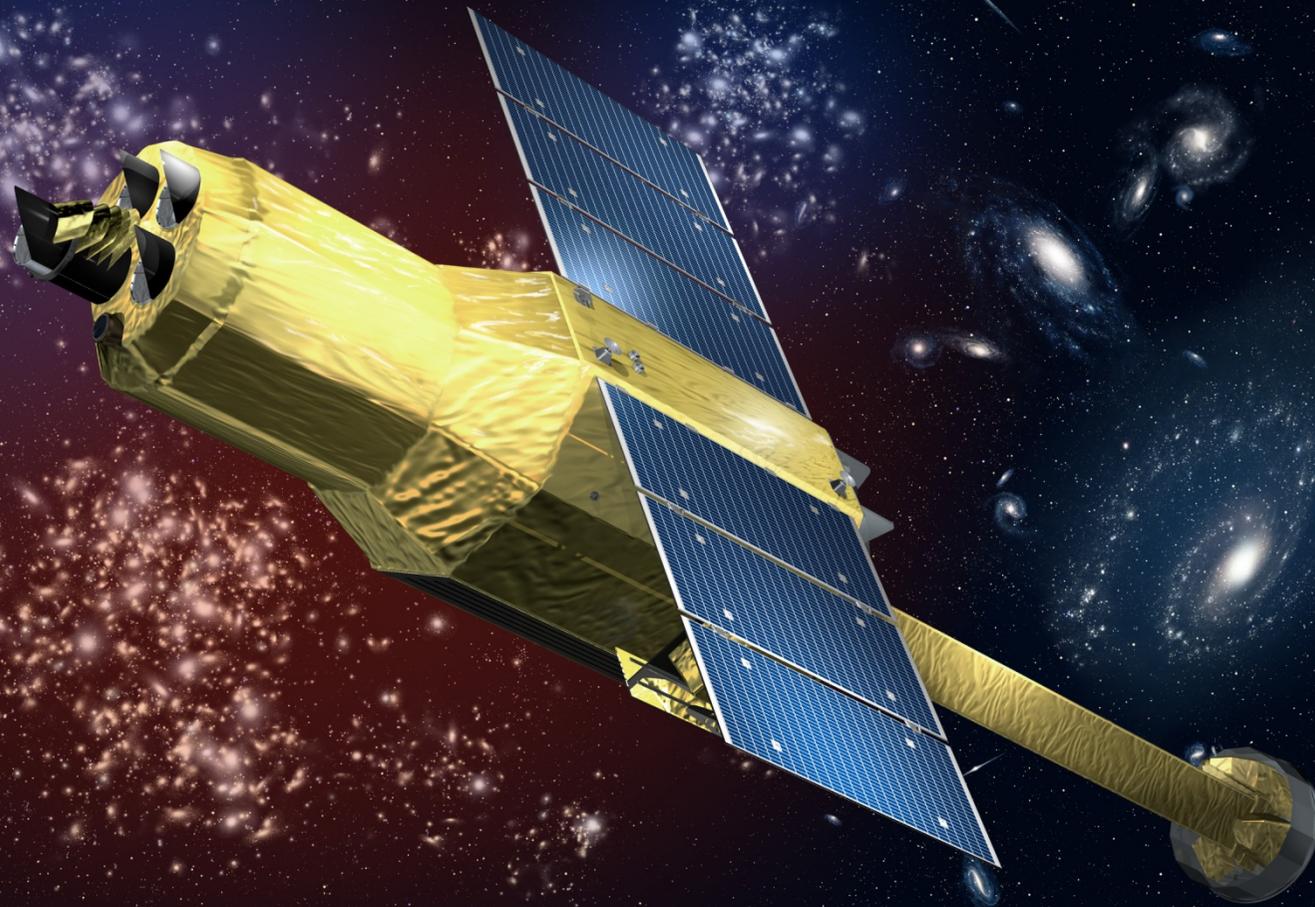


ASTRO-Hと銀河団物理



北山哲 (東邦大学理学部物理学科)
& ASTRO-H Science Working Group

Shigeo Kitayama

Reference & Collaborators



arXiv:1412.1176
(one of 17 white papers)

ASTRO-H Space X-ray Observatory White Paper

Clusters of Galaxies and Related Science

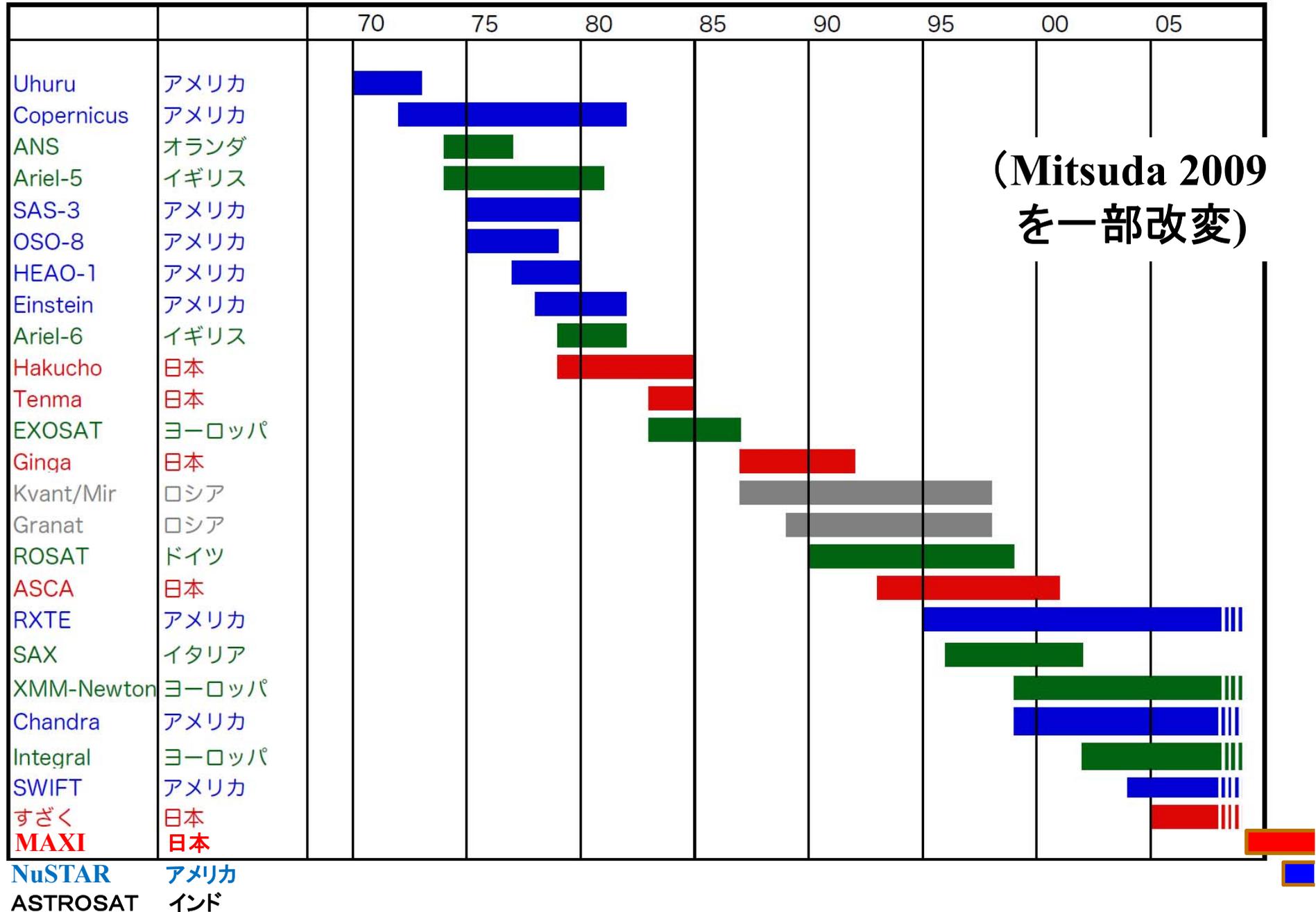
T. Kitayama (Toho University), M. Bautz (MIT), M. Markevitch (NASA/GSFC),
K. Matsushita (Tokyo University of Science), S. Allen (Stanford University), M. Kawaharada (JAXA),
B. McNamara (University of Waterloo), N. Ota (Nara Women's University), H. Akamatsu (SRON),
J. de Plaa (SRON), M. Galeazzi (University of Miami), G. Madejski (Stanford University),
R. Main (University of Waterloo), E. Miller (MIT), K. Nakazawa (University of Tokyo), H. Russel (University
of Waterloo¹), K. Sato (Tokyo University of Science), N. Sekiya (JAXA/University of Tokyo),
A. Simionescu (JAXA), T. Tamura (JAXA), Y. Uchida (JAXA/University of Tokyo), E. Ursino (University
of Miami), N. Werner (Stanford University), I. Zhuravleva (Stanford University), and J. ZuHone
(NASA/GSFC)

on behalf of the ASTRO-H Science Working Group

内容

- X線将来計画の概要
& ASTRO-H への動機
- 高分解能X線分光でわかること
- 広帯域X線分光でわかること
- Extra success

これまでのX線天文衛星



主なX線将来計画と方向性

赤: approved

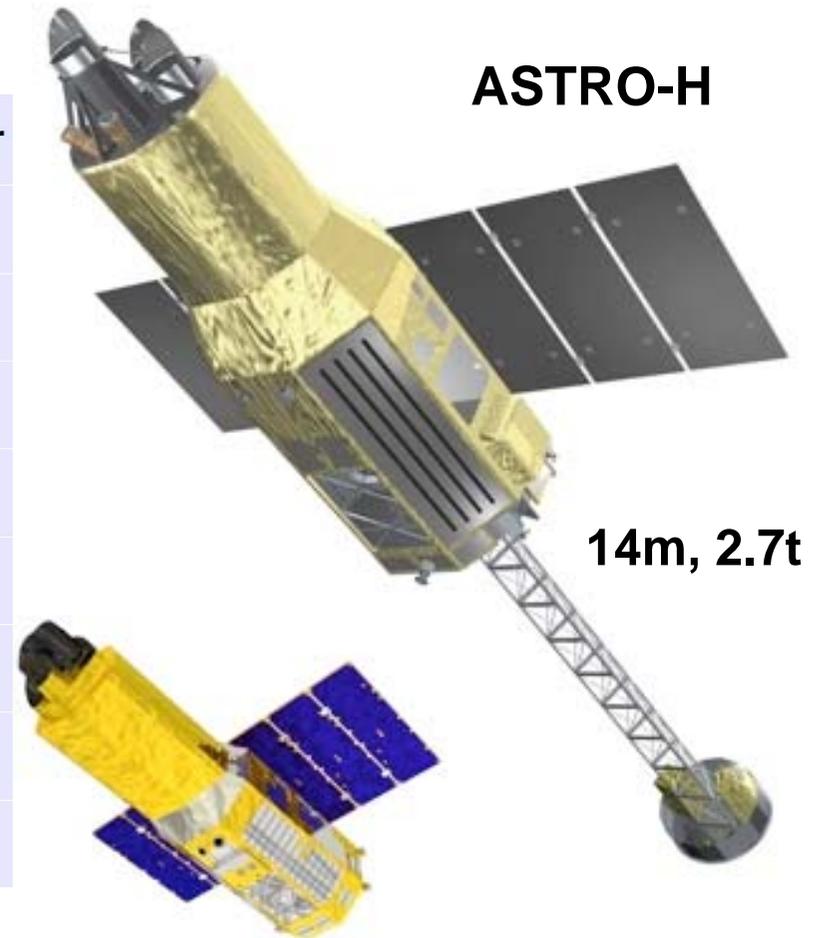
- ・高分散分光 ($E/\Delta E \sim 1000$): **ASTRO-H(2016-), Athena(2028-), DIOS**
- ・硬X線 ($E > 10 \text{ keV}$) & 広帯域: **ASTROSAT(2015-), ASTRO-H(2016-), NGHXT**
- ・広視野サーベイ: **eROSITA(2017-), DIOS, WF-MAXI**
- ・時間分解能: **NICER (2016-)**
- ・偏光: **XIPE, PRAXyS, IXPE**

※ 日米欧に加え、インド(ASTROSAT)、中国(?)が参入

What is ASTRO-H?

The 6th X-ray satellite to be launched from Japan in fiscal year 2015

Launch site	Tanegashima Space Center
Launch vehicle	JAXA HII-A rocket
Orbit Altitude	550 km
Orbit Type	Approximate circular orbit
Orbit Inclination	< 31 degrees
Orbit Period	96 minutes
Total Length	14 m
Mass	~2.7 metric ton
Mission life	> 3 years



ASTRO-H

14m, 2.7t

Suzaku (6m, 1.7t)

2005-2015

ASTRO-H Team Members



The ASTRO-H X-ray Astronomy Satellite (DRAFT)

Tadayuki Takahashi^a, Kazuhisa Mitsuda^a, Richard Kelley^b, Felix Aharonian^c, Hiroki Akamatsu^d, Fumie Akimoto^e, Steve Allen^f, Naohisa Anabuki^g, Lorella Angelini^b, Keith Arnaud^h, Makoto Asaiⁱ, Marc Audardⁱ, Hisamitsu Awaki^j, Philipp Azzarelloⁱ, Chris Baluta^a, Aya Bamba^k, Nobutaka Bando^a, Mark Bautz^l, Thomas Bialas^b, Roger Blandford^l, Kevin Boyce^b, Laura Brenneman^b, Greg Brown^m, Edward Cackettⁿ, Edgar Canavan^b, Maria Chernyakova^c, Meng Chiao^b, Paolo Coppi^o, Elisa Costantini^d, Jelle de Plaa^d, Jan-Willem den Herder^d, Michael DiPirro^b, Chris Done^p, Tadayasu Dotani^a, John Doty^q, Ken Ebisawa^a, Megan Eckart^b, Teruaki Enoto^r, Yuichiro Ezoe^a, Andrew Fabianⁿ, Carlo Ferrignoⁱ, Adam Foster^t, Ryuichi Fujimoto^u, Yasushi Fukazawa^w, Stefan Funk^l, Akihiro Furuzawa^c, Massimiliano Galeazzi^w, Luigi Gallo^x, Poshak Gandhi^p, Kirk Gilmore^f, Matteo Guainazzi^v, Daniel Haas^d, Yoshito Haba^z, Kenji Hamaguchi^h, Atsushi Harayama^a, Isamu Hatsukade^{aa}, Katsuhiko Hayashi^a, Takayuki Hayashi^a, Kiyoshi Hayashida^z, Junko Hiraga^{ab}, Kazuyuki Hirose^a, Ann Hornschemeier^b, Akio Hoshino^{ac}, John Hughes^{ad}, Una Hwang^{ae}, Ryo Iizuka^a, Yoshiyuki Inoue^a, Kazunori Ishibashi^e, Manabu Ishida^a, Kumi Ishikawa^f, Kosei Ishimura^a, Yoshitaka Ishisaki^a, Masayuki Ito^{af}, Naoko Iwata^a, Naoko Iyomoto^{ag}, Chris Jewell^v, Jelle Kaastra^d, Timothy Kallman^b, Tuneyoshi Kamae^f, Jun Kataoka^{ah}, Satoru Katsuda^a, Junichiro Katsuta^v, Madoka Kawaharada^a, Nobuyuki Kawai^{ai}, Taro Kawano^a, Shigeo Kawasaki^a, Dmitry Khangaluyan^a, Caroline Kilbourne^b, Mark Kimball^b, Masashi Kimura^{aj}, Shunji Kitamoto^{ac}, Tetsu Kitayama^{ak}, Takayoshi Kohmura^{al}, Motohide Kokubun^a, Saori Konami^a, Tatsuhiro Kosaka^{am}, Alexander Koujelev^{an}, Katsuji Koyama^{ao}, Hans Krimm^b, Aya Kubota^{ap}, Hideyo Kunieda^e, Stephanie LaMassa^o, Casey Lambert^x, Philippe Laurent^{aq}, François Lebrun^{aq}, Maurice Leutenegger^b, Olivier Limousin^{aq}, Michael Loewenstein^b, Knox Long^{ar}, David Lumb^v, Grzegorz Madejski^l, Yoshitomo Maeda^a, Kazuo Makishima^{ab}, Maxim Markevitch^b, Candace Masters^b, Hironori Matsumoto^c, Kyoko Matsushita^{al}, Dan McCammon^{as}, Daniel McGuinness^b, Brian McNamara^{at}, Joseph Miko^b, Jon Miller^{au}, Eric Miller^{av}, Shin Mineshige^{aw}, Kenji Minesugi^a, Ikuyuki Mitsuishi^e, Takuya Miyazawa^e, Tsunefumi Mizuno^v, Koji Mori^{aa}, Hideyuki Mori^e, Franco Moroso^{an}, Theodore Muench^b, Koji Mukai^b, Hiroshi Murakami^{ax}, Toshio Murakami^u, Richard Mushotzky^{ay}, Houssei Nagano^a, Ryo Nagino^a, Takao Nakagawa^a, Hiroshi Nakajima^g, Takeshi Nakamori^{az}, Shinya Nakashima^a, Kazuhiro Nakazawa^{ba}, Yoshiharu Namba^{bb}, Chikara Natsukari^a, Yusuke Nishioka^{aa}, Masayoshi Nobukawa^{ao}, Hirofumi Noda^a, Masaharu Nomachi^{bc}, Steve O' Dell^{bd}, Hirokazu Odaka^a, Hiroyuki Ogawa^a, Mina Ogawa^a, Keiji Ogi^j, Takaya Ohashi^a, Masanori Ohno^v, Masayuki Ohta^a, Takashi Okajima^b, Atsushi Okamoto^{aj}, Tsuyoshi Okazaki^a, Naomi Ota^{bc}, Masanobu Ozaki^a, Frits Paerels^{bf}, Stéphane Paltaniⁱ, Arvind Parmar^{bg}, Robert Petre^b, Ciro Pintoⁿ, Martin Pohlⁱ, James Pontius^b, F. Scott Porter^b, Katja Pottschmidt^b, Brian Ramsey^{bd}, Rubens Reis^{au}, Christopher Reynolds^{av}, Claudio Ricci^{aw}, Helen Russellⁿ, Samar Safi-Harb^{bb}, Shinya Saito^a, Shin-ichiro Sakai^a, Hiroaki Sameshima^a, Kosuke Sato^{al}, Rie Sato^a, Goro Sato^{ah}, Yoichi Sato^{aj}, Makoto Sawada^k, Peter Serlemitsos^b, Hiromi Seta^{bi}, Yasuko Shibano^a, Maki Shida^a, Takanobu Shimada^a, Keisuke Shinozaki^{aj}, Peter Shirron^b, Aurora Simionescu^a, Cynthia Simmons^b, Randall Smithⁱ, Gary Sneiderman^b, Yang Soong^b,

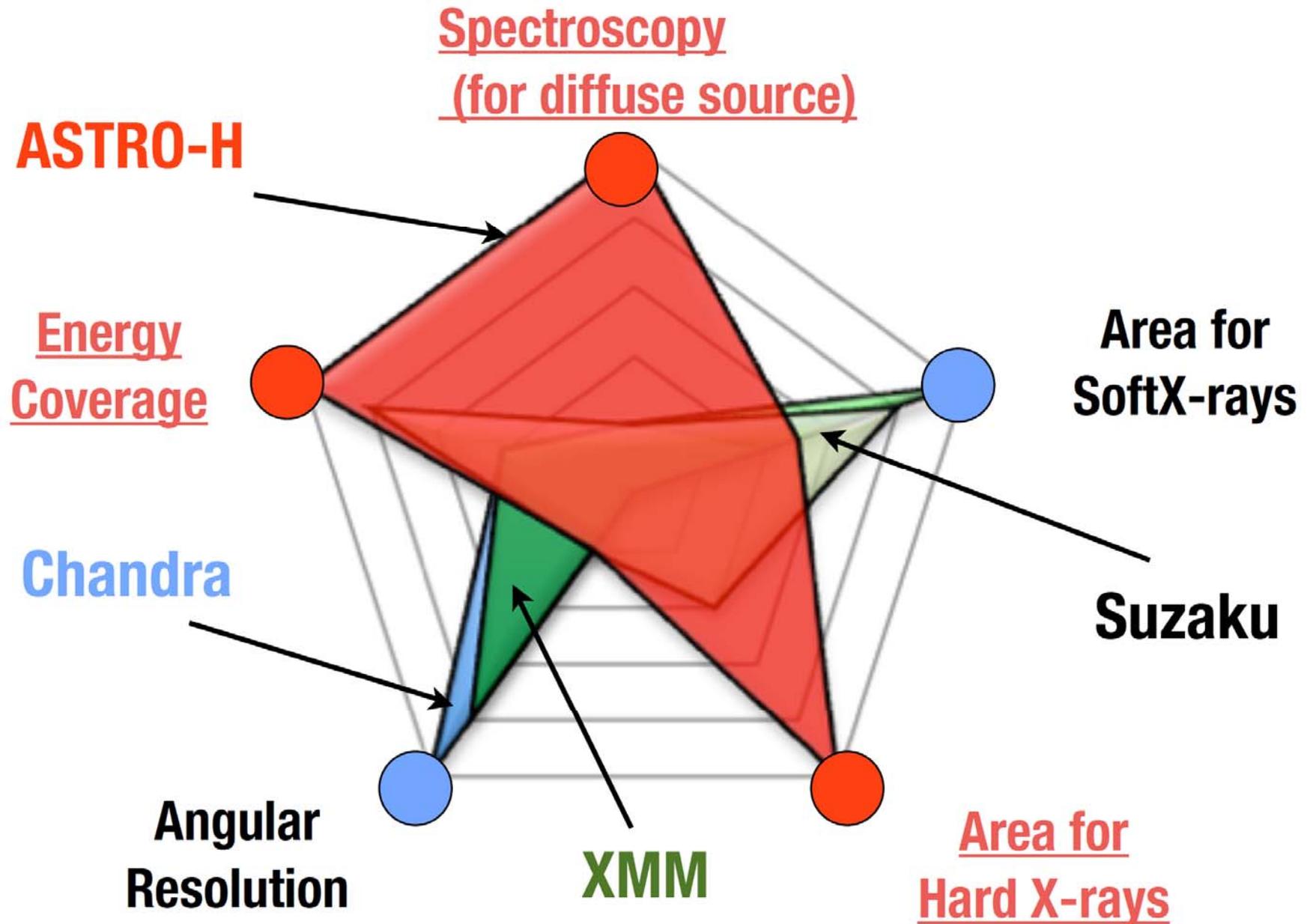
Lukasz Stawarz^a, Yasuharu Sugawara^{bj}, Satoshi Sugita^j, Hiroyuki Sugita^{aj}, Andrew Szymkowiak^o, Hiroyasu Tajima^e, Hiroaki Takahashi^g, Hiromitsu Takahashi^v, Shin-ichiro Takeda^a, Yoh Takei^a, Toru Yamagawa^f, Keisuke Tamura^e, Takayuki Tamura^a, Takaaki Tanaka^{ao}, Yasuyuki Tanaka^v, Yasuo Tanaka^a, Makoto Tashiro^{bi}, Yuzuru Tawara^c, Yukikatsu Terada^{bi}, Yuichi Terashima^j, Francesco Tombesi^b, Hiroshi Tomida^{aj}, Yoko Tsuboi^{bj}, Masahiro Tsujimoto^a, Hiroshi Tsunemi^g, Takeshi Tsuru^{ao}, Hiroyuki Uchida^{ao}, Hideki Uchiyama^{bk}, Yasunobu Uchiyama^{ac}, Yoshihiro Ueda^{aw}, Shutaro Ueda^g, Shiro Ueno^{aj}, Shinichiro Uno^{bl}, Meg Urry^o, Eugenio Ursino^w, Cor de Vries^d, Atsushi Wada^a, Shin Watanabe^a, Tomomi Watanabe^b, Norbert Werner^f, Nicholas White^b, Dan Wilkins^x, Shinya Yamada^s, Takahiro Yamada^a, Hiroya Yamaguchi^b, Kazutaka Yamaoka^e, Noriko Yamasaki^a, Makoto Yamauchi^{aa}, Shigeo Yamauchi^{be}, Tahir Yaqoob^b, Yoichi Yatsu^{ai}, Daisuke Yonetoku^u, Atsumasa Yoshida^k, Takayuki Yuasa^f, Irina Zhuravleva^f, Abdu Zoghbi^{av}, John ZuHone^b,

More than **200** scientists
from Japan/US/Europe/Canada



Takahashi et al (2014) SPIE paper

Capabilities (Schematic)



ASTRO-H capabilities

Parameter	Hard X-ray Imager (HXI)	Soft X-ray Spectrometer (SXS)	Soft X-ray Imager (SXI)	Soft γ -ray Detector (SGD)
Detector technology	Si/CdTe cross-strips	micro calorimeter	X-ray CCD	Si/CdTe Compton Camera
Focal length	12 m	5.6 m	5.6 m	-
Effective area	300 cm ² @ 30 keV	210 cm ² @ 6 keV 160 cm ² @ 1 keV	360 cm ² @ 6 keV	>20 cm ² @ 100 keV Compton Mode
Energy range	5 – 80 keV	0.3 – 12 keV	0.5 – 12 keV	40 – 600 keV
Energy resolution (FWHM)	2 keV (@60 keV)	< 7 eV	150 eV (@6 keV)	4 keV (@40 keV)
Angular resolution	<1.7 arcmin	<1.3 arcmin	<1.3 arcmin	-
Effective Field of View	~ 9 × 9 arcmin ²	~ 3 × 3 arcmin ²	~ 35 × 35 arcmin ²	0.6 × 0.6 deg ² (< 150 keV)

Hard X-ray imaging
(similar to NuSTAR)

High-resolution spectroscopy
(20 -30 times better than CCD)

Wide-field CCD
(similar to Suzaku)

What's new?

1. High resolution ($E/\Delta E \sim 1000$) X-ray spectroscopy

First time for **extended sources at 0.3-12 keV**
or point-like sources at 4-12 keV

2. Simultaneous observations with:

- Hard X-ray imager: **E=5-80 keV**, FOV=9'
(similar to NuSTAR)
- Soft X-ray CCD: E=5-12 keV, **FOV=35'**

Trade-off:

- Spatial resolution $>1'$
- Lower effective area than Suzaku, XMM

Galaxy clusters, particularly at low-z, are amongst the key targets.

X線で何が見えるのか？

- ・熱的ガス: $T > 10^6 \text{K}$ 、 $V > 100 \text{ km/s}$ (陽子)

主に制動放射 & 高階電離イオン輝線

$$\text{強度} \propto n^2$$

e.g. He-like Fe 6.7 keV ($1s2p-1s^2$)

- ・非熱的電子: $V \sim c$ 相対論的

シンクロトロン放射:

$$h\nu \sim 20 \text{ keV} \left(\frac{B}{\mu\text{G}} \right) \left(\frac{\gamma}{10^9} \right)^2$$

逆コンプトン散乱:

$$h\nu \sim 30 \text{ keV} \left(\frac{E_{\gamma 0}}{E_{\text{CMB}}} \right) \left(\frac{\gamma}{10^4} \right)^2$$

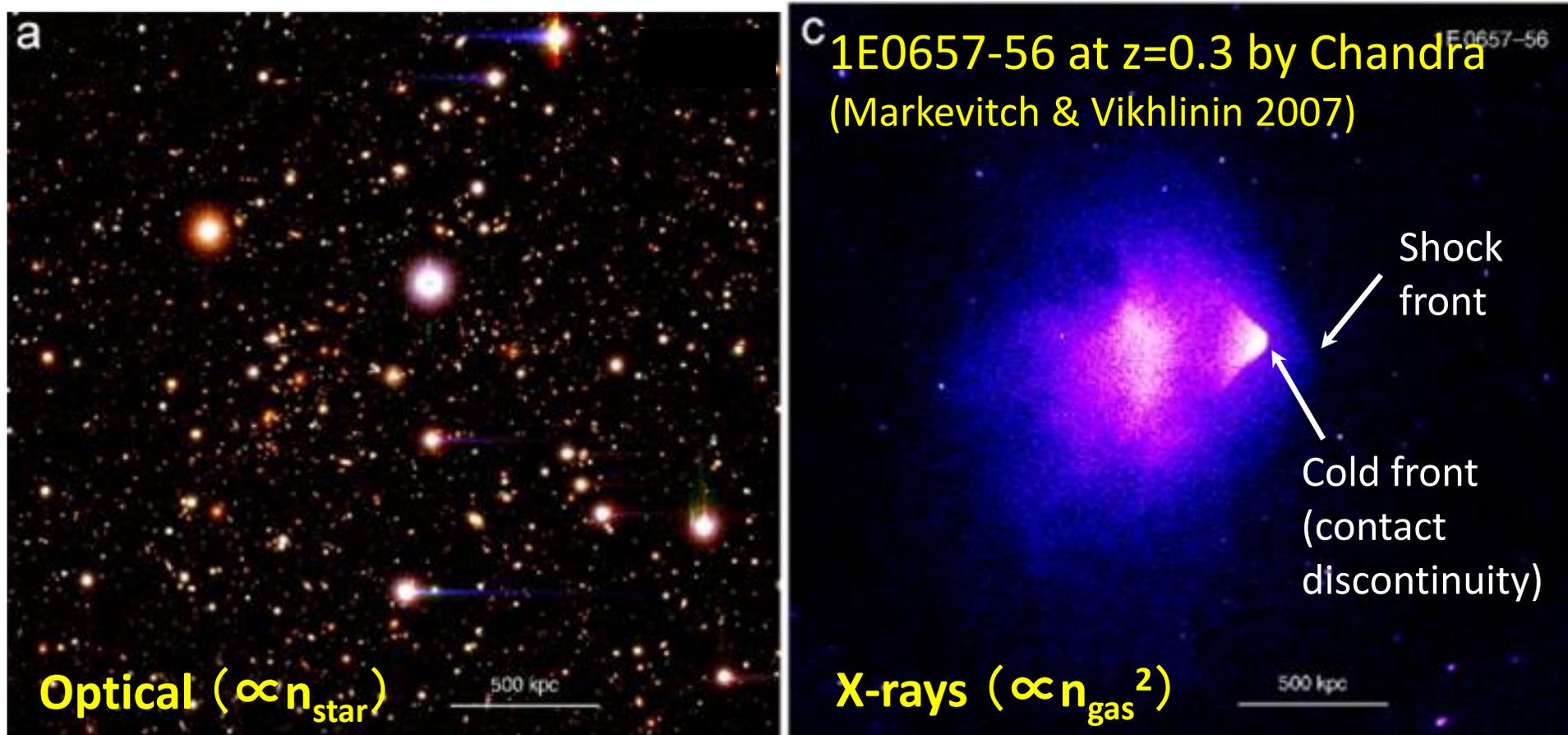
- ・中性(に近い)重元素

反射・蛍光放射 e.g. 中性 Fe 6.4 keV ($K\alpha$)

吸収

など。スケールは、高密度天体から銀河団まで様々。

Why X-rays for galaxy clusters?

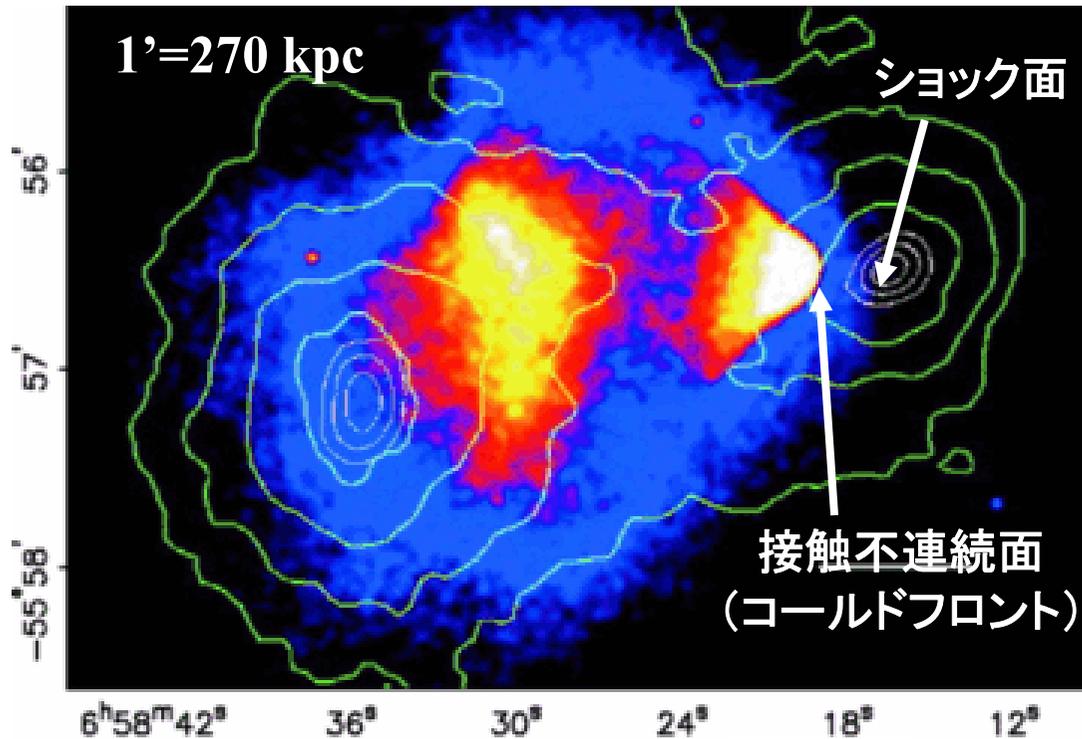


~80% of baryon content is X-ray emitting gas

Emissivity $\propto n^2 \rightarrow$ higher contrast against background

However, $E/\Delta E < 50$ by CCD $\rightarrow E/\Delta E \sim 1000$ by **ASTRO-H**

銀河団：構造形成の現場



Bullet cluster (1E0657-56) @ $z=0.3$

(Clowe+08)

カラー: X-ray (collisional gas)

等高線: weak lensing (collisionless DM)

・DMとガスの分離:

$$\sigma_{SI}/m < 1 \sim 5 \text{ cm}^2/\text{g}$$

素粒子モデルに依存しない制限
(Markevitch et al. 2004)

・衝撃波の存在:

Mach number ~ 3.0 ($\gamma=5/3$)

$V_{\text{preshock}} \sim 4700 \text{ km/s}$

$V_{\text{postshock}} \sim 1600 \text{ km/s}$

(Markevitch & Vikhlinin 2007)

Kinetic energy $\sim 10^{64} \text{ erg}$

頻度？ ガス物理？

星形成？ 粒子加速？

宇宙論的ガスの運動

1. Internal shocks

既に加熱されたガスの衝突
or AGN 等によるフィードバック
低マッハ数(2~4), 高密度

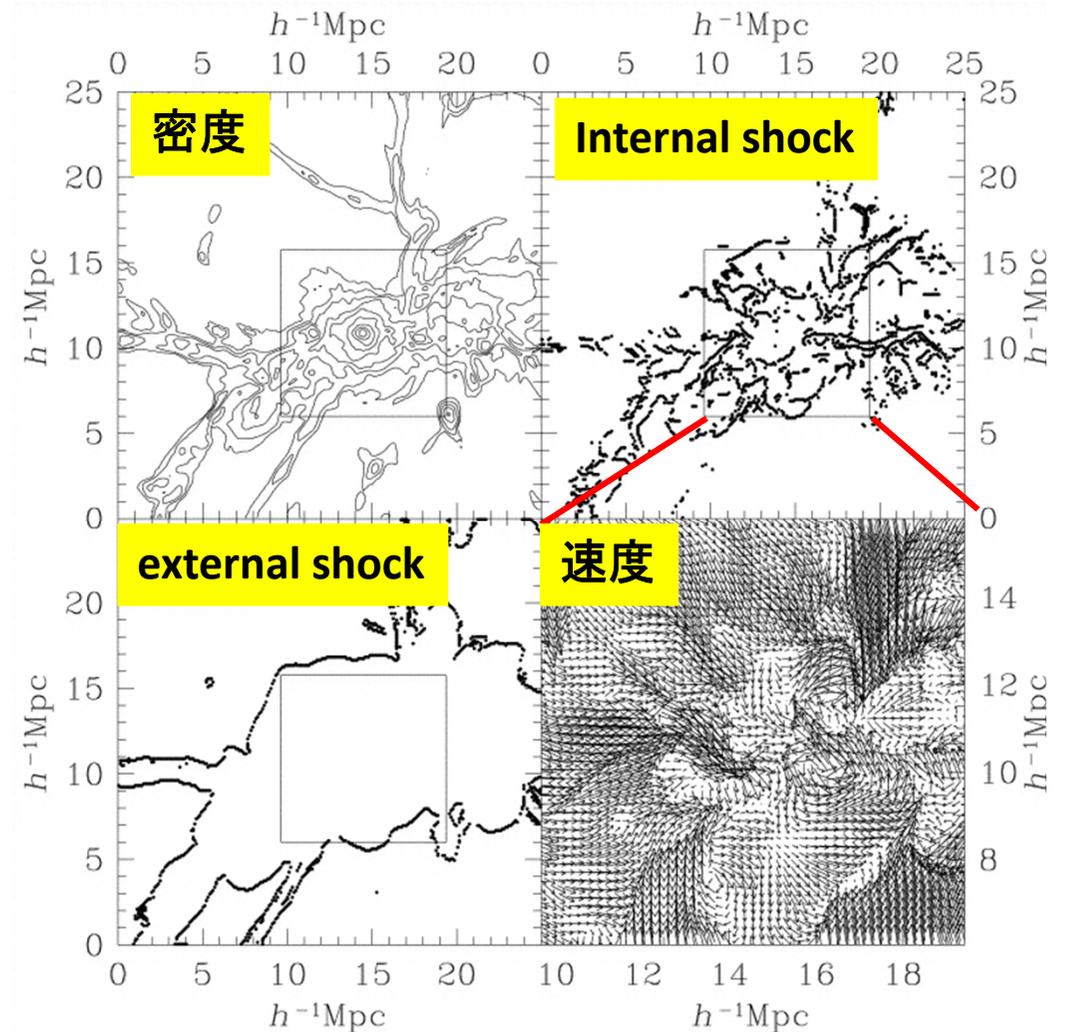
2. External shocks

冷たいIGMへ外から降着
高マッハ数(~100), 低密度
観測では未検出

3. 乱流?

理論・観測ともに不定
粒子加速、圧力への寄与?

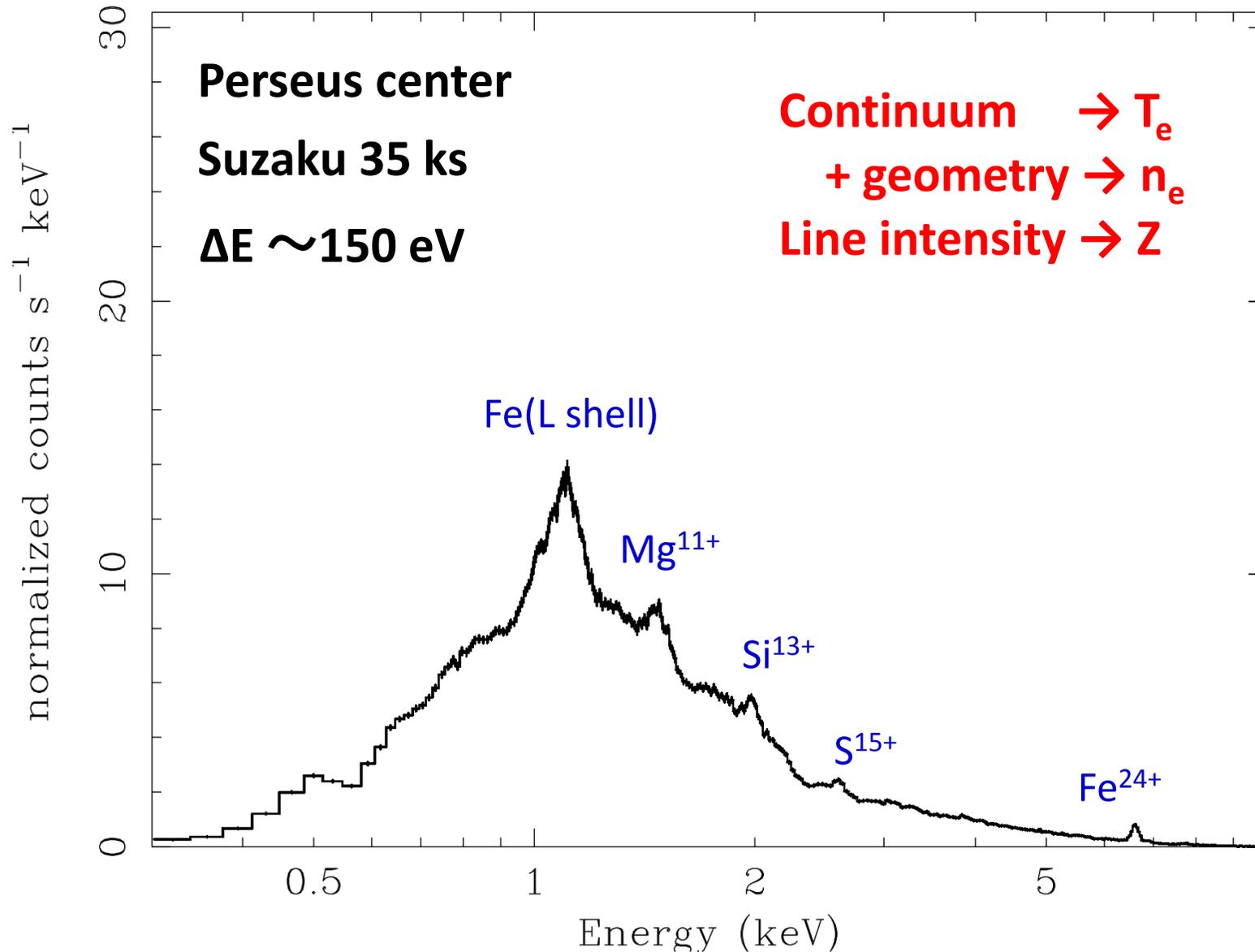
いずれも速度構造は測定されていない
→ ASTRO-Hをはじめとする高分散X線分光
(cf. Suzaku による示唆 Tamura+2010)



Ryu et al. (2003)

Cosmological mesh simulation
 Λ CDM, $L=100 \text{ Mpc}/h$,

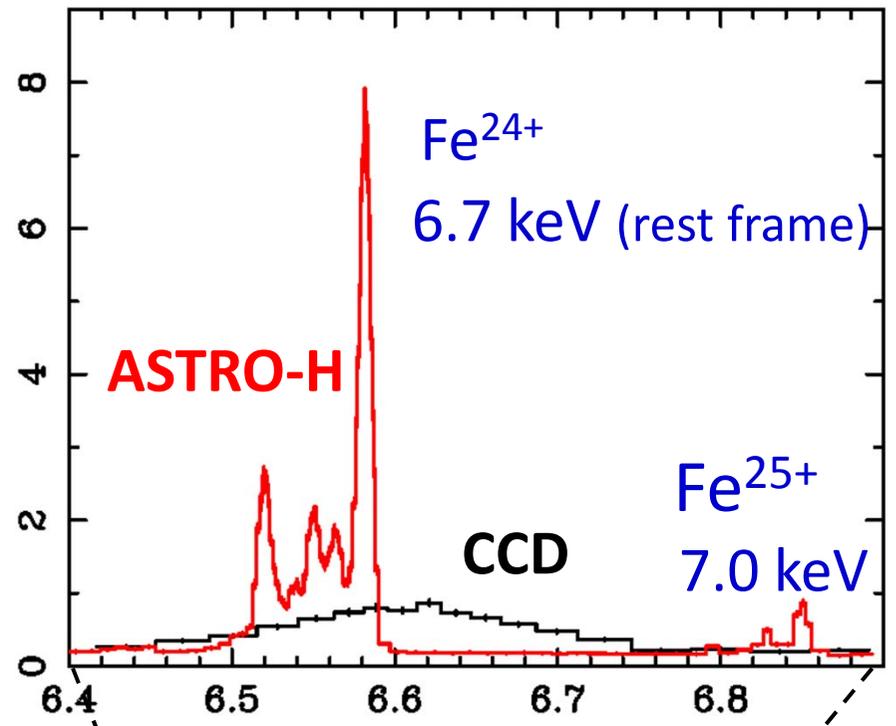
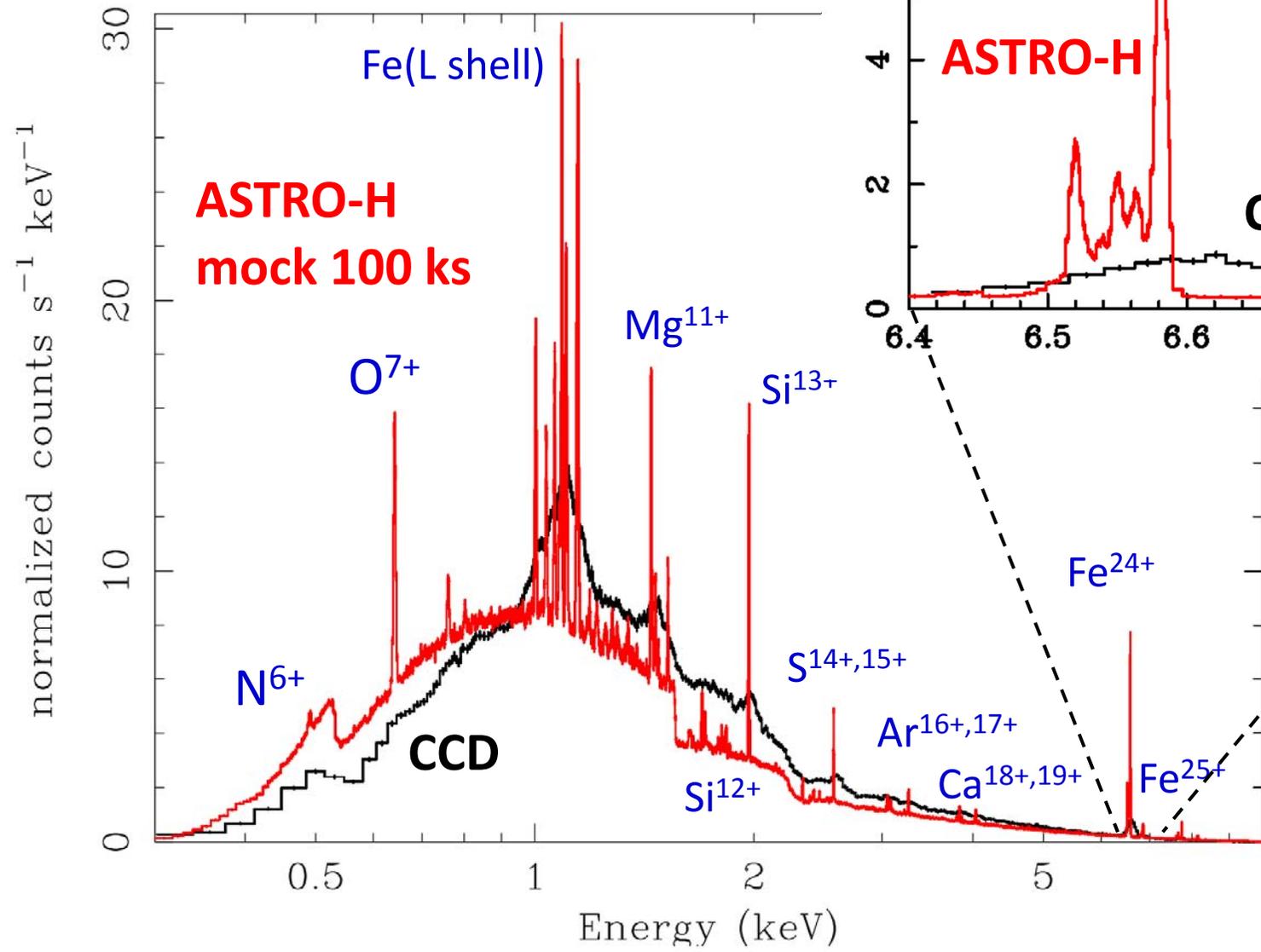
CCD spectrum of a galaxy cluster



Provided by
K. Matsushita

ASTRO-H vs. CCD

Perseus center



Provided by
K. Matsushita

エネルギー分解能の必要性

1. 輝線のシフト: バルク運動

$$\Delta E = 2.2\text{eV} \left(\frac{V_{\text{bulk}}}{100\text{km/s}} \right) \left(\frac{E_{\text{obs}}}{6.7\text{keV}} \right)$$

2. 輝線の広がり: ランダム運動

natural $W_{\text{nat}} = 0.31 \text{ eV} \left(\frac{A}{4.67 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} \right),$ FWHMs

+

thermal $W_{\text{therm}} = 4.9 \text{ eV} \left(\frac{kT_{\text{ion}}}{5 \text{ keV}} \right)^{1/2} \left(\frac{m_{\text{ion}}}{56 m_{\text{p}}} \right)^{-1/2} \left(\frac{E_{\text{obs}}}{6.7\text{keV}} \right),$

+

turbulent $W_{\text{turb}} = 5.3 \text{ eV} \left(\frac{V_{\text{turb}}}{100 \text{ km/s}} \right) \left(\frac{E_{\text{obs}}}{6.7 \text{ keV}} \right),$

+

instrumental

Einstein coeff. for He-like Fe @ 6.7keV

視線速度分散

**V ~ 100km/s の測定には、検出器分解能 < 7eV が必要
& 複数の元素の組み合わせ ⇒ T_{ion} と乱流の分離**

Impact on ICM properties

Velocity of 100 km/s corresponds to

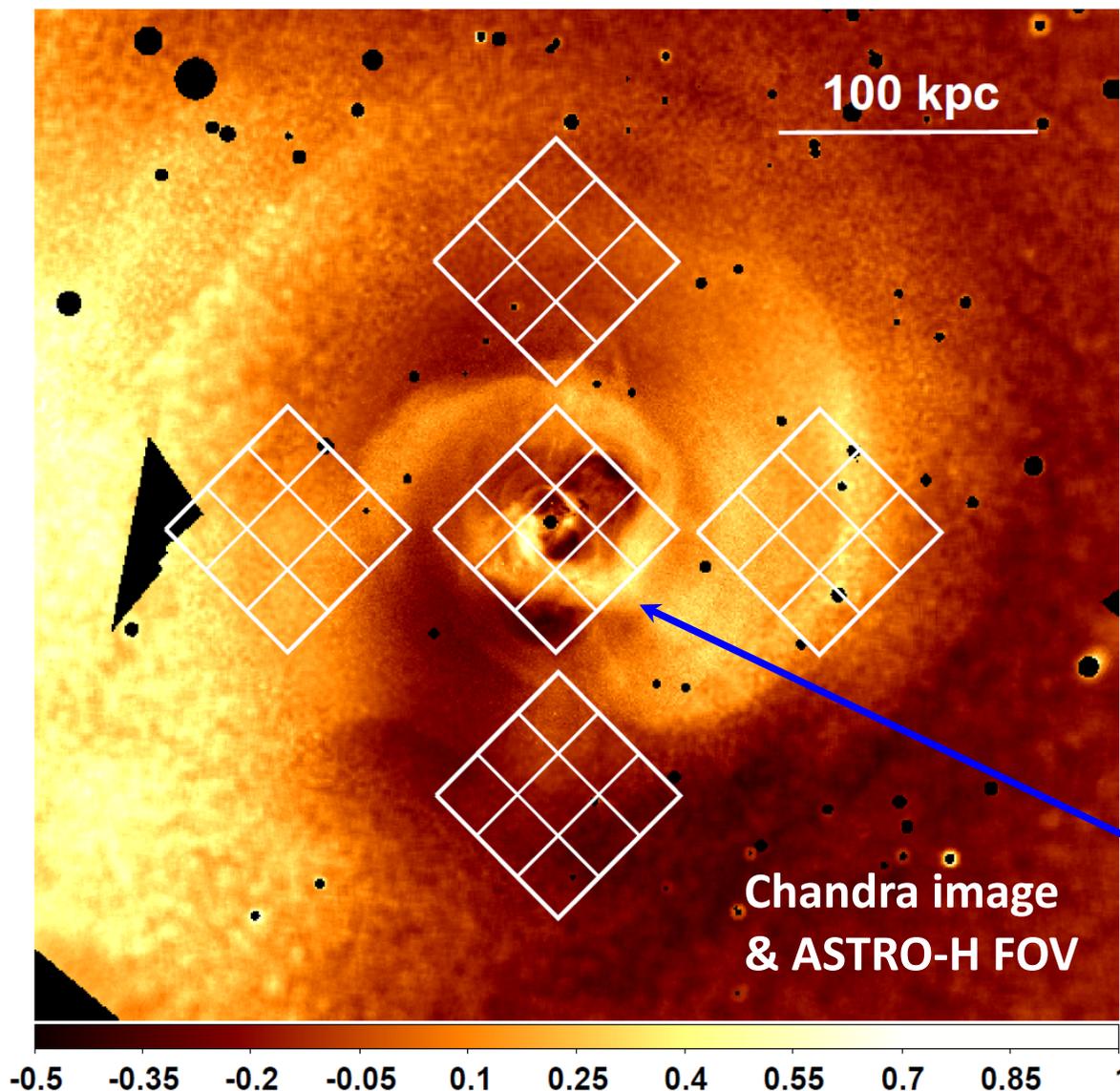
$$\frac{v_{\text{bulk}}}{v_{\text{sound}}} = 8.7 \times 10^{-2} \left(\frac{v_{\text{bulk}}}{100 \text{ km s}^{-1}} \right) \left(\frac{\mu}{0.6} \right)^{1/2} \left(\frac{kT}{5 \text{ keV}} \right)^{-1/2},$$

for bulk motion, and

$$\frac{p_{\text{turb}}}{p_{\text{therm}}} \simeq 1.3 \times 10^{-2} \left(\frac{v_{\text{turb},1\text{D}}}{100 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{\mu}{0.6} \right) \left(\frac{kT}{5 \text{ keV}} \right)^{-1}.$$

for isotropic turbulence.

Mock observations by ASTRO-H



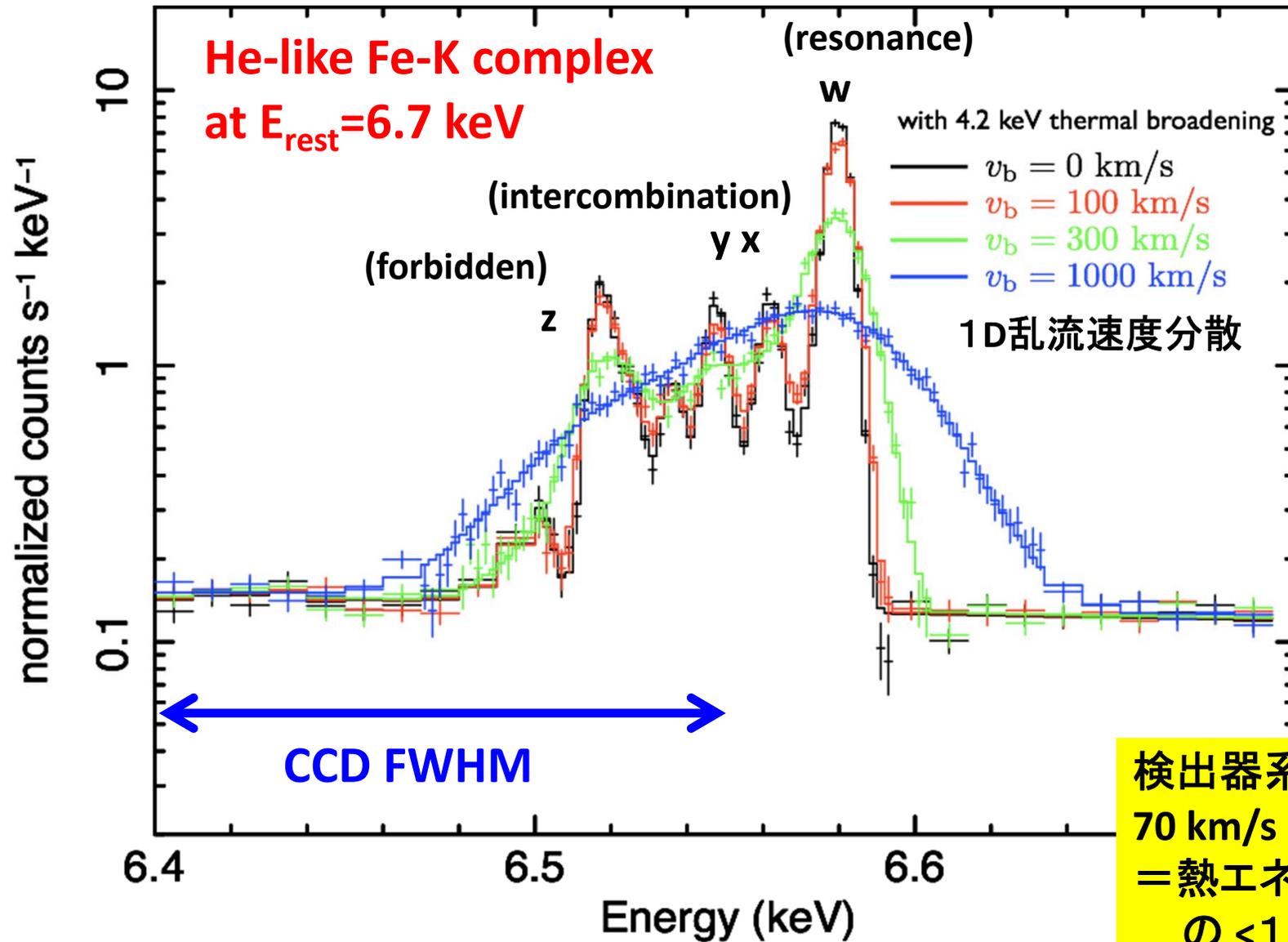
Perseus cluster
@ $z=0.018$

X線で最も明るい銀河団

中心部に弱いショック、
バブル等、中心銀河
との相互作用の兆候

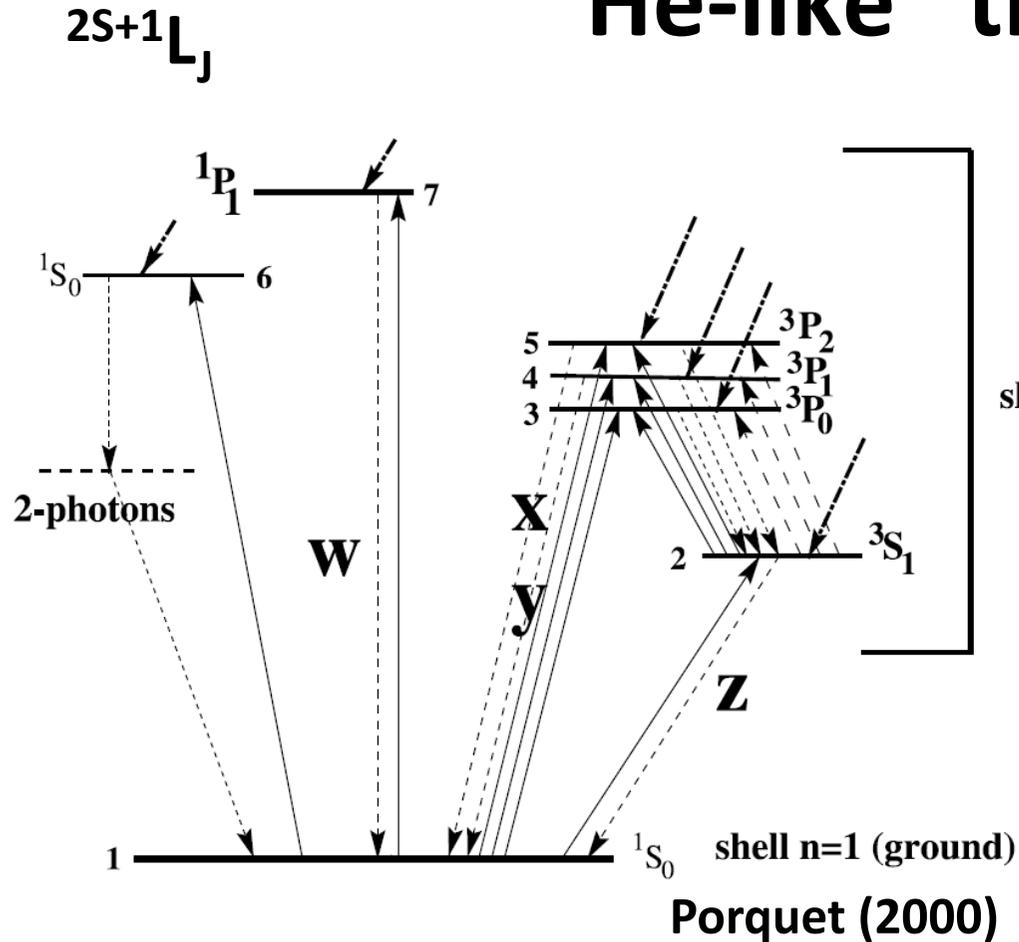
視野=3' × 3'
空間分解能=1.3'

Mock spectra for Perseus center (100ks)



検出器系統誤差
70 km/s (1σ)
= 熱エネルギー
の <1%

He-like “triplet”



Resonance line (w)

$$1s2p \ S=0 \ L=1 \ J=1 \ \rightarrow \ 1s^2$$

Intercombination lines (x,y)

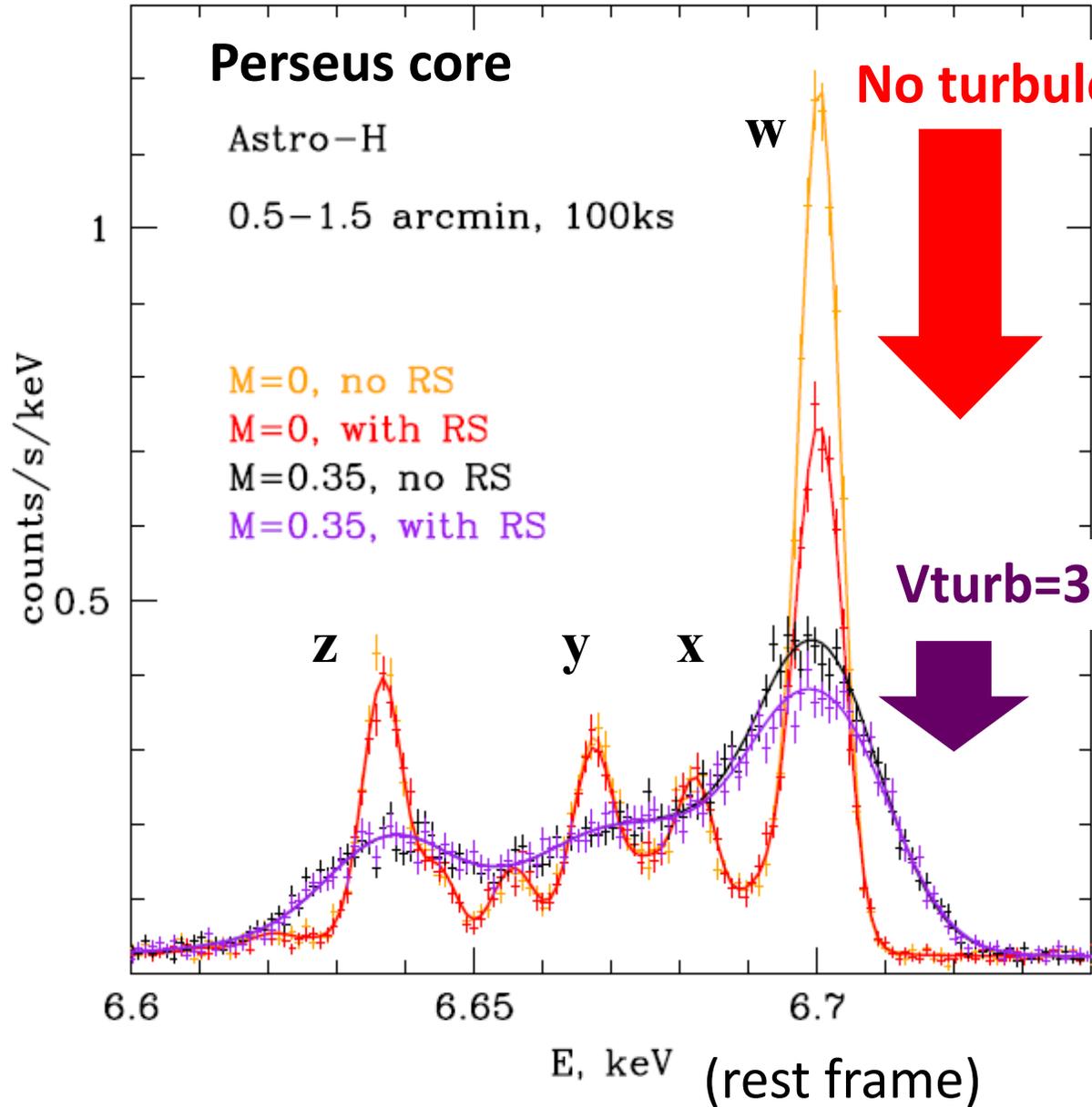
$$1s2p \ S=1 \ L=1 \ J=2,1 \ \rightarrow \ 1s^2$$

Forbidden line (z)

$$1s2s \ S=1 \ L=0 \ J=1 \ \rightarrow \ 1s^2$$

- ASTRO-H は He-like Fe-K の **w, x+y, z** を分解可能
- w は**散乱**されやすいので、他との組み合わせが重要
- $G=(x+y+z)/w$ 、 $R=z/(x+y) \Rightarrow T_e$ 、 n_e の指標
- H-like Fe 輝線(7.0keV等)との比 \Rightarrow **電離平衡**からのずれ

共鳴散乱



乱流が小さいと、
共鳴線(w)は散乱
されやすい。

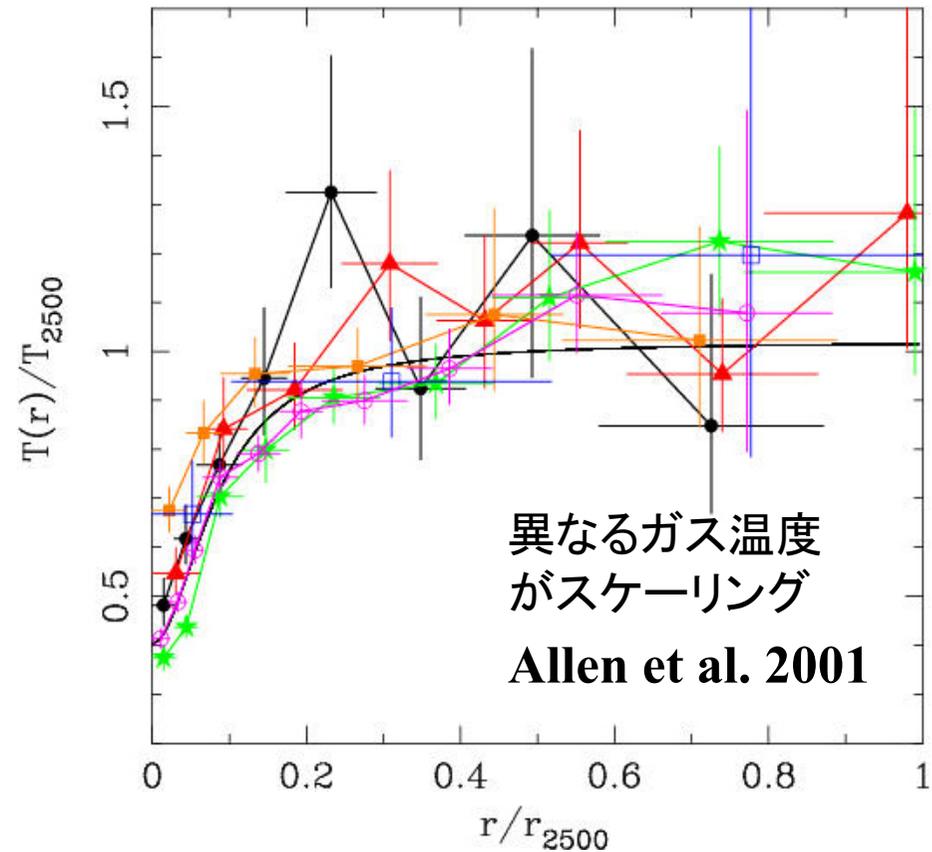
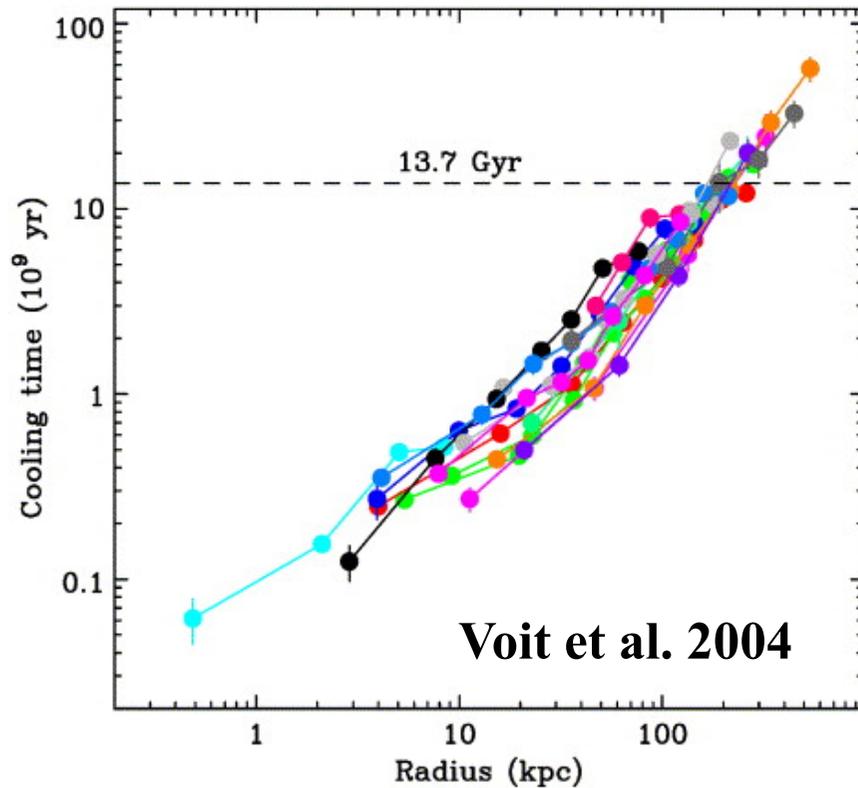
複数の輝線の組合せ
(e.g., 1s3p at 7.9 keV)
が重要。幅とは独立な
乱流速度の指標にも
なる。

高分散X線分光の測定量

- **ガス視線速度**：
 バルク運動（輝線シフト）
 乱流を含むランダム運動（輝線幅） 初めて
- **イオン温度**（異なる重元素線の幅）
- **電子温度、密度**（連続成分）
- **電離平衡からのずれ**（同一重元素の輝線比） 質の向上
- **各種重元素量**（O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni,,,）
など

※ASTRO-Hカロリメータは、近傍の明るい銀河団に適している。
より遠方・暗い領域の詳細な高分散分光は、2020年代に期待。

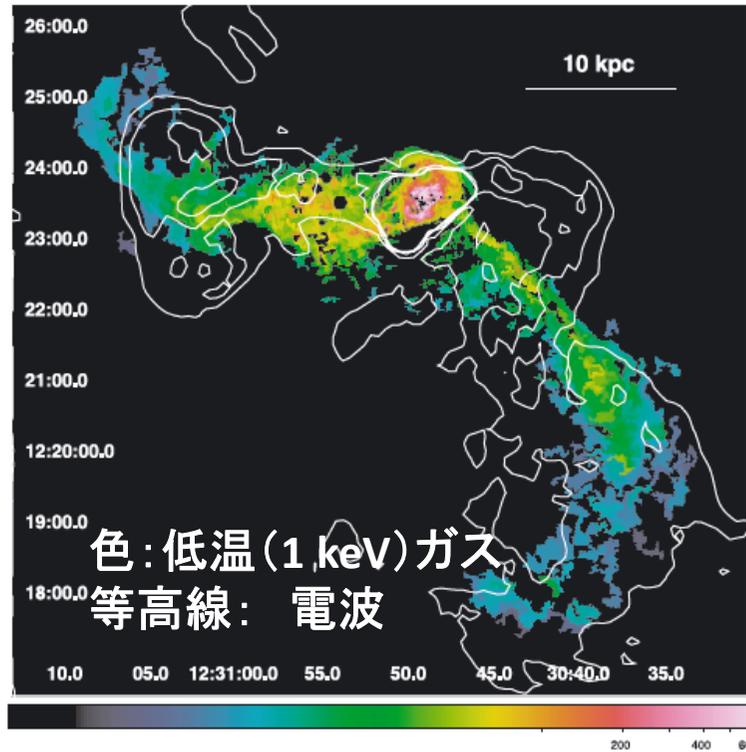
中心部のガス運動：クーリングフロー問題



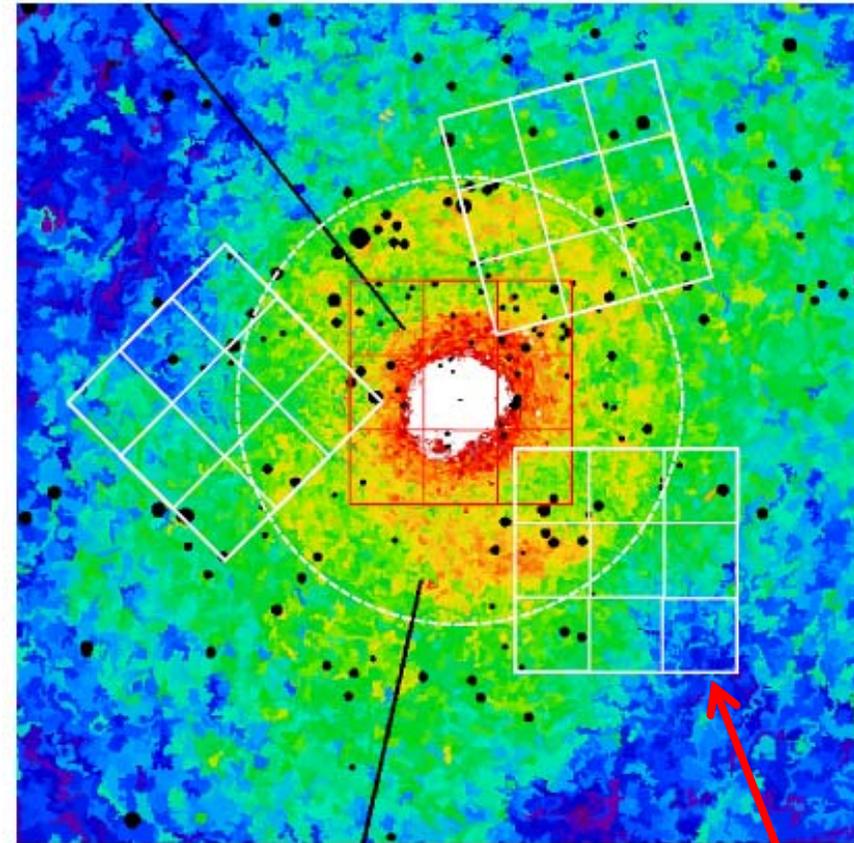
銀河団中心部：
放射冷却時間 < 宇宙年齢
→ そのままでは過冷却

何が冷却を止めているのか？
なぜ普遍的か？（銀河の上限質量？）
Energetics 的には長い歴史と諸説あり、
具体的プロセスの実証が必要

AGNフィードバック



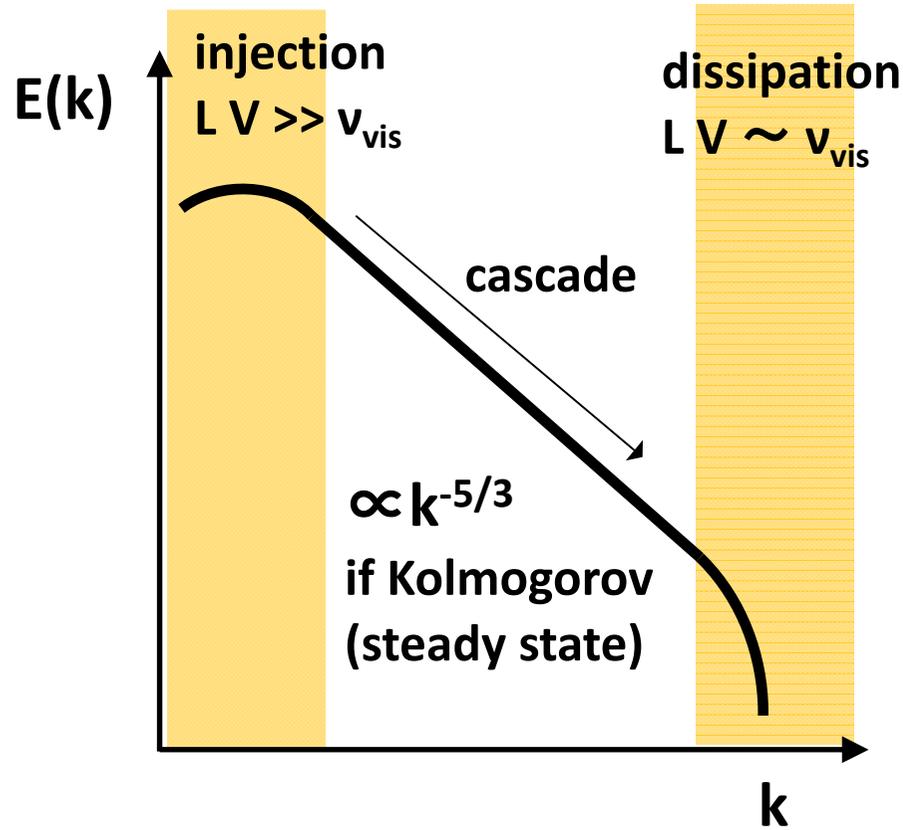
M87 (Virgo 銀河団中心) 周辺
平均 $\sim 3\text{keV}$ の高温ガス中に
 $\sim 1\text{keV}$ の低温ガスフィラメント
中心AGNからの電波ローブと相関
(Werner et al. 2010)



ASTRO-H
SXS視野

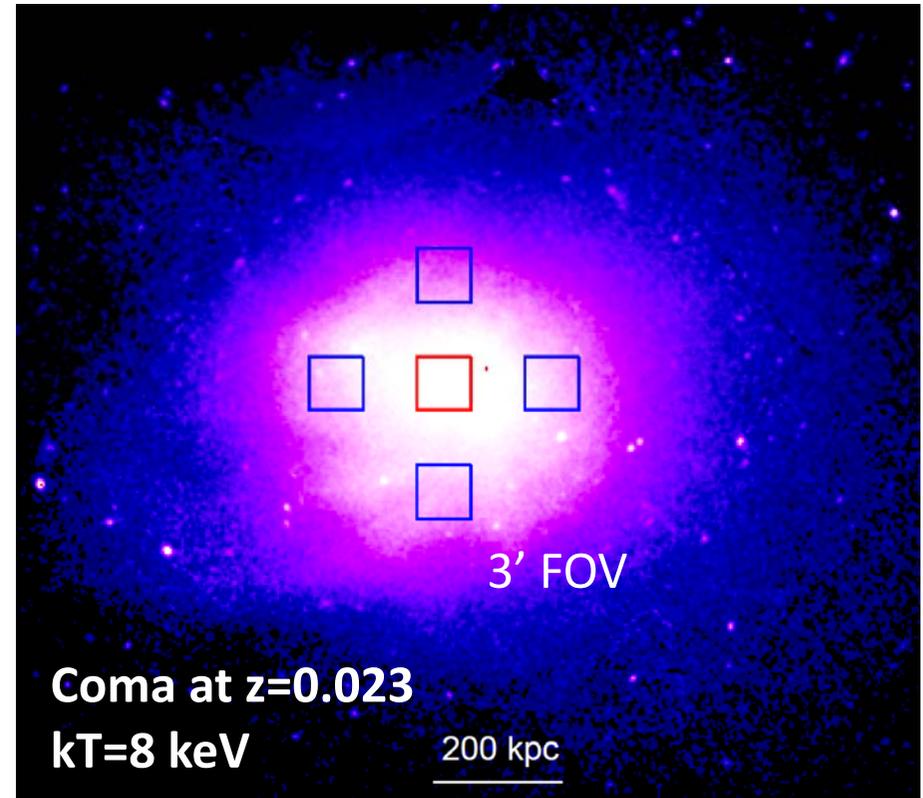
圧カマップ
弱いショックの兆候
エネルギー・物質輸送の現場？
⇒ 運動 & 重元素量の精密測定が鍵

乱流のスペクトル



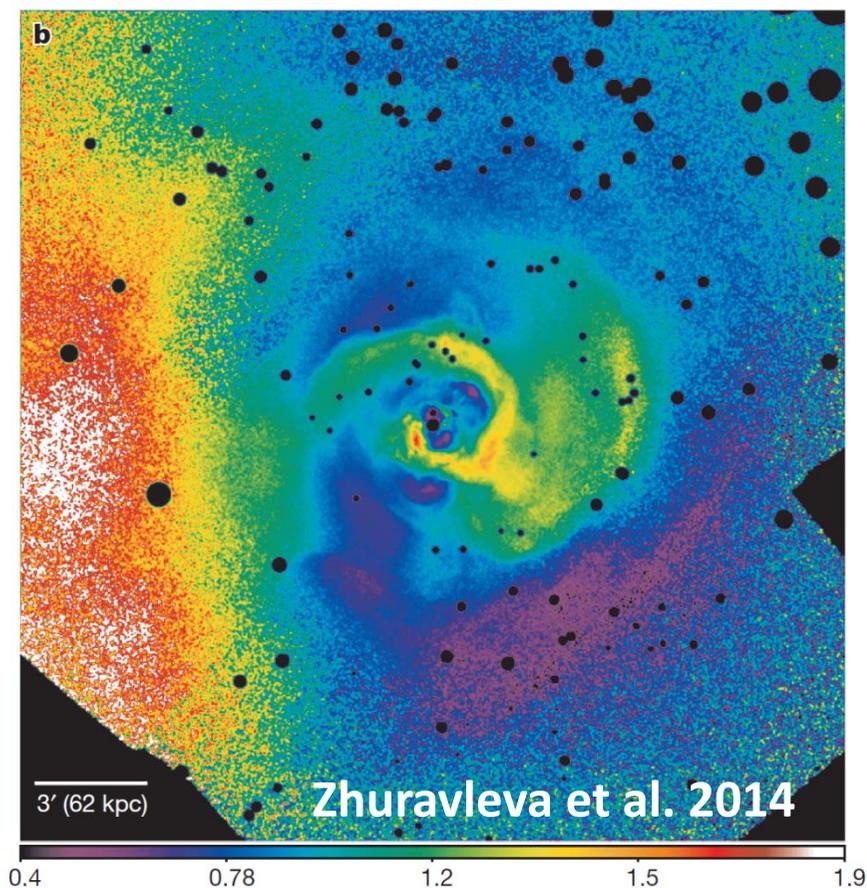
$$\int_0^{\infty} E(k) dk = \frac{1}{2} \langle \vec{v}^2(x) \rangle$$

$$\sim k^2 P_{3D}(k)$$

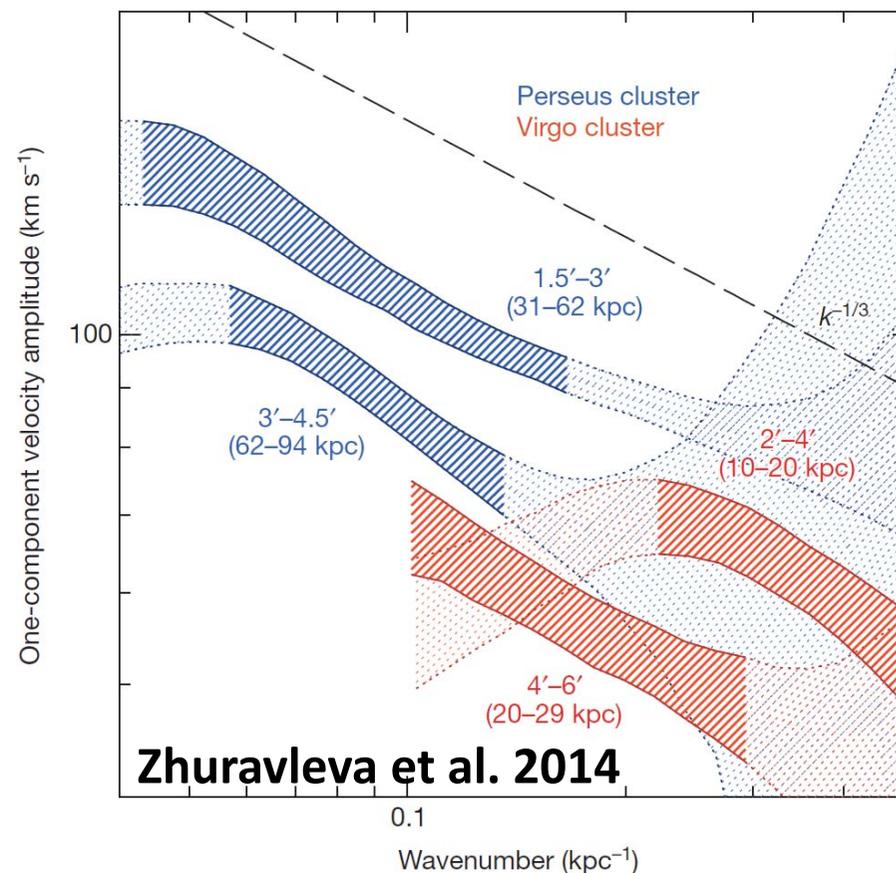


ASTRO-H will probe **the injection scale** of turbulence. The dissipation scale is difficult to resolve if it is $< 100 \text{ kpc}$.

乱流スペクトル: 密度ゆらぎからの示唆



Perseus @ $z=0.018$
 X線輝度のゆらぎ (Chandra)
 $I_x \propto \int n_e^2 \Lambda(T) dl$



X線輝度ゆらぎが乱流起源ならば
 $\delta\rho/\rho \sim V/c_s \propto [kE(k)]^{1/2}$
 10-100kpc ではKolmogorovと整合
 特徴的スケールは見えていない

Relaxed clusters: 重力質量 & 緩和時間

宇宙論的応用(質量関数、バリオン比等)に不可欠

直接法: 銀河運動、静水圧平衡、重力レンズ(各々一長一短ある)

間接法: 諸々の相関関係(直接法による校正必要)

※静水圧平衡による質量測定 (X線/SZ効果)

長所: 多数のサンプル、high z

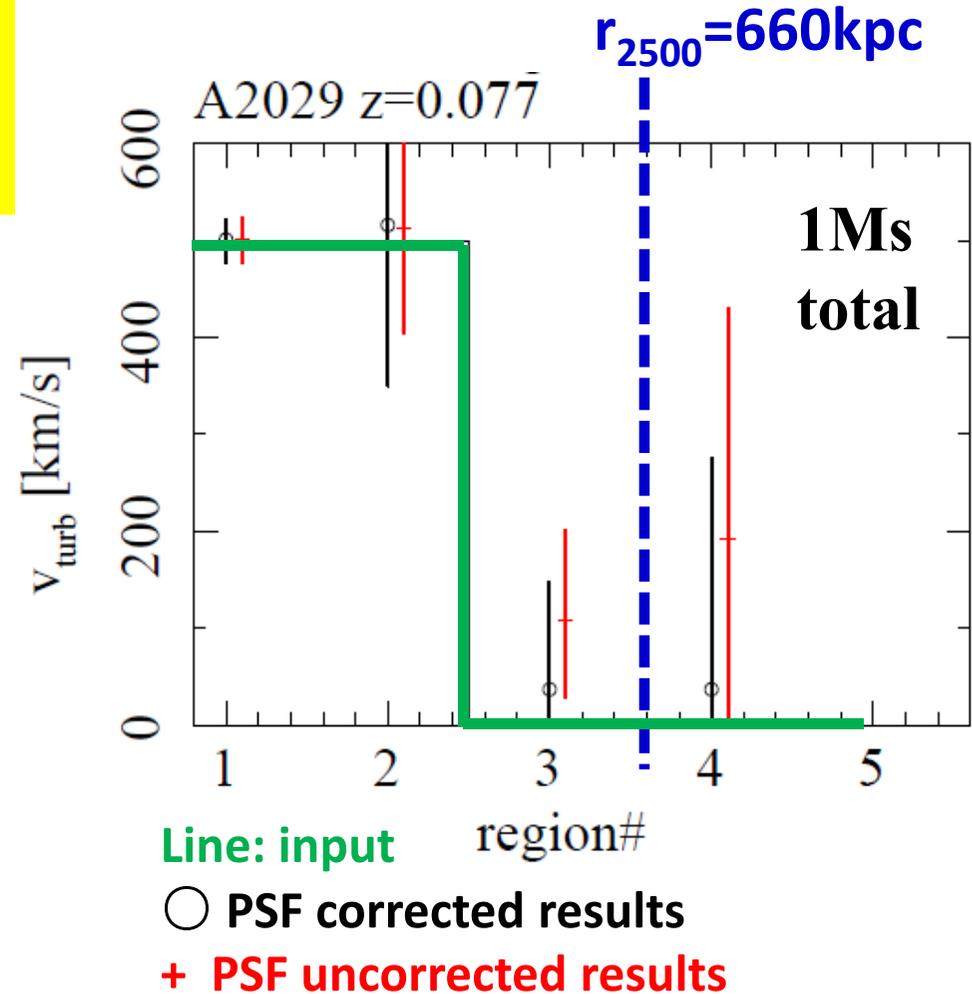
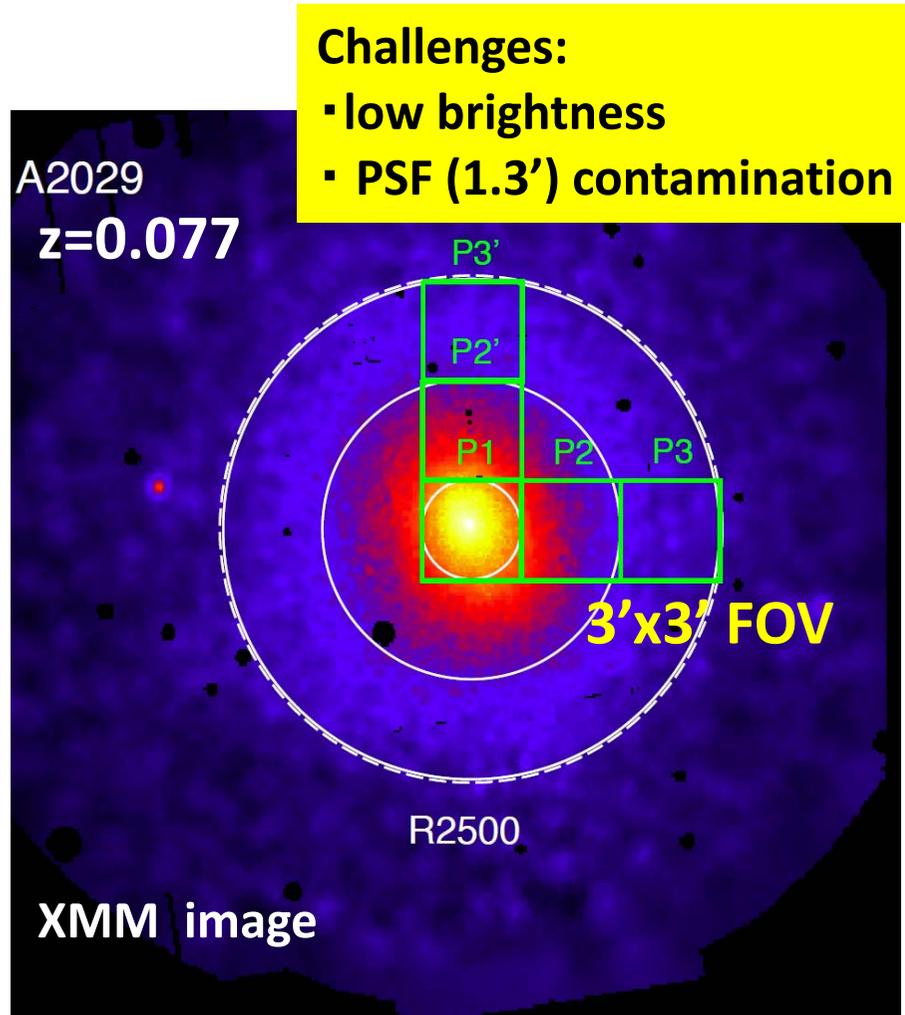
短所: 非平衡、非熱的成分、非球対称性を無視

$$\frac{d(P_{\text{th}} + P_{\text{nth}})}{dr} = -\frac{GM(< r)}{r^2} \rho_{\text{gas}}$$

$$\frac{P_{\text{turb}}}{P_{\text{th}}} = 0.013 \left(\frac{V_{\text{turb}}}{100 \text{ km/s}} \right)^2 \left(\frac{kT_e}{5 \text{ keV}} \right)^{-1}$$

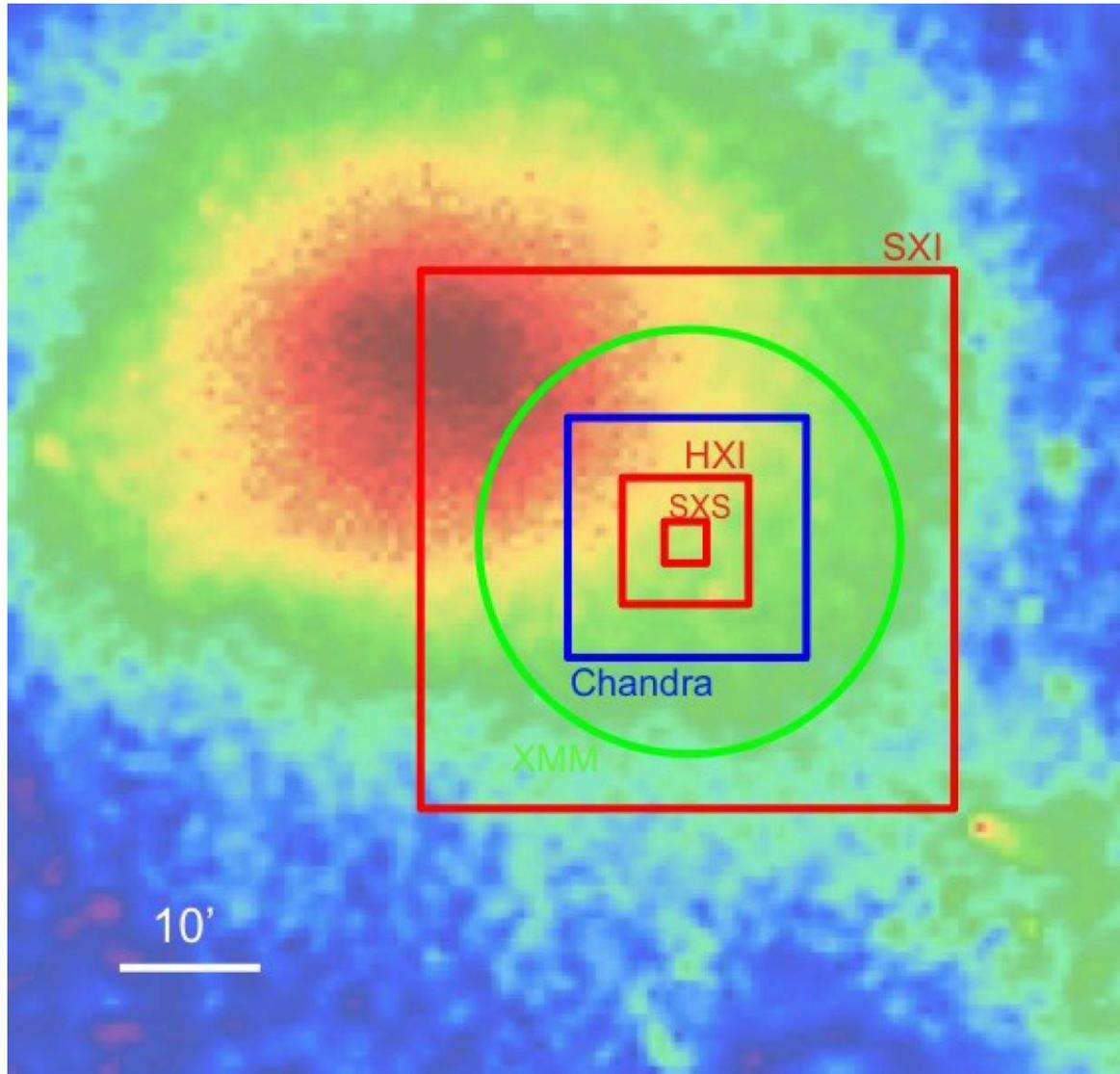
乱流による
非熱的圧力
を%レベル
で測定

Relaxed clusters: 重力質量 & 緩和時間



$\Delta V \sim 100 \text{ km/s}$ will be achieved out to $\sim r_{2500} \sim 1/4 r_{200}$ at $z < 0.1$

広帯域 & 広視野



ASTRO-H 検出器

1) スペクトル分解能(SXS)

3'x3' FOV

2) 硬X線 (HXI):

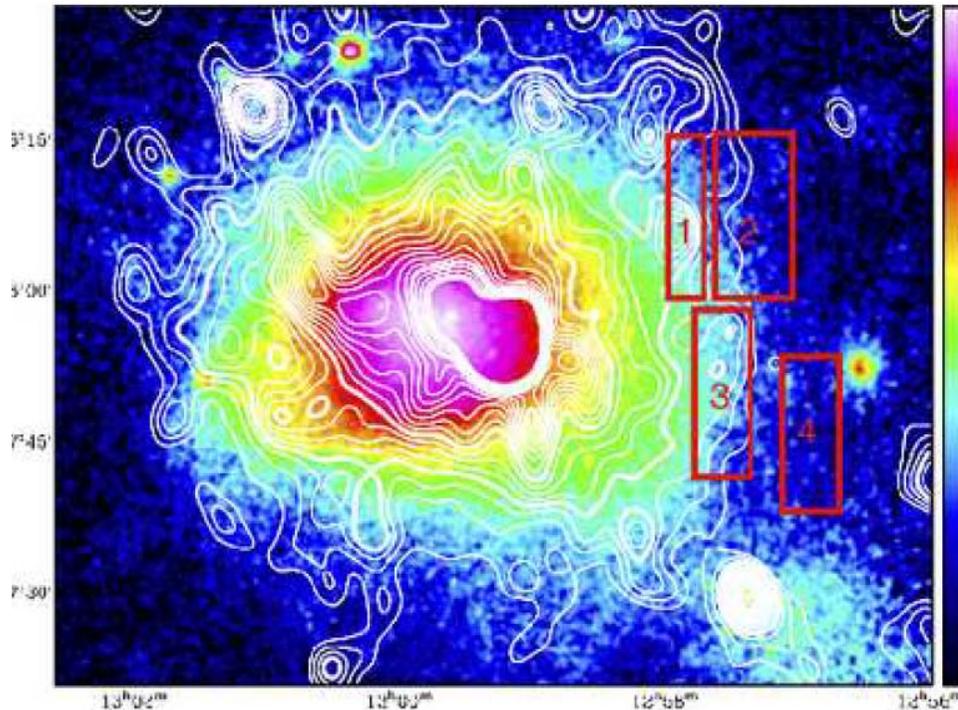
9'x9' FOV

3) 広視野 (SXI):

35'x35' FOV

運用初期は 1) が優先される(寿命3年以上)が、2) 3)も同時にデータ取得

構造形成と粒子加速



Radio (contours) & X-ray (color)
in Coma cluster
(Brown & Rudnik 2011)

銀河団からの広がった電波放射
 $\gamma \sim 10^4$ 電子によるシンクロトロン

ショックと一致しているとは限らず、
全体に広がっているものも多い
起源もエネルギーも不明
in-situ or secondary?

⇒ 同一の相対論的電子は
硬X線で逆コンプトン散乱

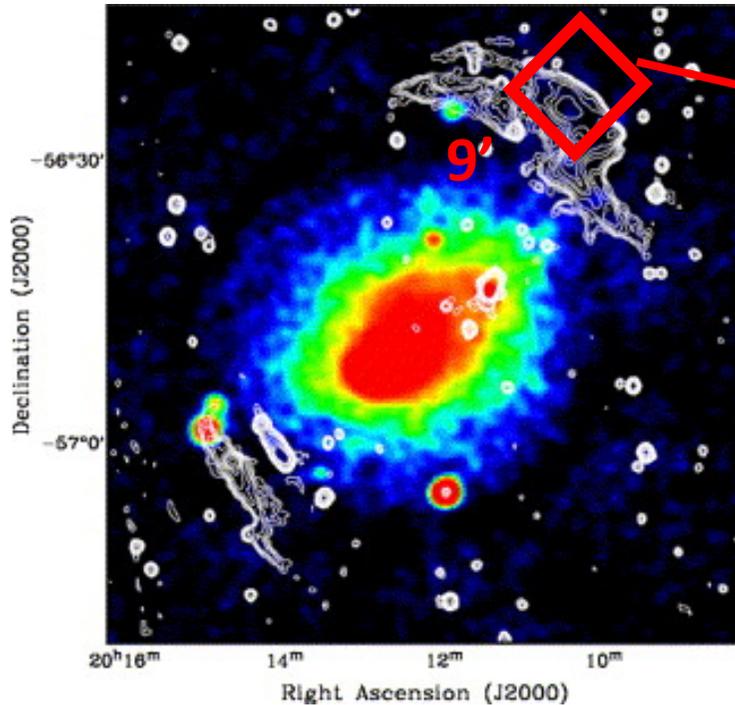
$$F_{\text{sync}} \propto n_e B^2$$

$$F_{\text{IC}} \propto n_e U_{\text{CMB}}$$

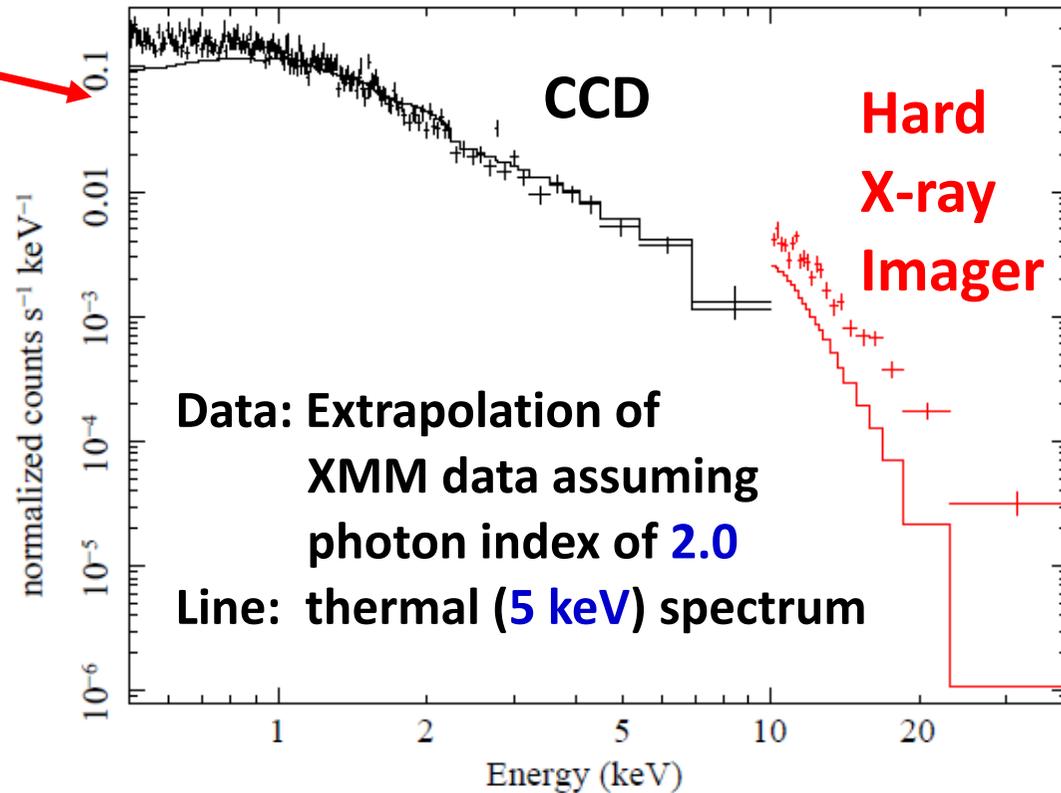
現状は F_{IC} への上限のみ
i.e., $B > 0.1 \sim 1 \mu\text{G}$

非熱的電子(逆コンプトン散乱)

A3667 NW relic ([3.7Jy@1.4GHz](#), Johnston-Hollitt et al. 2008)

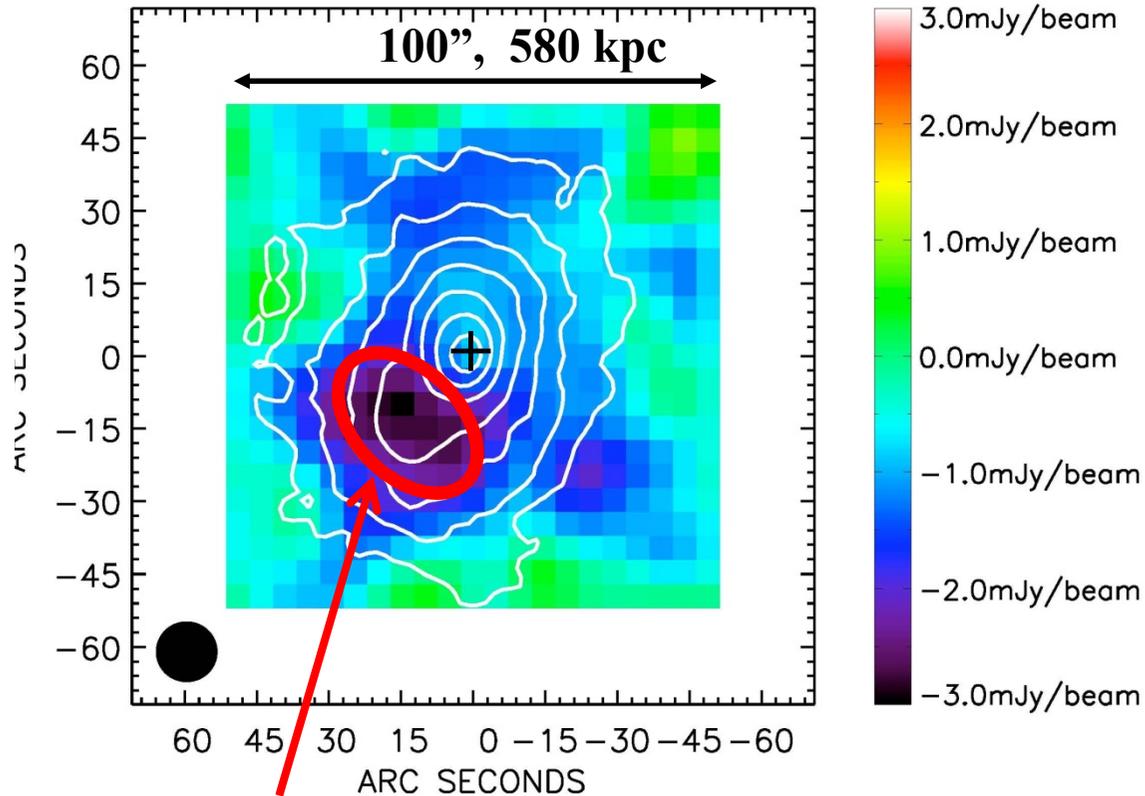


color: X-ray, contours: radio
(Feretti et al. 2004)



- ・ASTRO-H のPSF (1.7'HPD) はNuSTAR (1')より劣るが、FOV外からの光子混入を防ぐpre-collimator搭載 → **off-center relics** に有利
- ・Suzaku の6倍の深さ → 未検出の場合でも $B > 4 \mu\text{G}$
(実際の感度は、in-orbit での background による)

Very hot ($kT \gg 10\text{keV}$) gas



ビリアル温度の2~3倍。
恐らく、ショック直後(<Gyr)
の過渡的状态。

A3667 (Nakazawa+09)

A2163 (Ota+14)

Bullet cluster (Wik+14)
でも示唆あり。

非熱的成分との分離
が必要。

150GHz SZ image of RXJ1347-1145

• SZE & Chandra X-ray (TK+04)

$$I_{\text{SZ}} \propto \int n_e T_e dl \quad \& \quad I_X \propto \int n_e^2 \Lambda(T) dl$$

$$\rightarrow kT_{\text{excess}} = 28.5 \pm 7.3 \text{ keV}$$

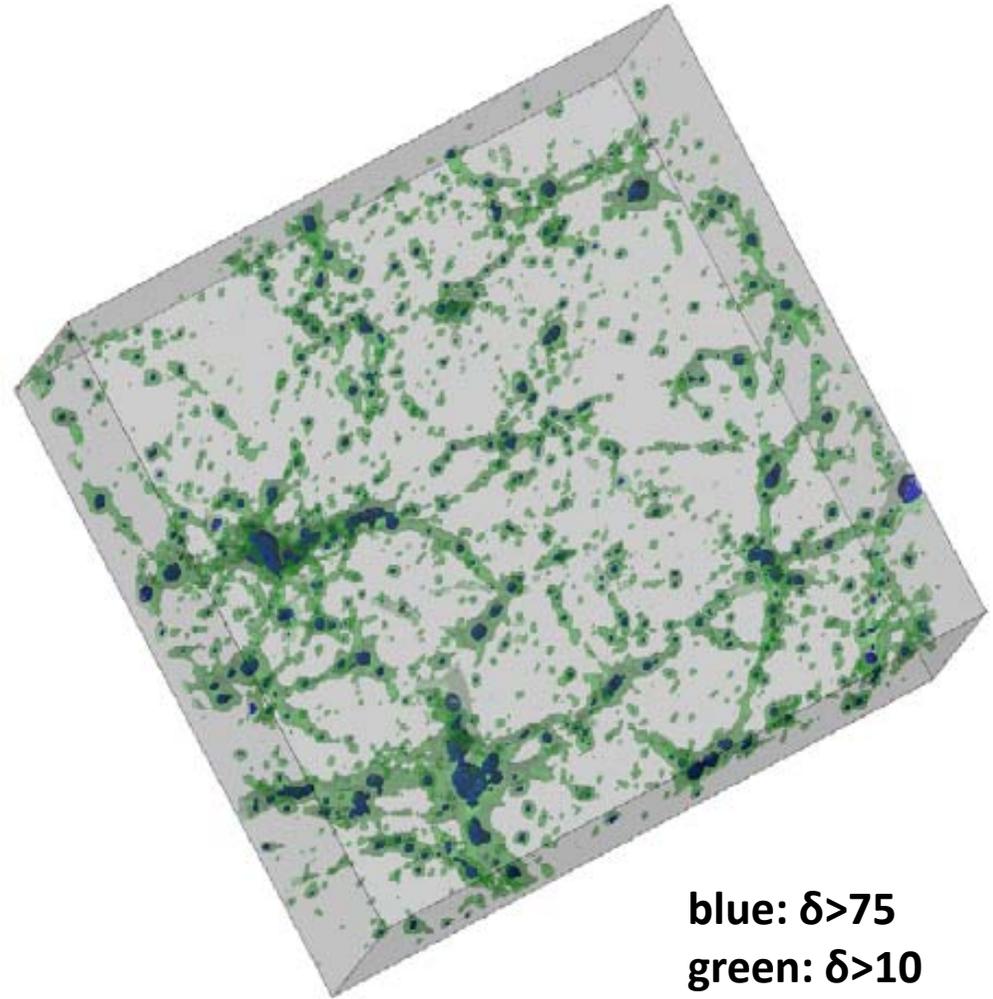
• Suzaku 0.4-60 keV & Chandra (Ota+08)

$$\rightarrow kT_{\text{excess}} = 25.3^{+6.1}_{-4.5} \text{ keV}$$

Extra success:
宇宙の未知成分

Warm Hot Intergalactic Medium

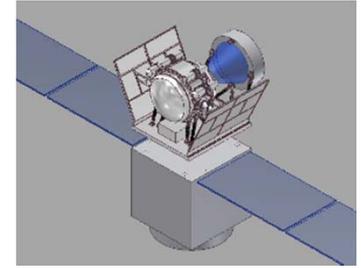
1. 現在観測されるバリオンの
の総和 $\ll \Omega_B$
→大量の **Missing Baryon**
(Fukugita et al. 1998)
 2. 理論予言:
 $kT=10^5 \sim 10^7 K$ 、 $\delta=10 \sim 1000$
の希薄銀河間ガス **WHIM**
(e.g., Cen & Ostriker 1999)
- ⇒ **軟X線** ($E < keV$) での広域探査
OVII, OVIII, NeIX,,,
(UVよりも高温成分、
光電離などへの依存性小)



blue: $\delta > 75$
green: $\delta > 10$

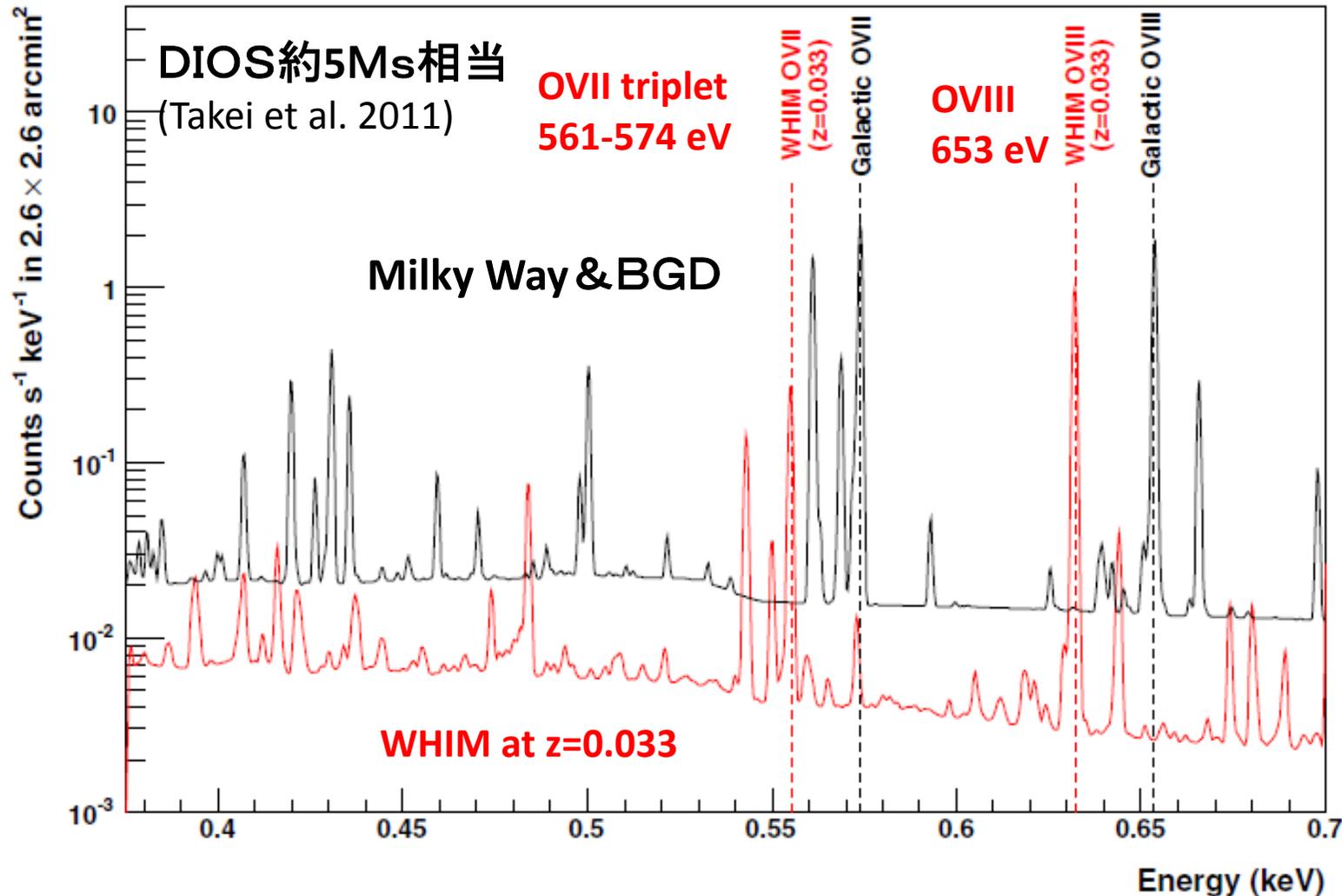
Simulated distribution of WHIM
1辺 70Mpc=5.5度 @ $z=0.2$
(Takei et al. 2011)

Mock WHIM spectrum (DIOS)



DIOS
 $\Delta E=2\text{eV}$
FOV=1 deg

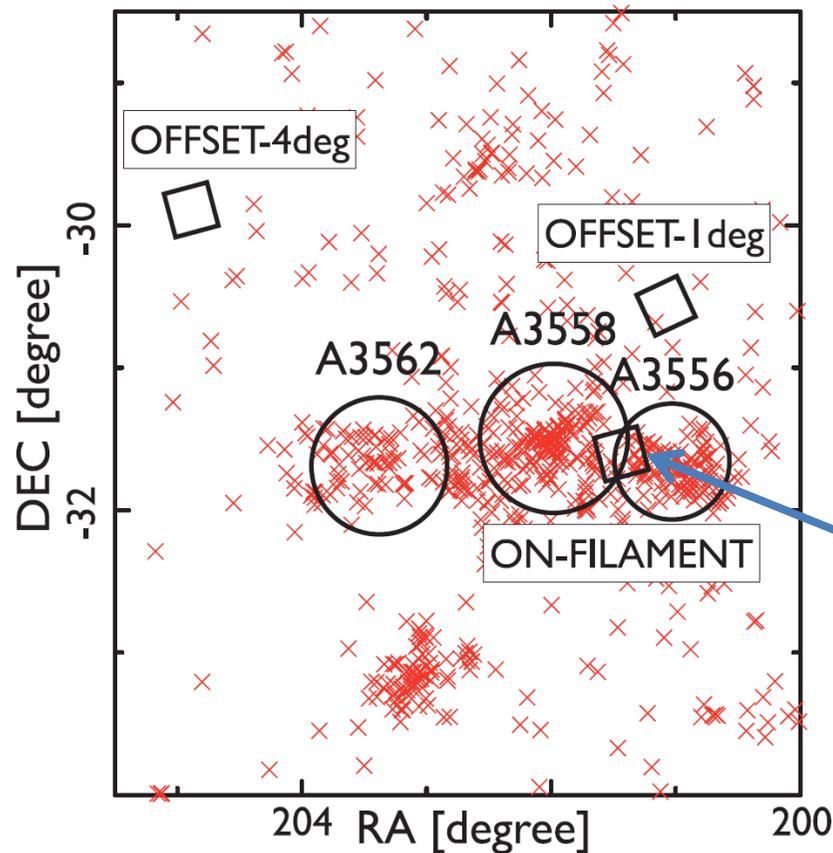
ASTRO-H
の次？



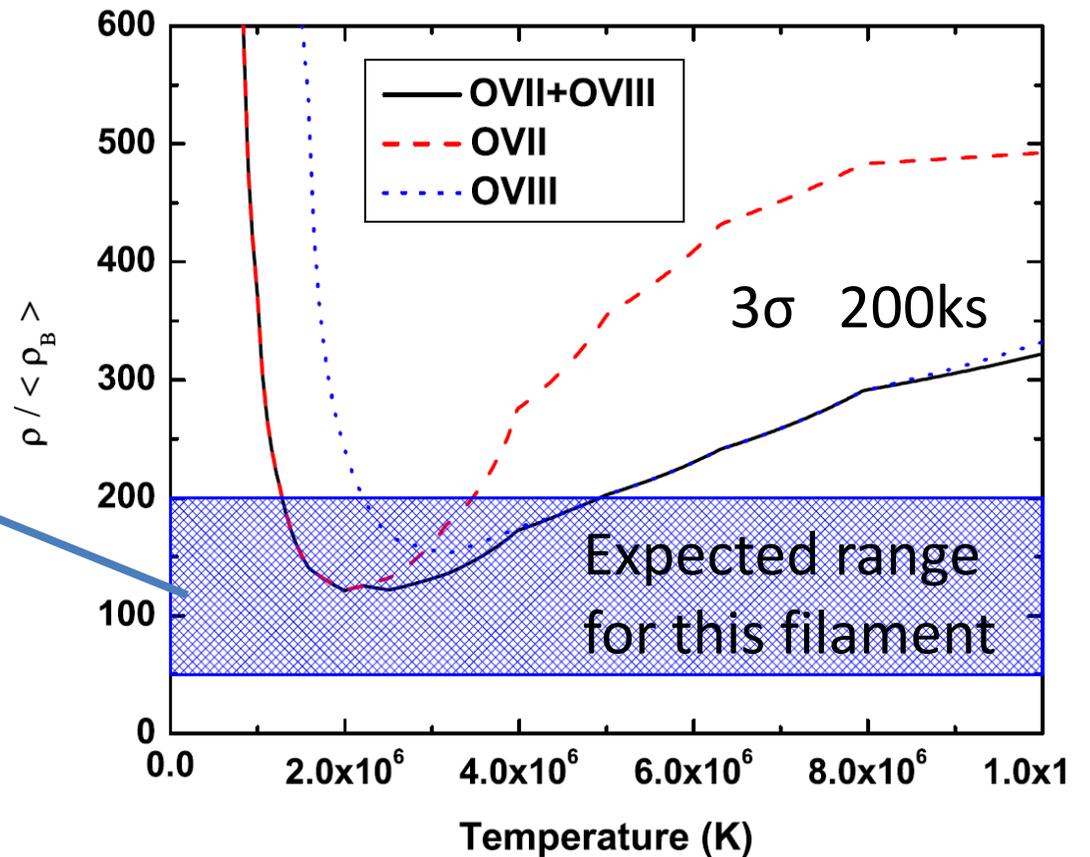
赤方偏移されたOVIIとOVIII放射により、銀河成分から分離
輝線比から温度も測定可 ($T > 10^6$ K)

ASTRO-Hは、この手法を初めて実施・検証できる(銀河団外縁部等)

Expected limits by ASTRO-H



Shapley supercluster at $z=0.048$
(Mitsuishi+2012)



ASTRO-H can resolve OVII/OVIII emission lines for the first time;

✂ Limits on δ scale as
 $(Z/0.3\text{solar})^{-1/2}(L/3\text{Mpc})^{-1/2}$

ダークマター探査

1. 素粒子実験、 γ 線いずれも未検出。

2. Robust bounds:

a) If **fermion**,

位相空間密度 (dSph) < 縮退分布 $\rightarrow m_{\text{DM}} > 0.4 \text{ keV}$

(Tremine & Gunn 79; Boyarsky+09)

b) If **velocity \sim thermal**,

free-streaming < galaxy scale $\rightarrow m_{\text{DM}} > O(\text{keV}), \text{ WDM}$

質量が大きすぎるとCDMの諸問題 (substructureなど) へのメリットなし

\Rightarrow いずれも、最も軽いDM候補の質量は**X線領域**に。

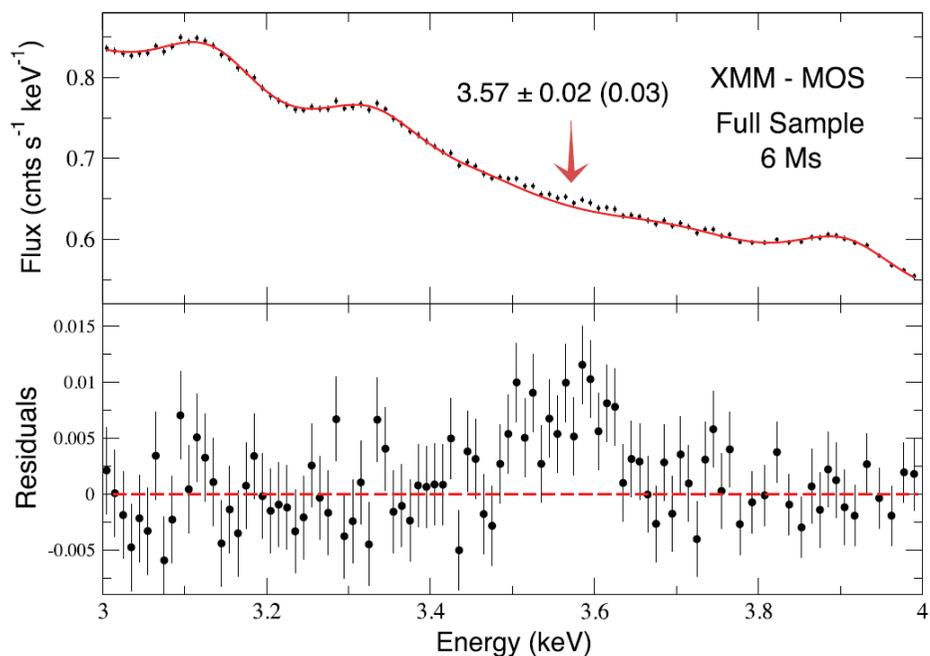
寿命 \gg 宇宙年齢で良い。

$$F_X \sim 3 \times 10^{-14} \text{ erg/s/cm}^2 \left(\frac{\Gamma}{(10^{20} \text{ yr})^{-1}} \right) \left(\frac{E_\gamma}{mc^2/2} \right) \left(\frac{M_{\text{DM}}^{\text{FOV}}}{10^{10} M_\odot} \right) \left(\frac{D_L}{\text{Mpc}} \right)^{-2}$$

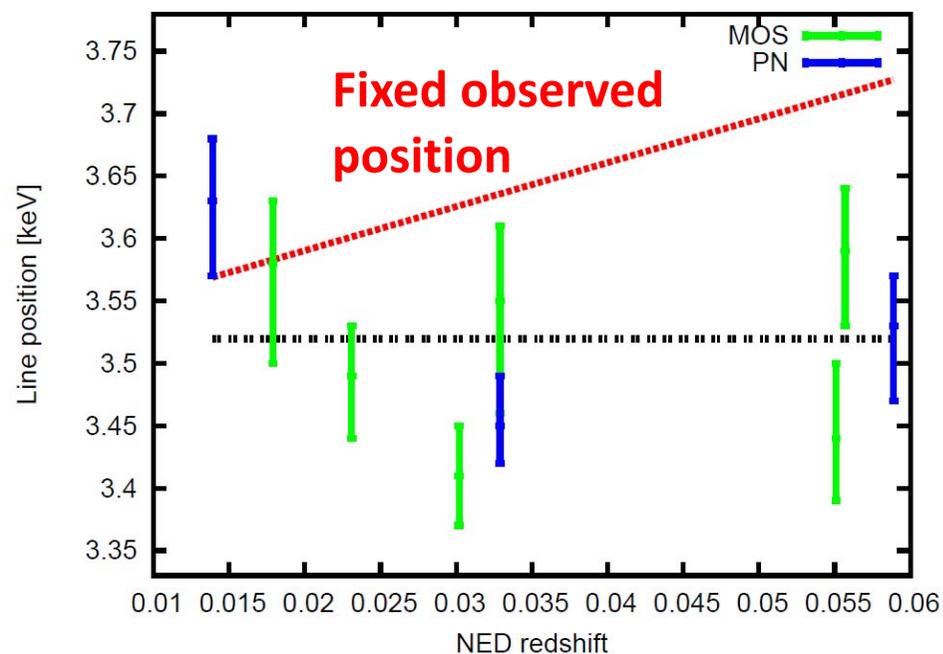
Decay rate = 1/lifetime

DM Surface density

未同定輝線@3.5keV ?

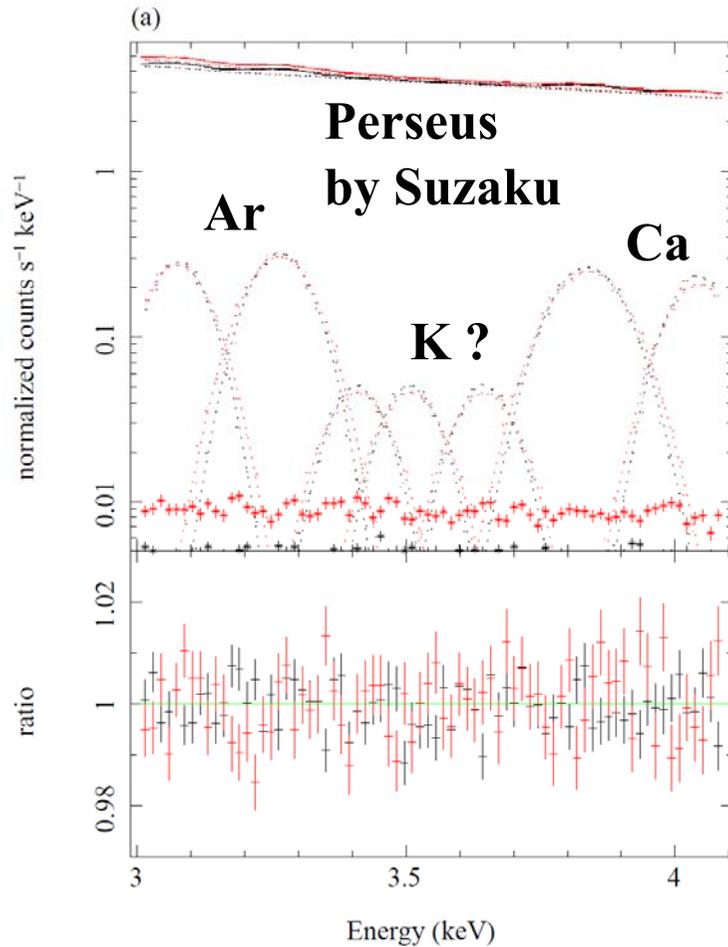


Bulbul et al. (2014)
~3 σ at E~3.55keV
by stacking 73 clusters
CCD, $\Delta E \sim 100\text{eV}$

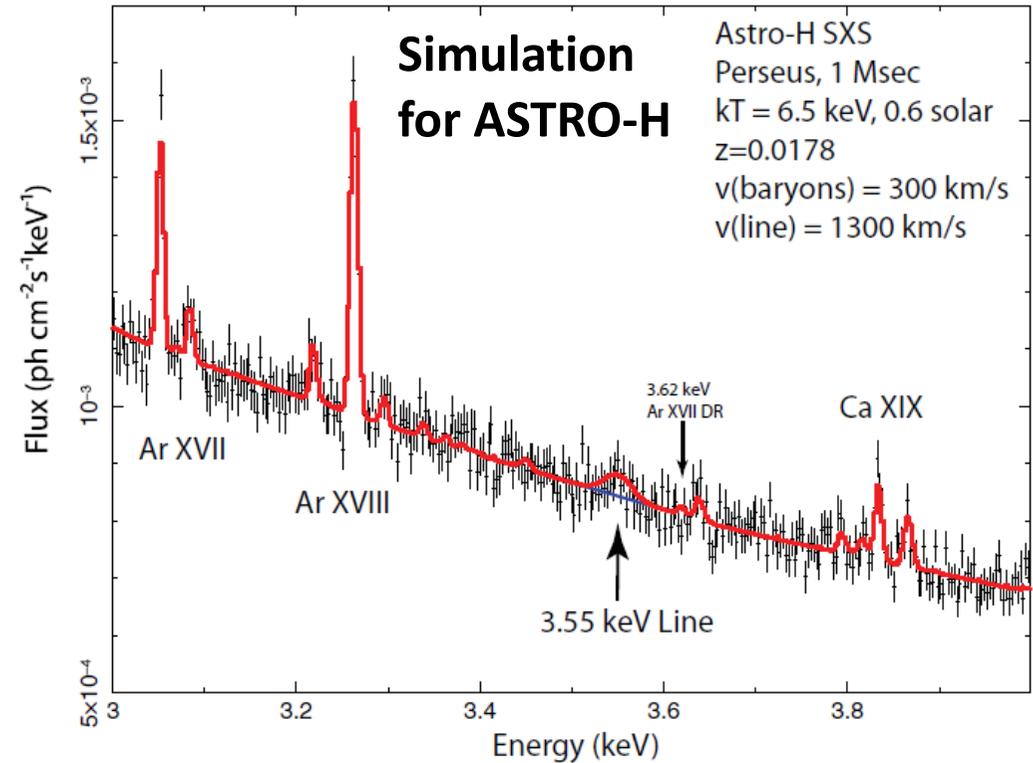


Bulbul et al. (2015)
>2 σ 以上の示唆のある
銀河団における
rest-frame line position

いかにDMを同定/棄却するか？



Tamura et al. (2014)
 連続成分を含むモデリングに敏感
 予想外の重元素起源かもしれない



ASTRO-H で初めて分離可能

DM線の幅: 速度分散

⇔ガス輝線: 熱運動 $\propto (m_{ion})^{-1/2}$ & 乱流

DM線の位置: z に依存

⇔検出器効果: z によらない

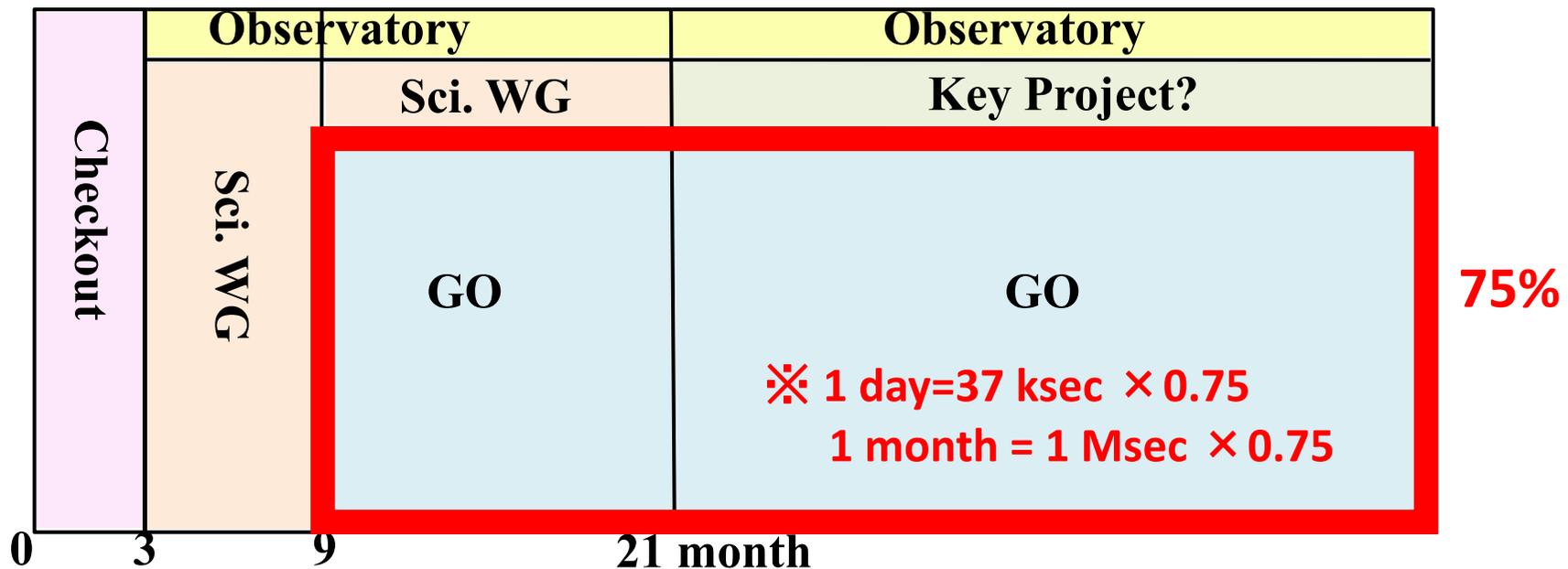
i.e., $\Delta z < 0.01 \rightarrow \Delta E < 10eV (E/keV)$

ASTRO-H Operation Schedule



- Phase 0 : 3 Months : Satellite/Instruments Check out (including Calibration))**
- Phase 1 : 6 Months : SWG 90 % (PV Phase) Observatory 10 %**
- Phase 2 : 12 Months : SWG Carry Over 15 %, GO 75 %, Observatory 10 %**
- Phase 3 : Rest of the mission : KeyProject 15 % (TBD) , GO 75 %, Observatory 10 %**

Observatory 10 % = Calibration + T00 + Director's Time



Data policy among J/Europe/US in the GO time, would be similar to the Suzaku case. But we are planning to introduce key-project type and/or early-data-released type observations from early phase of the mission.

まとめ

1. ASTRO-H (2015年度打ち上げ) カロリメータ($\Delta E < 7$ eV) は、銀河団ガスによる輝線放射を初めて波長分解可能
2. 期待される速度測定精度: $\Delta V \sim 100$ km/s (90%).
i.e., バルク運動: 音速の $\sim 10\%$
乱流: 熱的圧力の $\sim 1\%$
ただし、 $\sim r_{2500}$ at $z < 0.1$ (光子統計と空間分解能による制約)
より遠方や外縁部は、次世代衛星(Athena)に期待
3. ガス温度、電離状態、重元素量、などの精度向上
& ダークバリオン(DIOSへの先鞭)、ダークマター探査
4. 硬X線($E > 10$ keV,) と広視野CCD (FOV=35') による同時観測
5. 観測時間の大半は、公募制