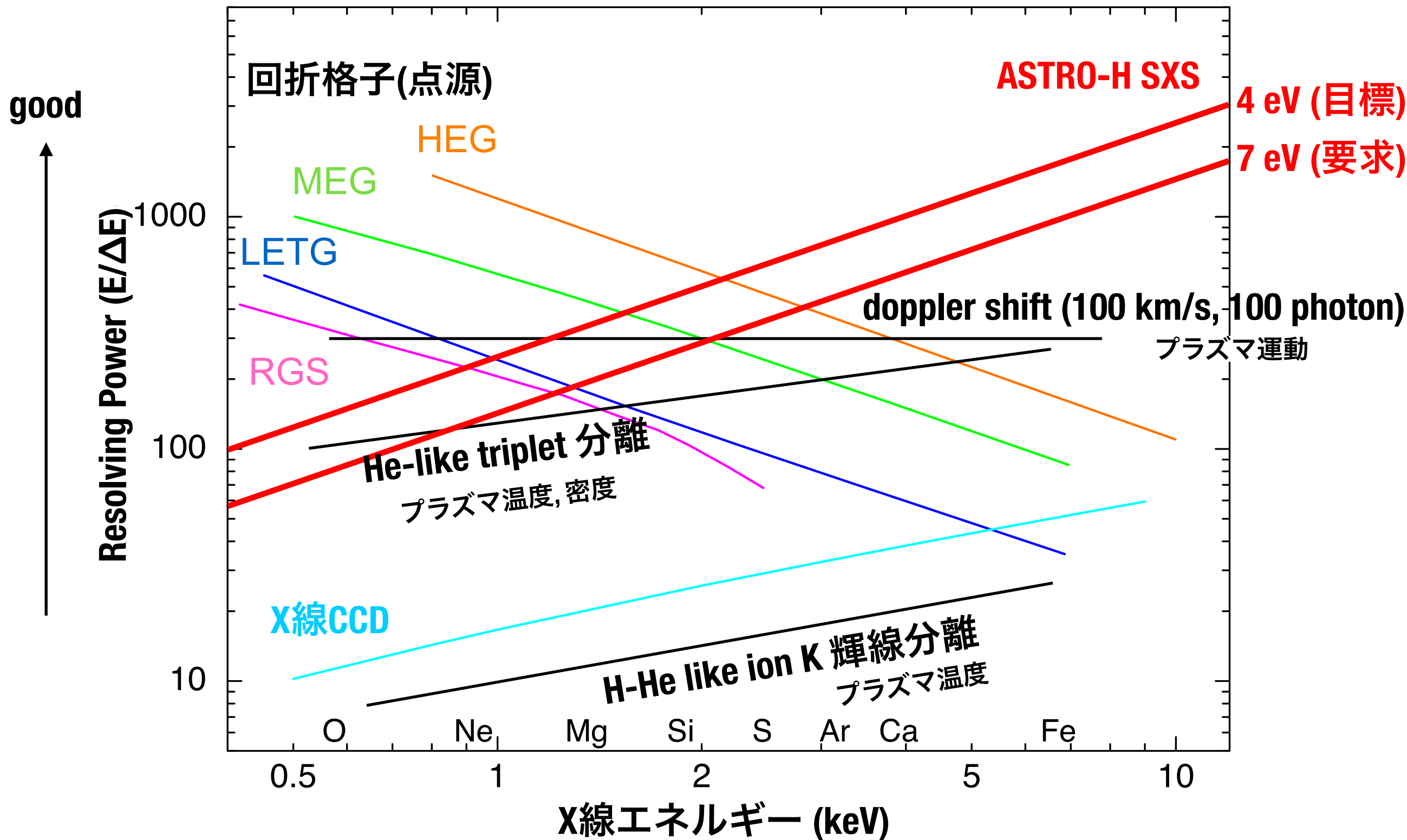
## • 回折格子

- X線の波長の違いを位置の違いに変換
- $\Delta E$  (FWHM)  $\sim 1$  eV @ 1 keV,  $\sim 30$  eV @ 5.9 keV
- 広がった天体では  $\Delta E$  が劣化

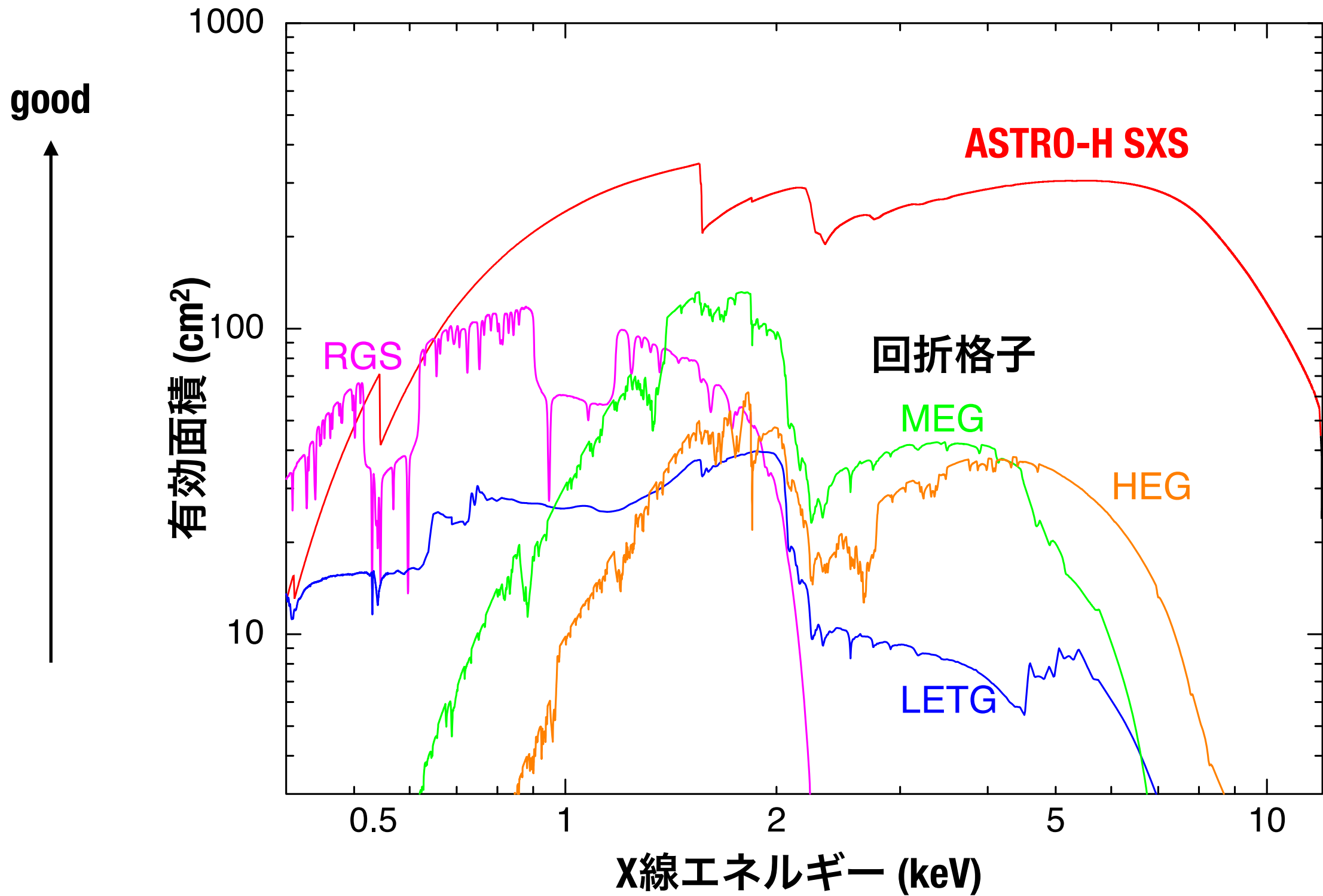




# X線エネルギー vs Resolving Power

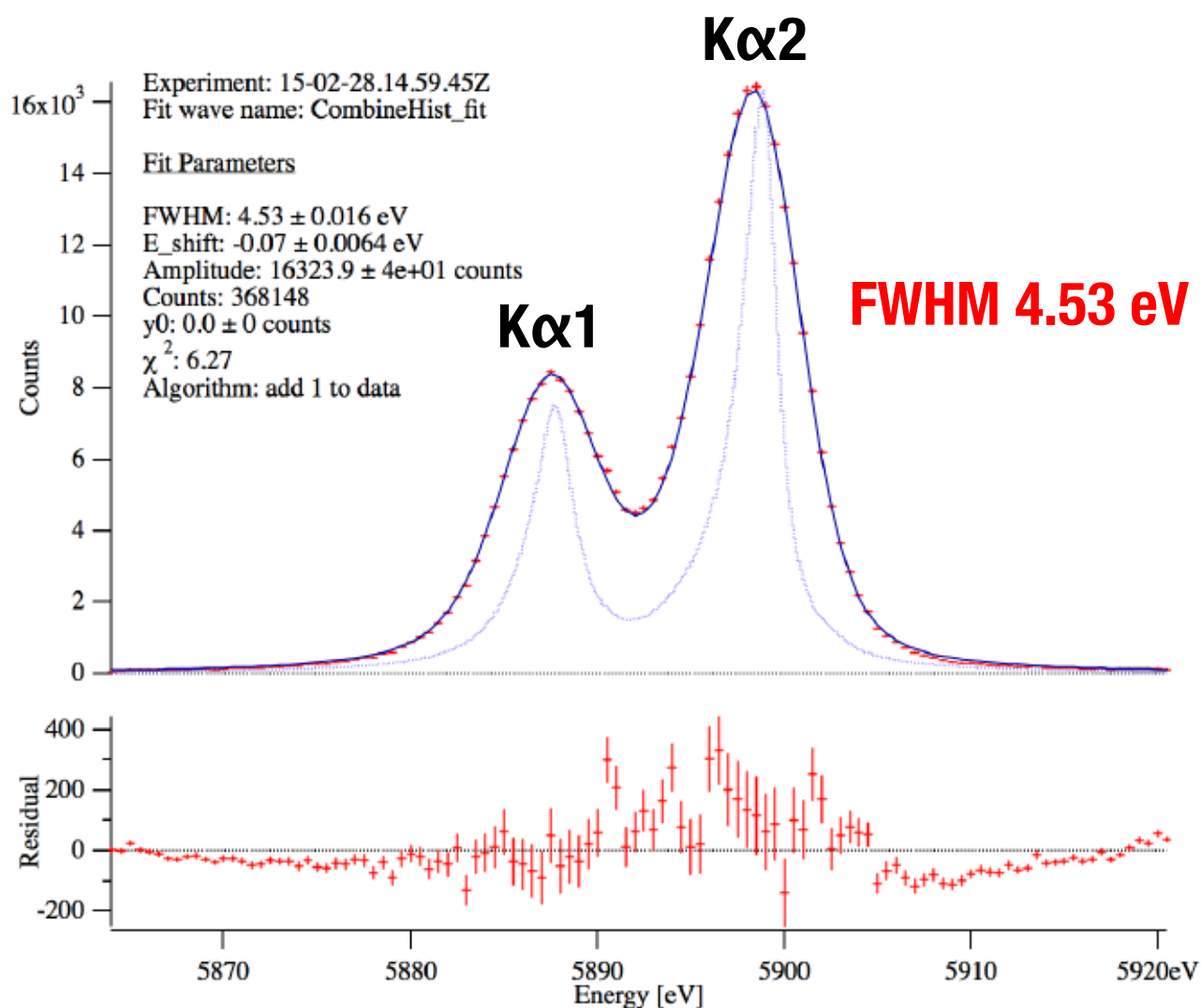


# X線エネルギー vs 有効面積



# 衛星試験で得られたエネルギー分解能

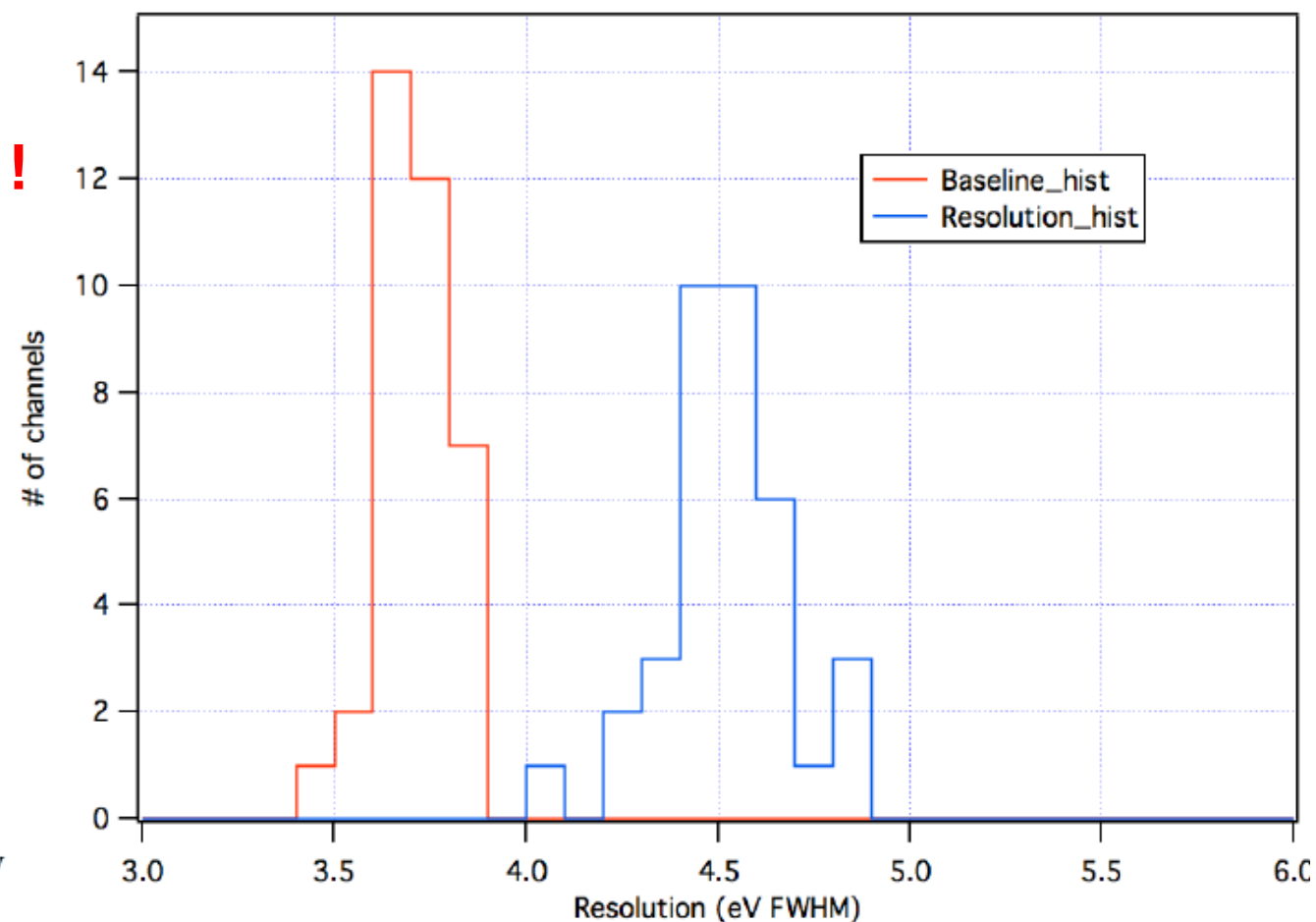
## 55Fe 線源スペクトル (Mn K $\alpha$ )



- \* 機械式冷凍機ノミナル運転時  
全ピクセル積算

## 55Fe 線源スペクトル (Mn K $\alpha$ )

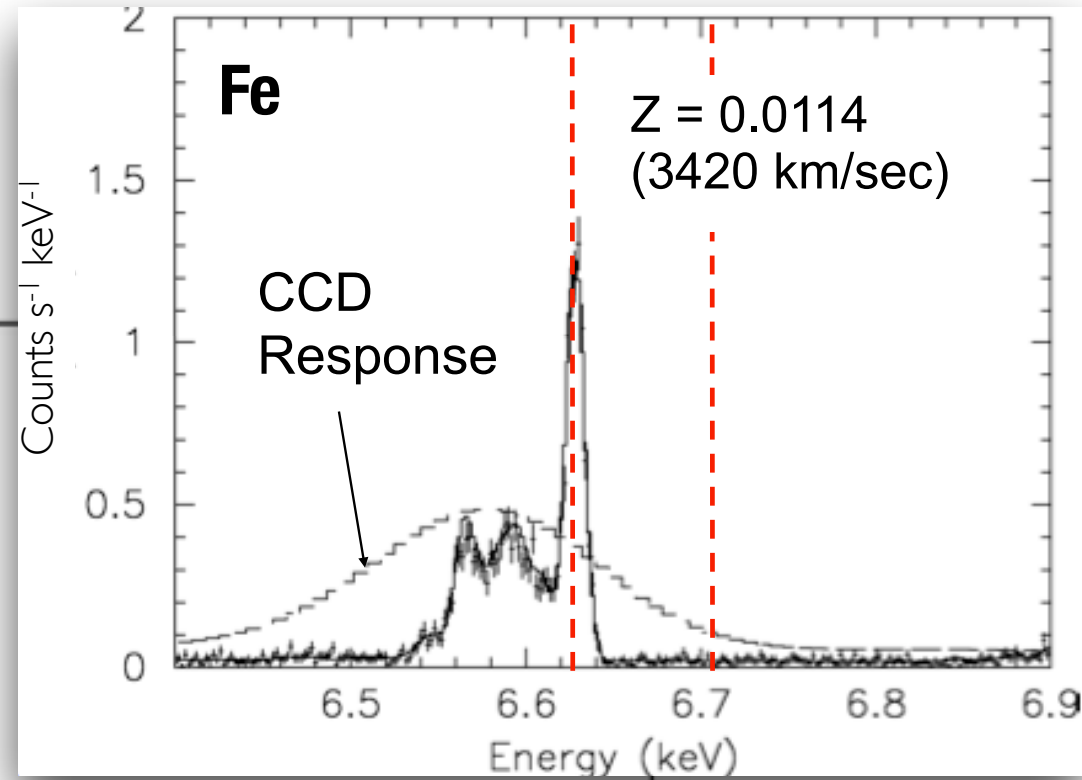
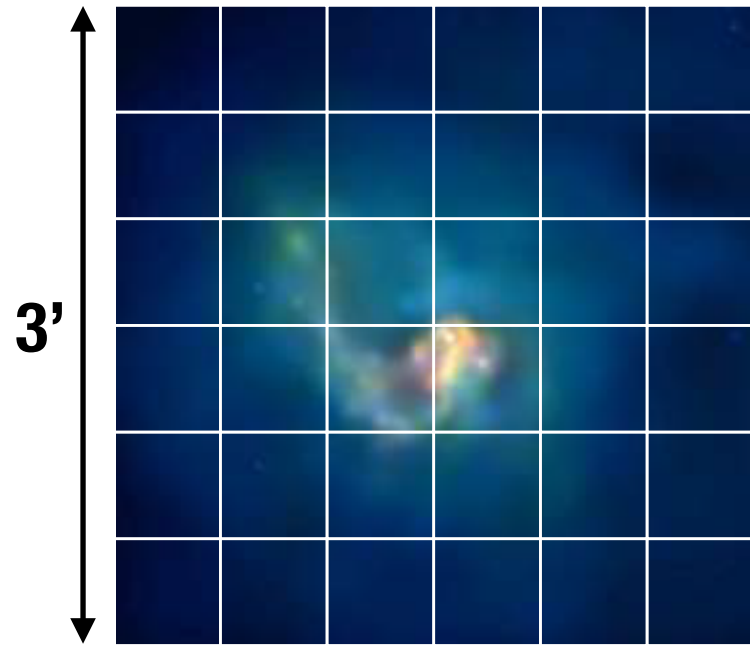
### pixel 別 エネルギー分解能



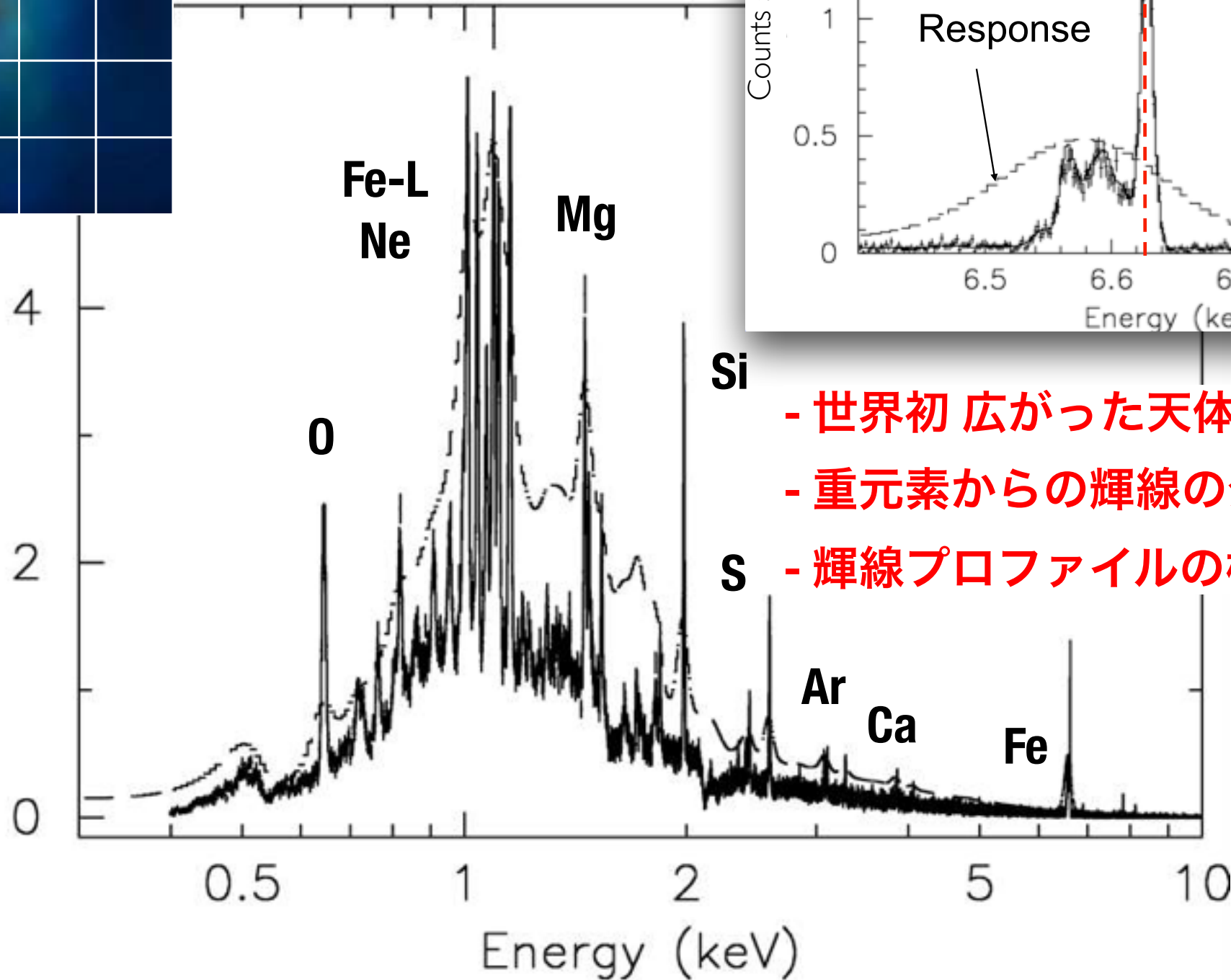
- \* Baseline = 電気・熱雑音で決まる分解能  
signal が来ていない baseline から計算

# X線カロリメータによる超精密分光

ケンタウルス座銀河団  
(X線画像, Chandra)



Counts/sec/keV



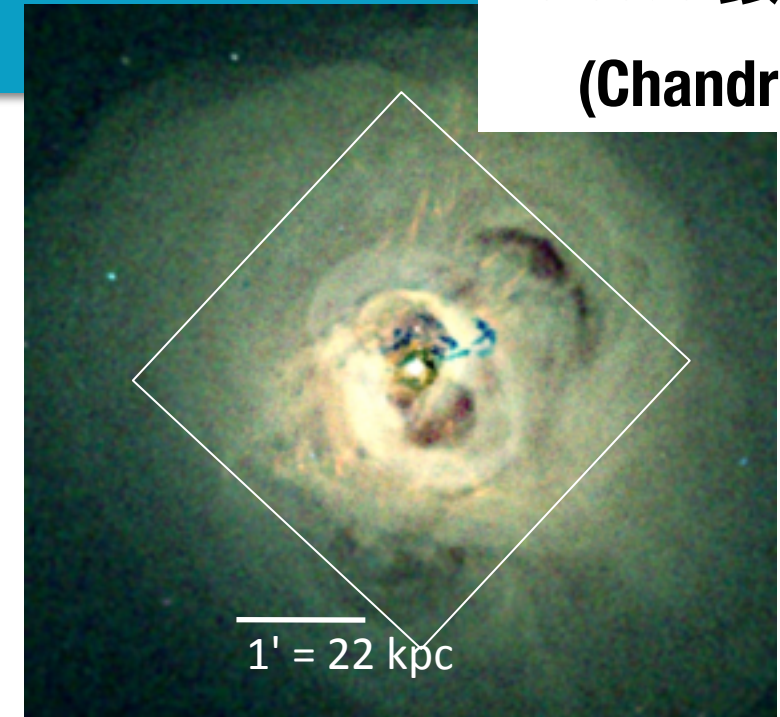
- 世界初 広がった天体の超精密分光
- 重元素からの輝線分離
- S - 輝線プロファイルの検証 (Fe K ...)

ASTRO-H SXS  
simulation

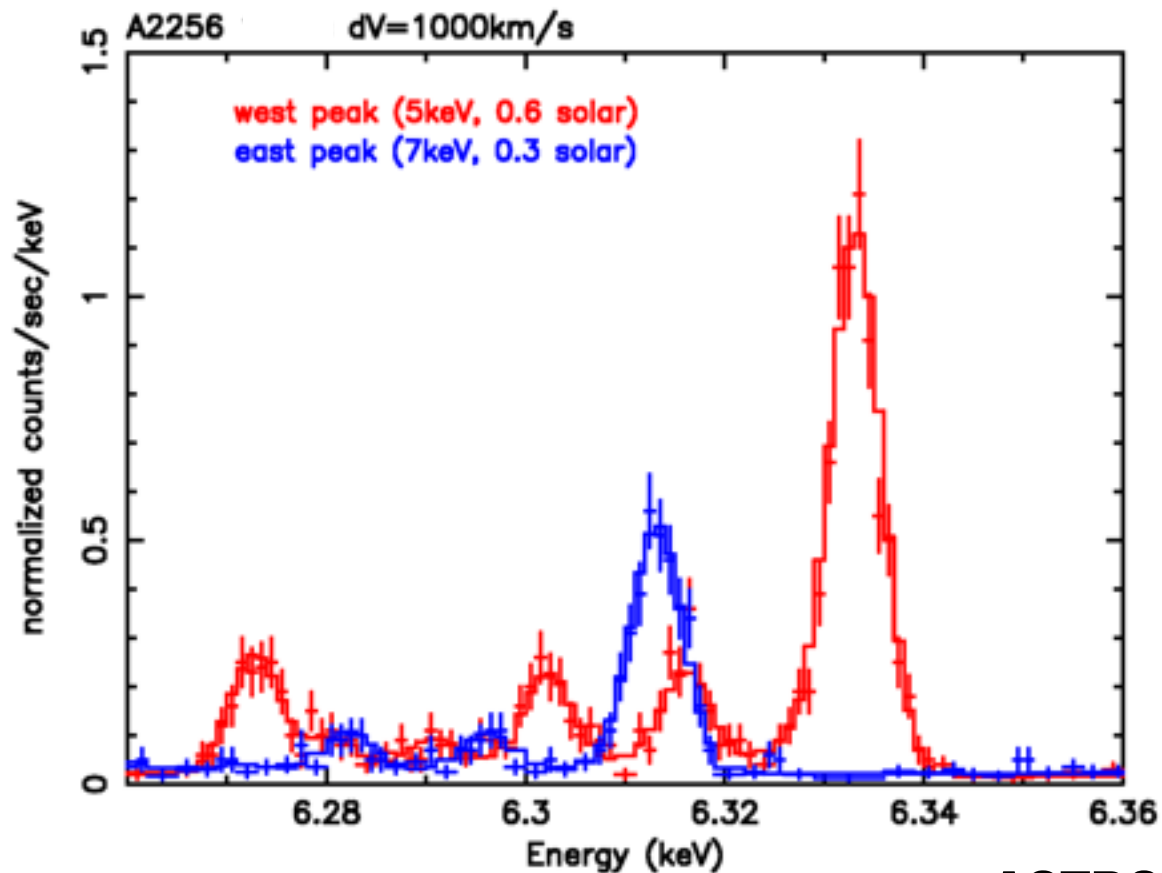
# 銀河団のガスダイナミクス

Perseus 銀河団  
(Chandra)

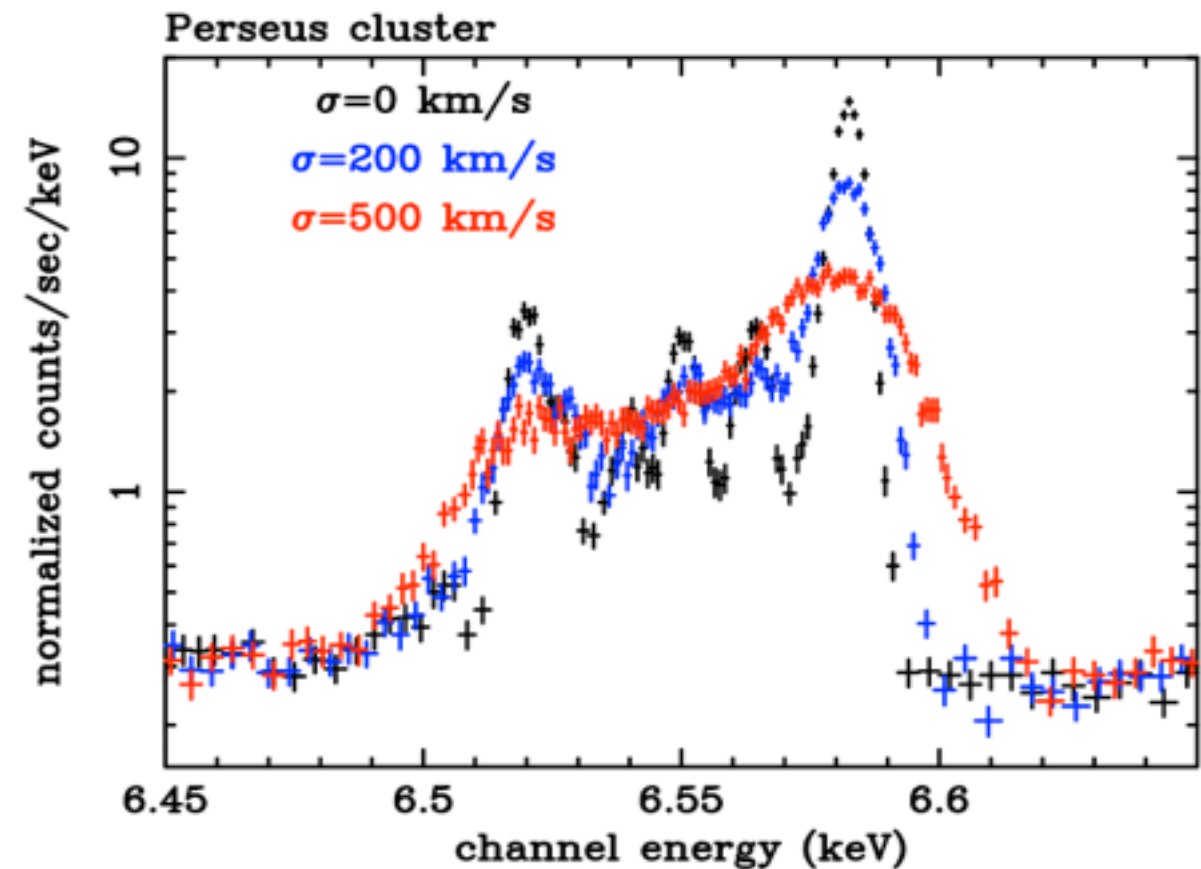
- 銀河団 :  $10^7\text{-}8$  K 高温ガス, 宇宙のバリオンの~20%
- ガスの total energy = 非熱的運動:  
銀河団の質量推定に影響 → 宇宙論パラメータ (ダークマター, ダークエネルギー等) 推定



bulk motion (line shift) ?



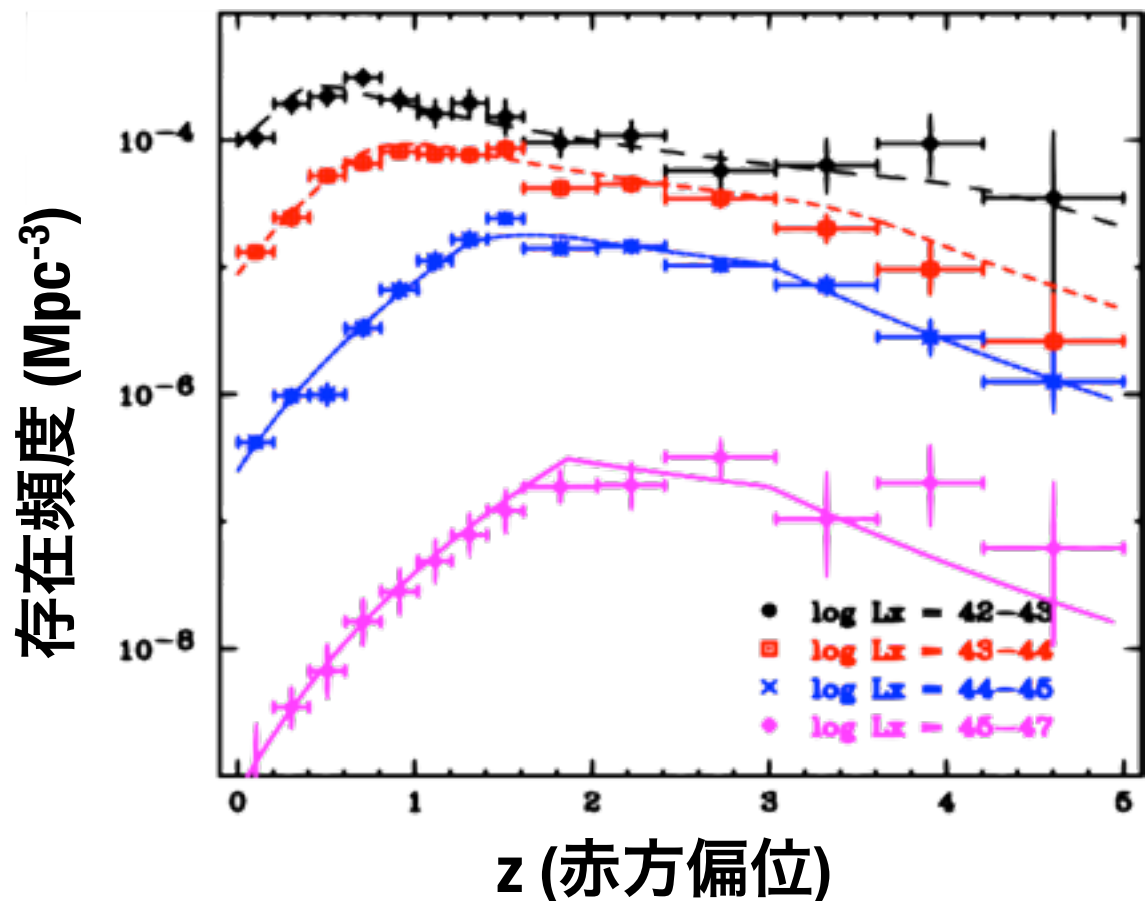
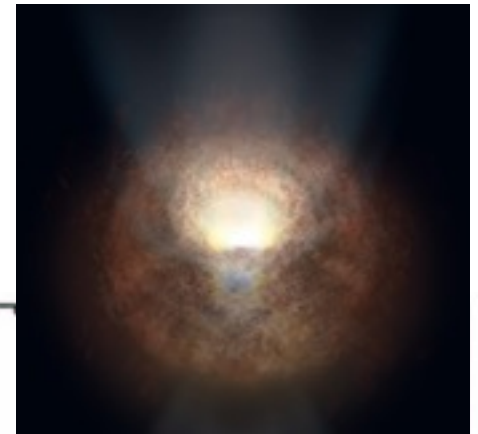
乱流運動 (line broadening) ?



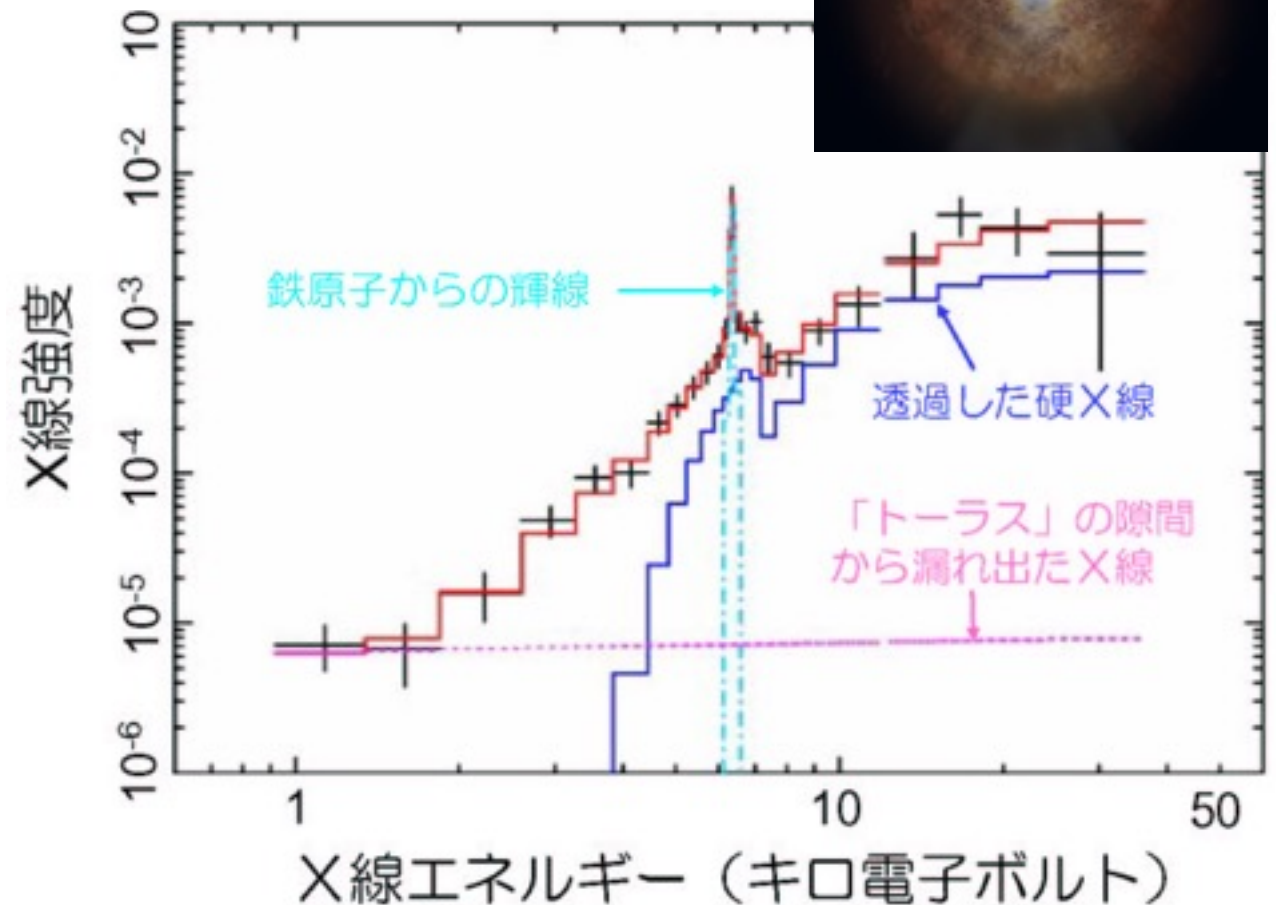


# ガスに埋もれたブラックホールの探査

- 巨大ブラックホール： $10^5-10^6 M_{\text{sun}}$ , 銀河中心, 降着物質からX線
  - 存在頻度は低光度のものほど近傍
    - 「ダウンサイジング」, 理論的に未解明
  - ガスに埋もれたブラックホール? : Fe K 輝線で探査



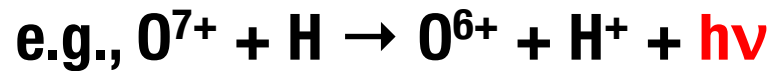
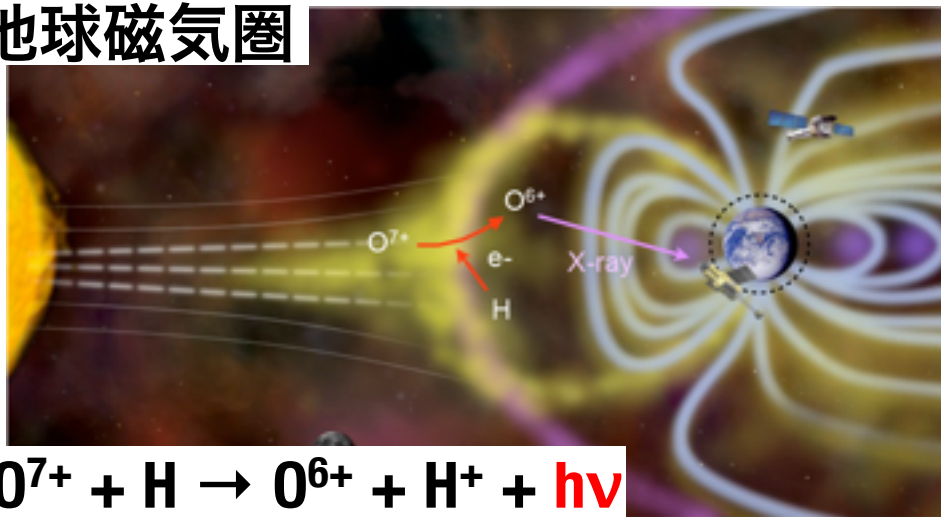
遠方



# 太陽系天体からの電荷交換X線 (CX)

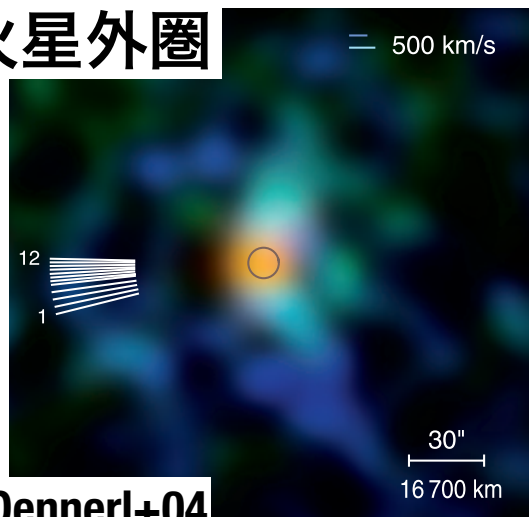
- 太陽風・磁気圏イオンと惑星・彗星の希薄で広がった大気
  - 輝線分布で区別：禁制線が強い, large n からの輝線が強い, n の target 依存性
  - 粒子加速 (輝線幅, シフト), 大気組成 (輝線比) の新たな探査手段

地球磁気圏

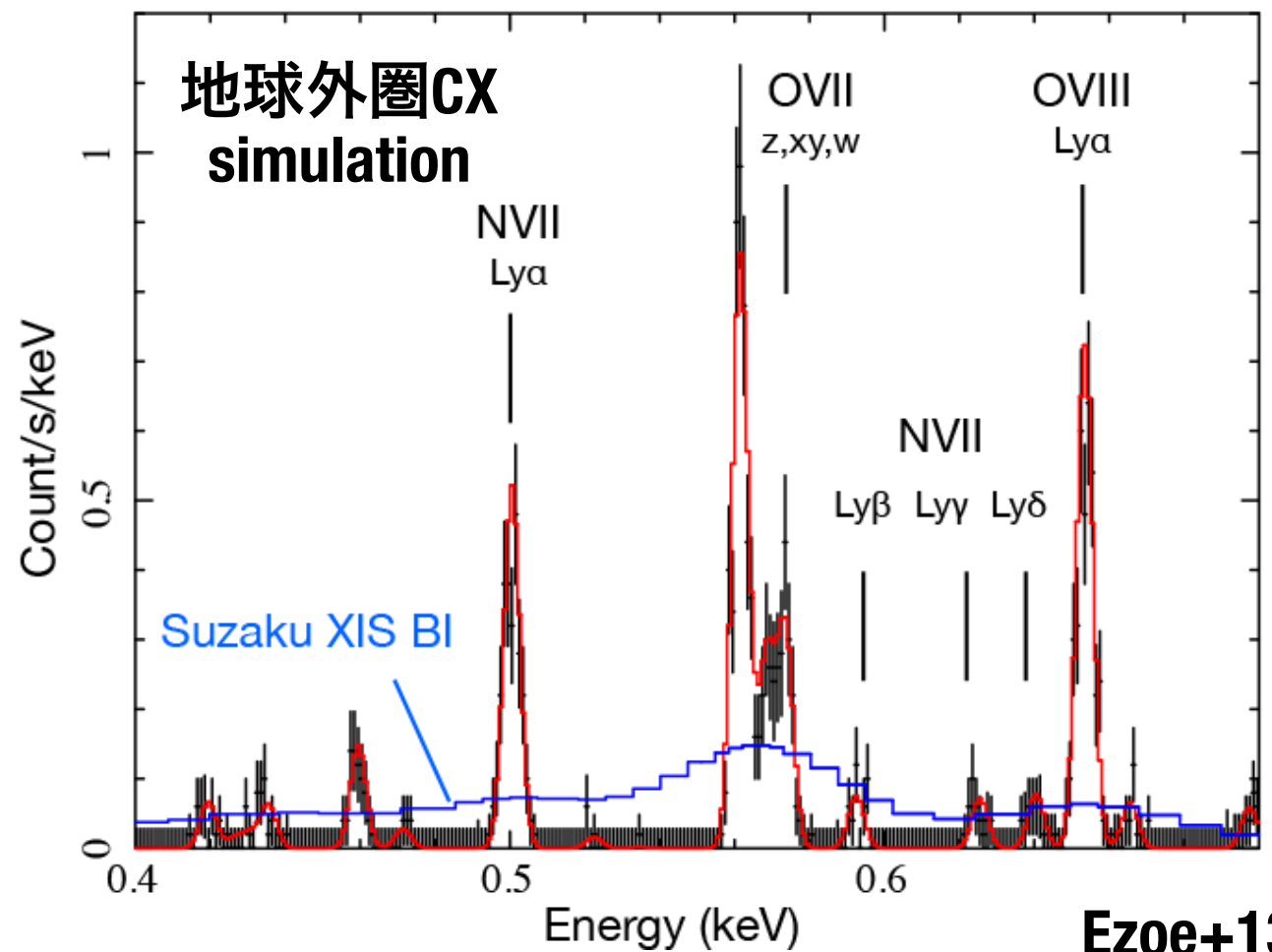
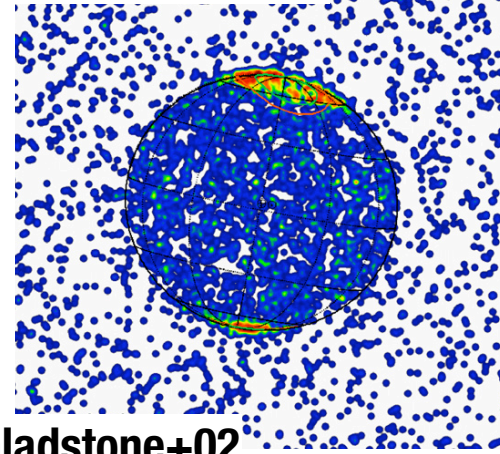


→ 地上実験との比較, 太陽系外天体へ

火星外圏

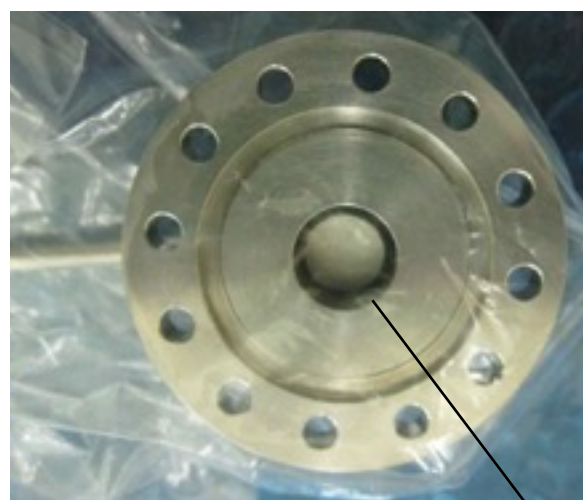


木星オーロラ



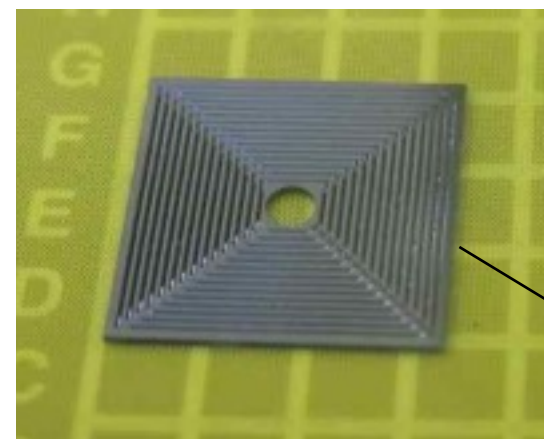
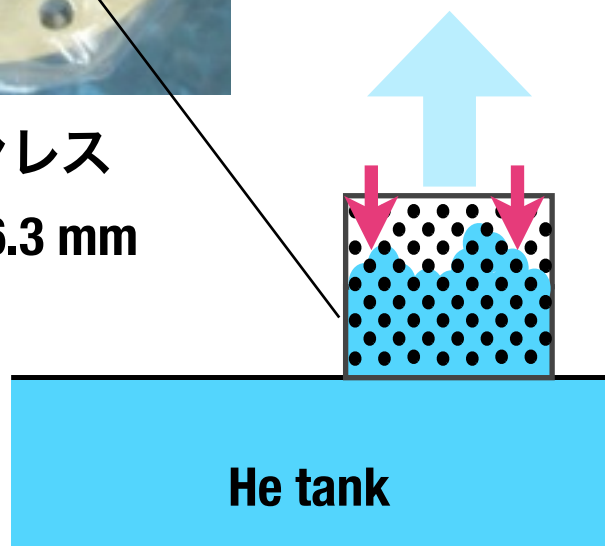
# 超流動 He 排気系

- 超流動 He (1.2 K) 30 L : 設計要求 寿命 5 yr => 平均排気量 28  $\mu\text{g/s}$   
液体 He を用いた宇宙ミッションで世界最小
- 1. 気体・液体 He の相分離 = Porous Plug (PP)
- 2. 壁面を伝わる film flow の抑制 <2  $\mu\text{g/s}$  = knife edge device 等



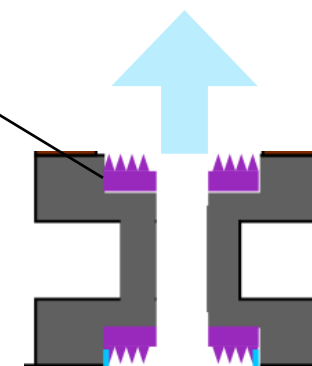
焼結ステンレス  
 $\Phi 8.9$  mm, t6.3 mm

侵入熱, He が PP 下流で蒸発  
→ PP 下流が低温  
→ 液体 He は PP 上流へ



Si chip, 10 mm 角  
(大学院生とインハウス製作)

原子レベルに鋭い edge  
→ 表面張力で stop



Si (110) plane





# DIOS : beyond ASTRO-H

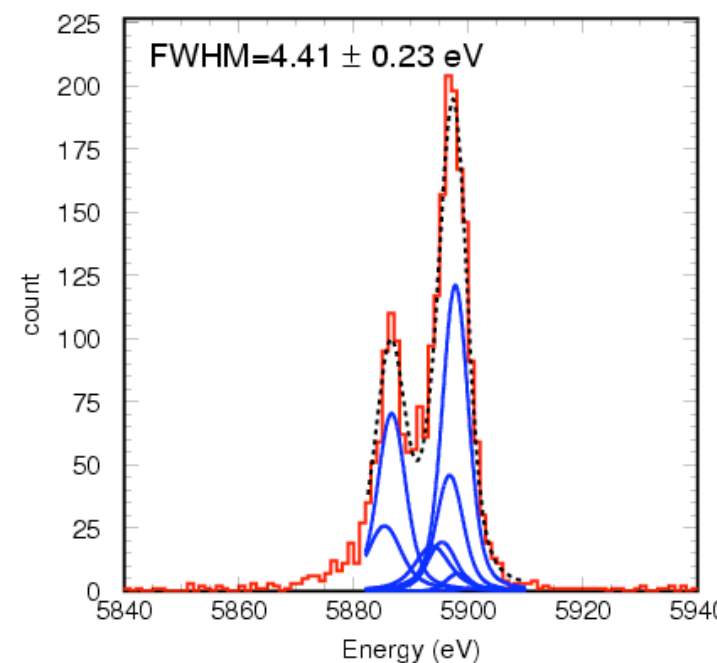
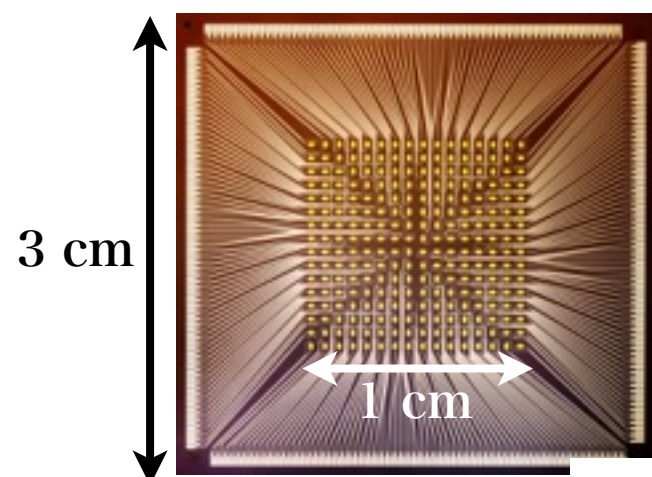
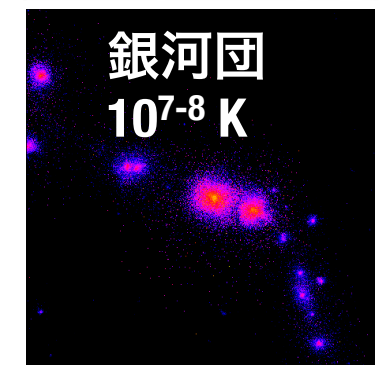
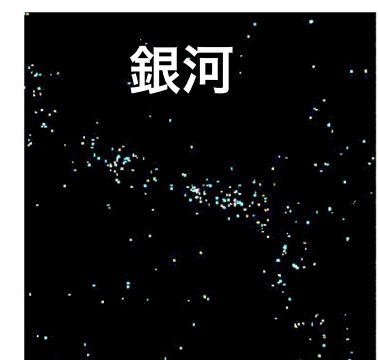
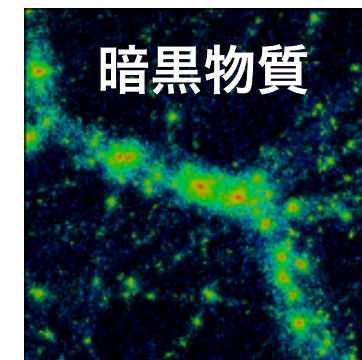
- PI 大橋 : ASTRO-H の次を狙う, **広視野**X線カロリメータミッション

- 16x16 pixel,  $<5$  eV (FWHM) @ 0.6 keV, 50分角

- $S\Omega=100$  cm<sup>2</sup> deg<sup>2</sup>, ASTRO-H の~100倍

- missing baryon** の探査 (全バリオンの ~20-30 %)

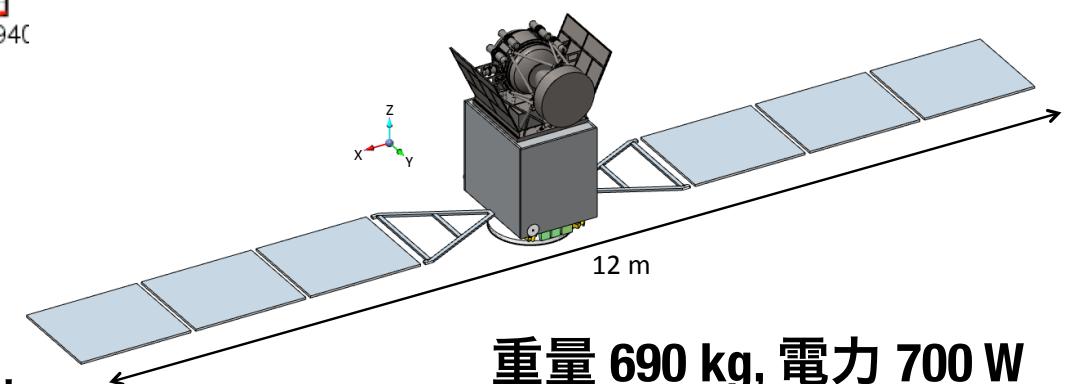
Yoshikawa+01



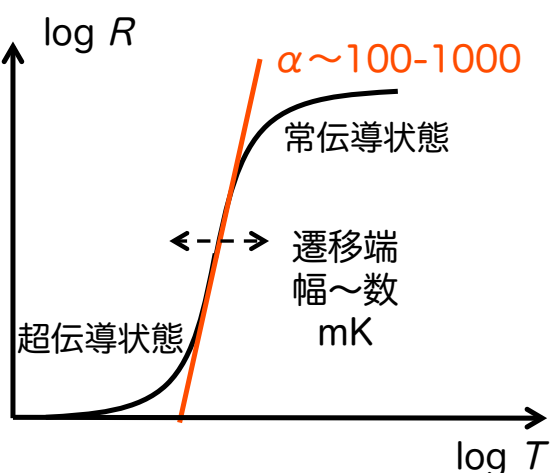
超伝導薄膜温度計

X線カロリアレイ

2022年頃を目指し提案予定



Ezoe+09, 15

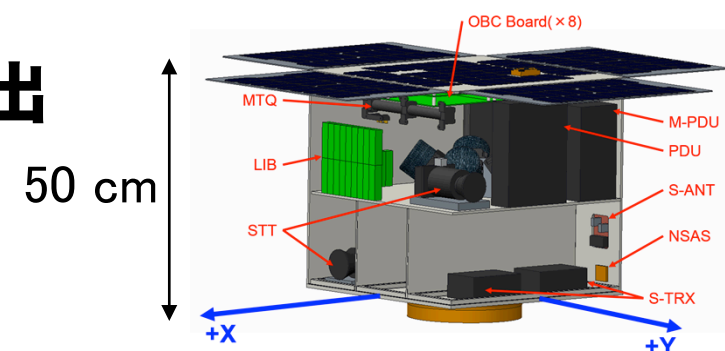


重量 690 kg, 電力 700 W

# 超小型衛星 (50-100 kg)

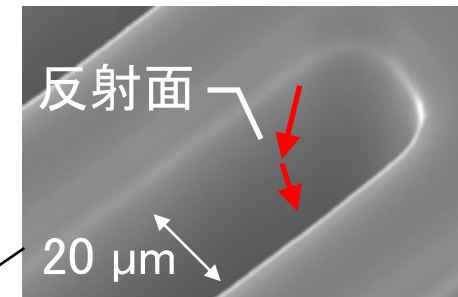
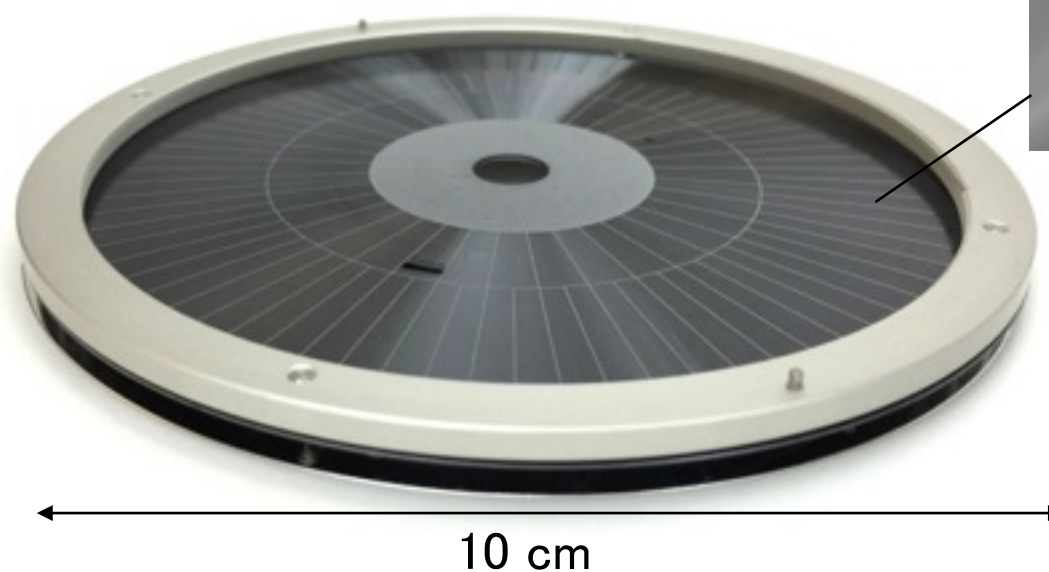
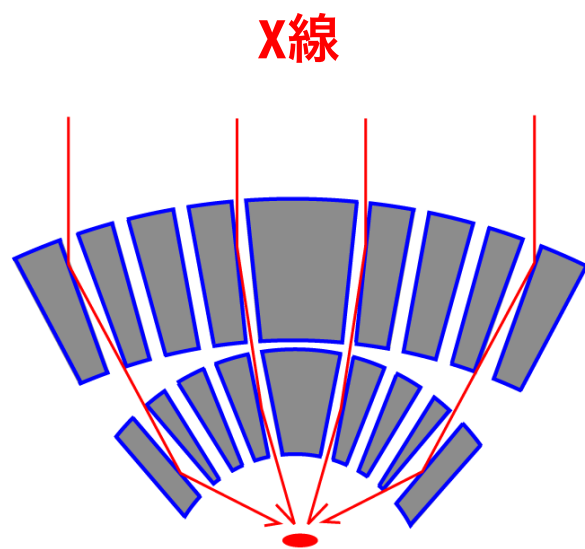
- **ORBIS 衛星 (PI 佐原) : 巨大ブラックホール連星の検出**

- 超軽量X線望遠鏡 & SDD で同一天体を**年観測**



- **GEO-X pathfinder 衛星 (PI 江副) : 地球磁気圏のX線撮像**

- 超軽量X線望遠鏡 & DepFET で**月付近の軌道**から観測



微細穴側壁での全反射を利用  
重量~10 g, 従来より1-3桁軽量

Ezoe+10

超小型で大型に比する**ユニークサイエンス**を実施

将来の精密分光にも使える**超軽量X線望遠鏡**



# まとめ

- **X線天文衛星 ASTRO-H, 2月に打ち上げ予定**
- **X線カロリメータによる超精密分光の時代が来る**
  - 広がった天体, 点源からの Fe K, ...  
遠くから近くまで: 銀河団, ブラックホール, 太陽系天体 ...
- **ASTRO-H の次も見据え, 開発を進めている**
  - DIOS, 広視野X線カロリメータ
  - ORBIS, GEO-X pathfinder, 超軽量望遠鏡
- **輝線に関連する物理プロセスの理解とモデル化が必要, 原子分子の方々との協力が, ますます重要に => よろしくお願いします。**

# 謝辞

- **ASTRO-H team members**
  - **SXS team**
  - **Science Working Group ほか**
- **DIOS team members**
  - **TES calorimeter team ほか**
- **ORBIS, GEO-X team members**
  - **MEMS X-ray optics team ほか**
- **本研究会**