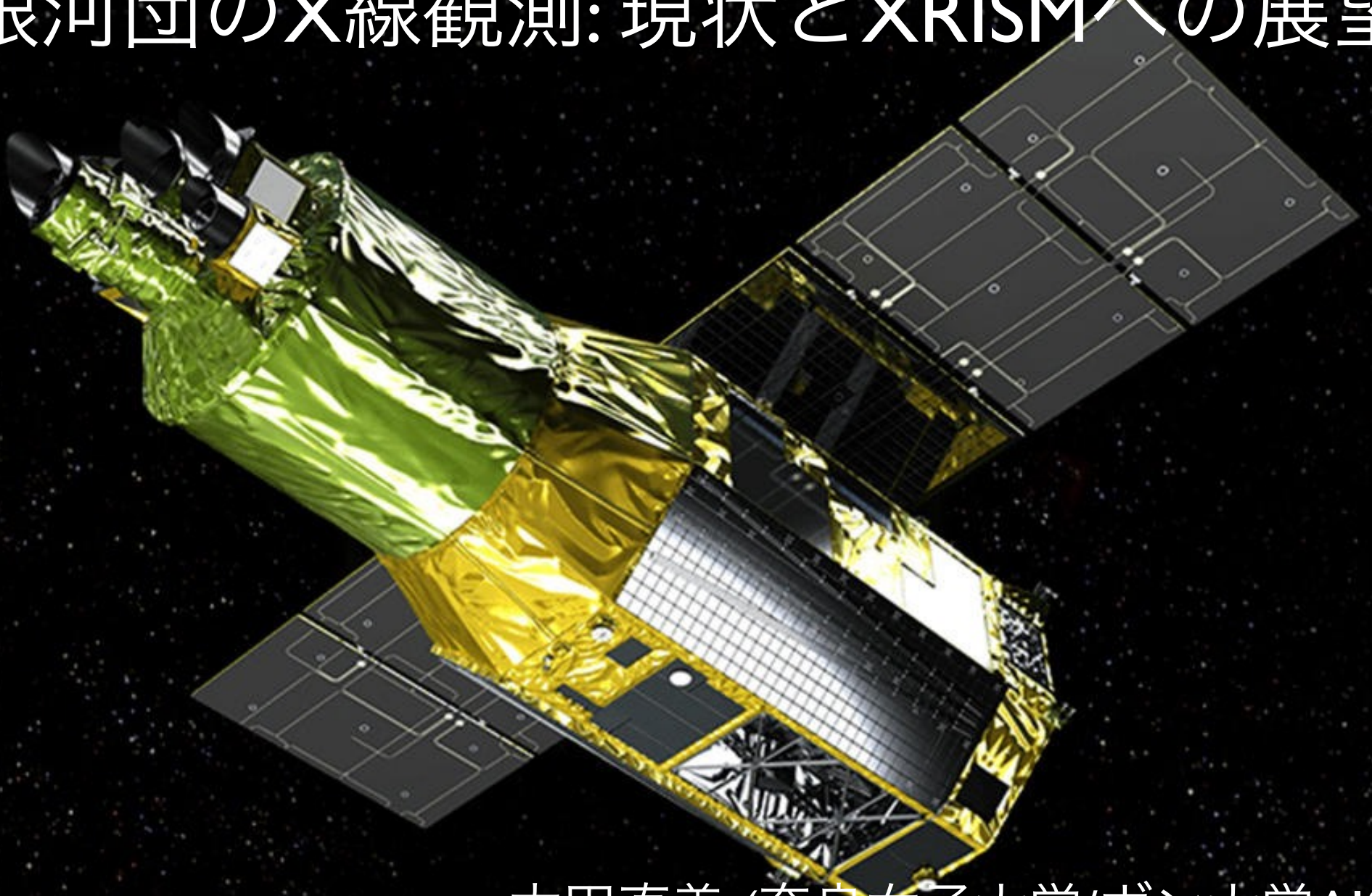


銀河団のX線観測: 現状とXRISMへの展望



©JAXA

太田直美 (奈良女子大学/ボン大学AIfA)

Agenda

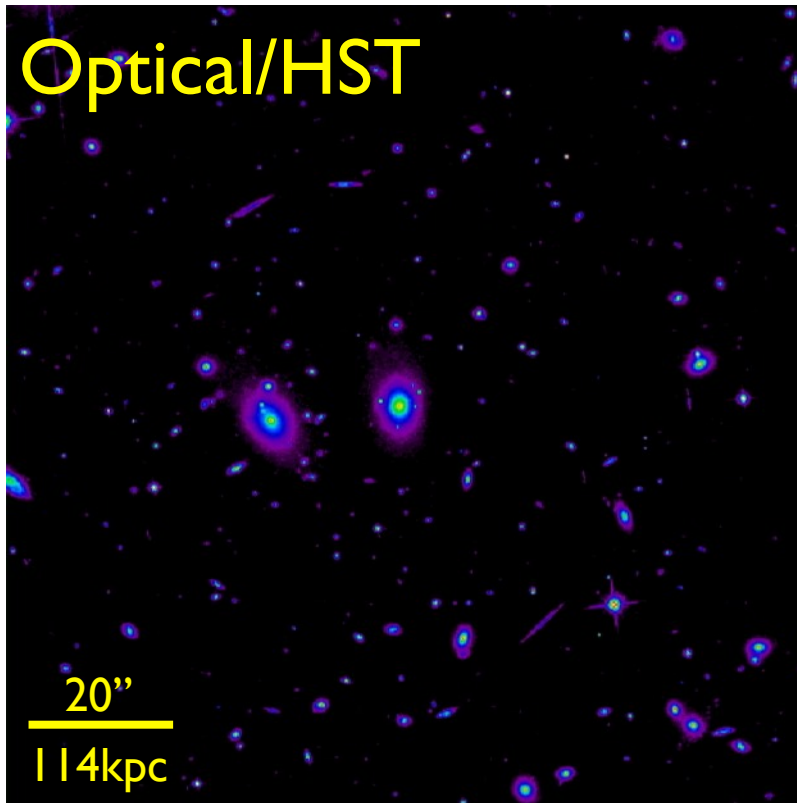
1. イントロダクション
2. 銀河団進化と非熱的現象
 - ガス運動の探査
3. ひとみ衛星によるペルセウス座銀河団の観測
4. XRISM衛星の概要と展望
5. まとめ

I. Introduction

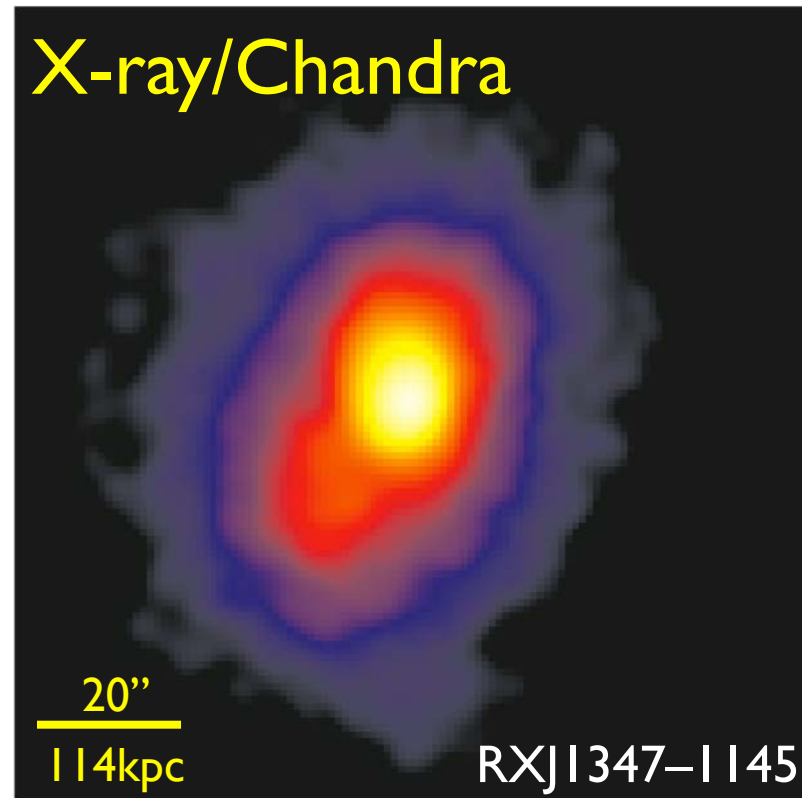


銀河団とは

- メンバー銀河



- 高温ガス: $T \sim 10^7 - 8 \text{ K}$



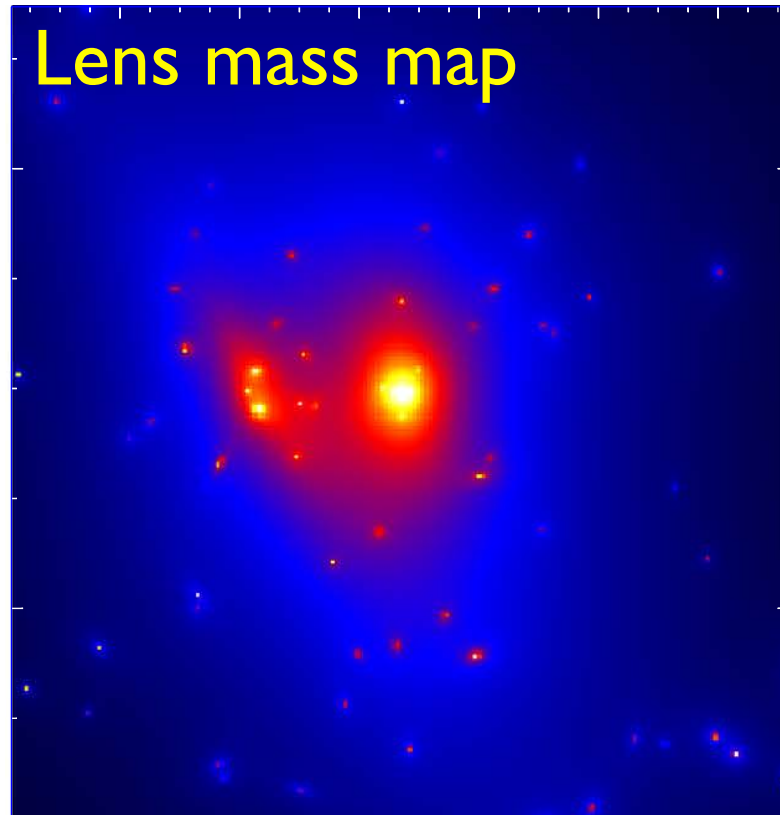
- 銀河団は衝突合体や周囲からの質量降着で成長
 - 総質量 $\sim 10^{14-15} M_{\odot}$, うちダークマターが約85%
 - 重力ポテンシャルに拘束された高温ガスはX線を放射
- X線はガスの物理状態や宇宙構造形成のトレーサー

I. Introduction

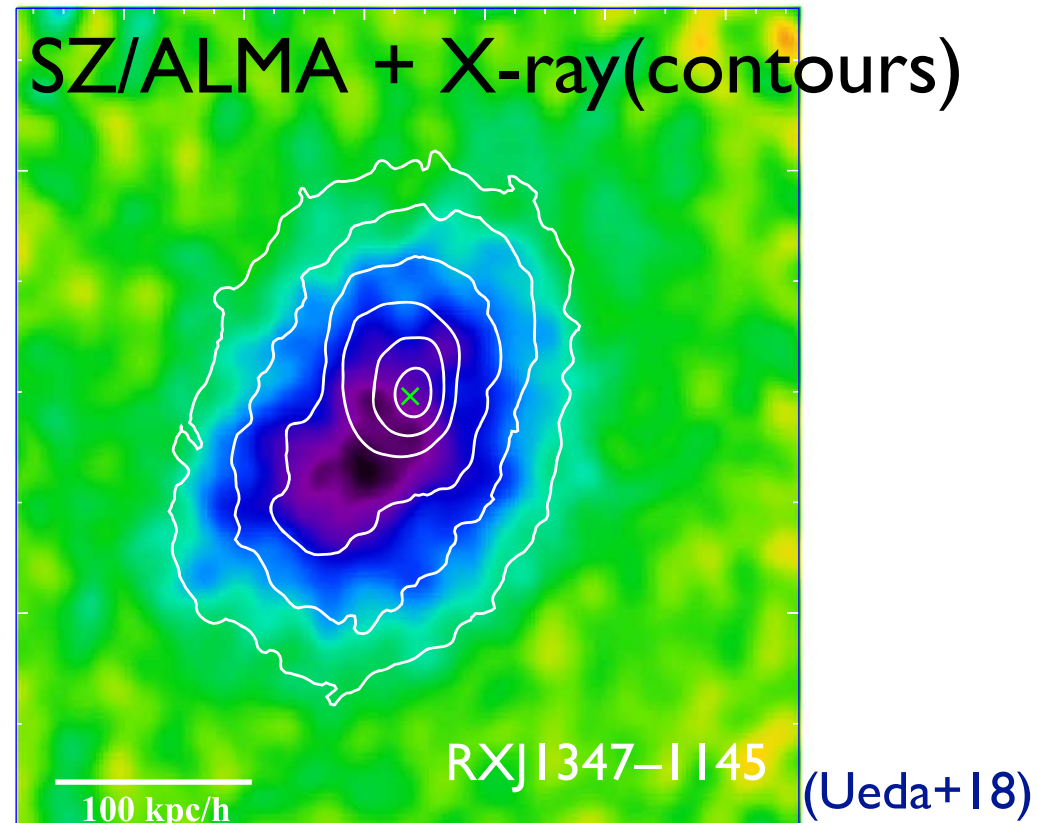


銀河団とは

- ダークマター



- 高温ガス: $T \sim 10^7 - 8 \text{ K}$



- 銀河団は衝突合体や周囲からの質量降着で成長
 - 総質量 $\sim 10^{14-15} M_{\odot}$, うちダークマターが約85%
 - 重力ポテンシャルに拘束された高温ガスはX線を放射
- X線はガスの物理状態や宇宙構造形成のトレーサー

銀河団は巨大な実験室

物理プロセス

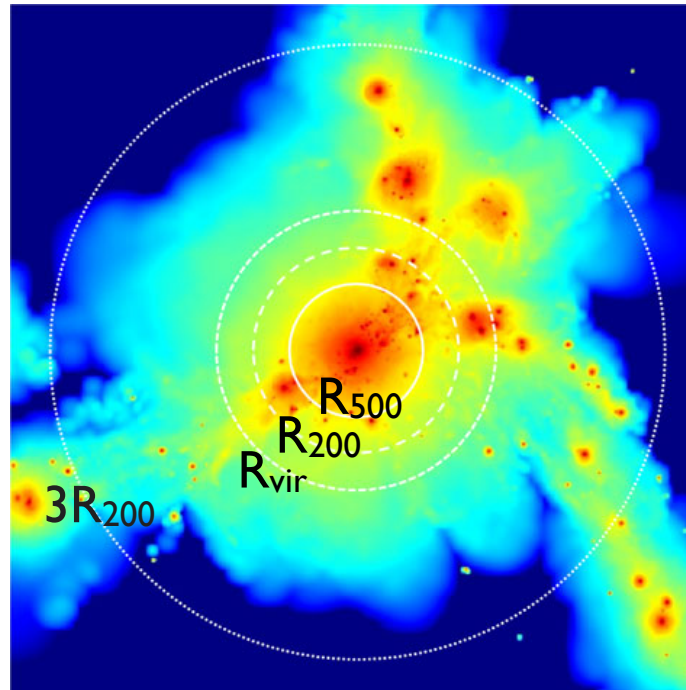
- AGN feedback
- Heating and cooling
- Mergers
- Bulk and turbulent motions, particle acceleration, magnetic fields
- Chemical enrichment
- ...

質量構造

- Intracluster gas
- Dark matter
- WHIM
- ...

宇宙論応用

- Mass function
- Gas-mass fraction
- ...



Simulated X-ray cluster
(Roncarelli+06)

Major astrophysical questions (Nandra+13)

- *How do baryons in groups and clusters accrete and dynamically evolve in the dark matter haloes?*
- *What drives the chemical and thermodynamic evolution of the Universe's largest structures?*
- *What is the interplay of galaxy, SMBH, and intergalactic gas evolution in groups and clusters?*
- *Where are the missing baryons at low redshift and what is their physical state?*

For review, Böhringer+10; Allen+11; McNamara+12; Reiprich+13; Pratt+19 and many

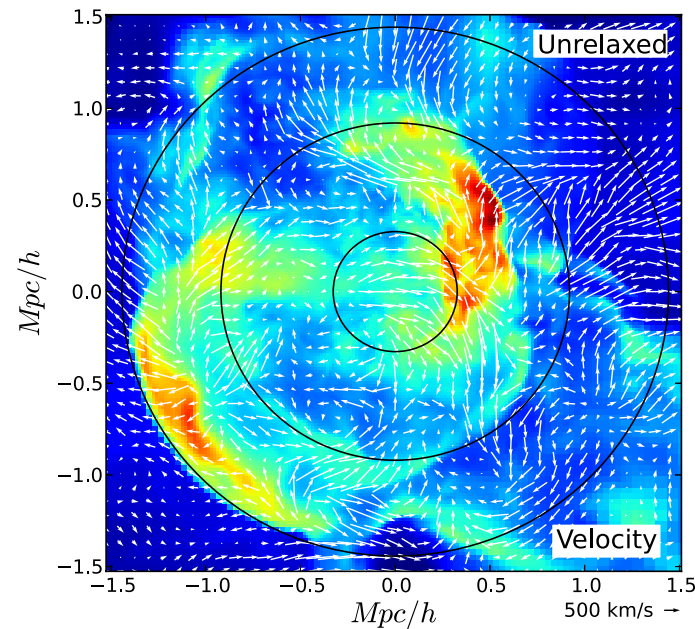
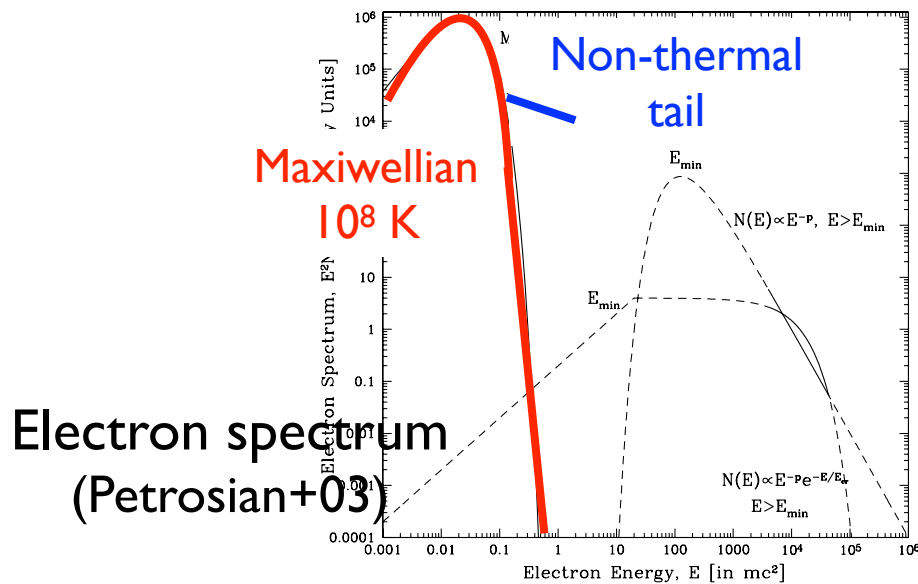
2. 銀河団進化と非熱的現象

銀河団衝突はビッグバン以降の宇宙で最大エネルギーの現象

kinetic energy $\sim 10^{64}$ erg

ガスの加熱
粒子加速

ガスバルク運動
乱流



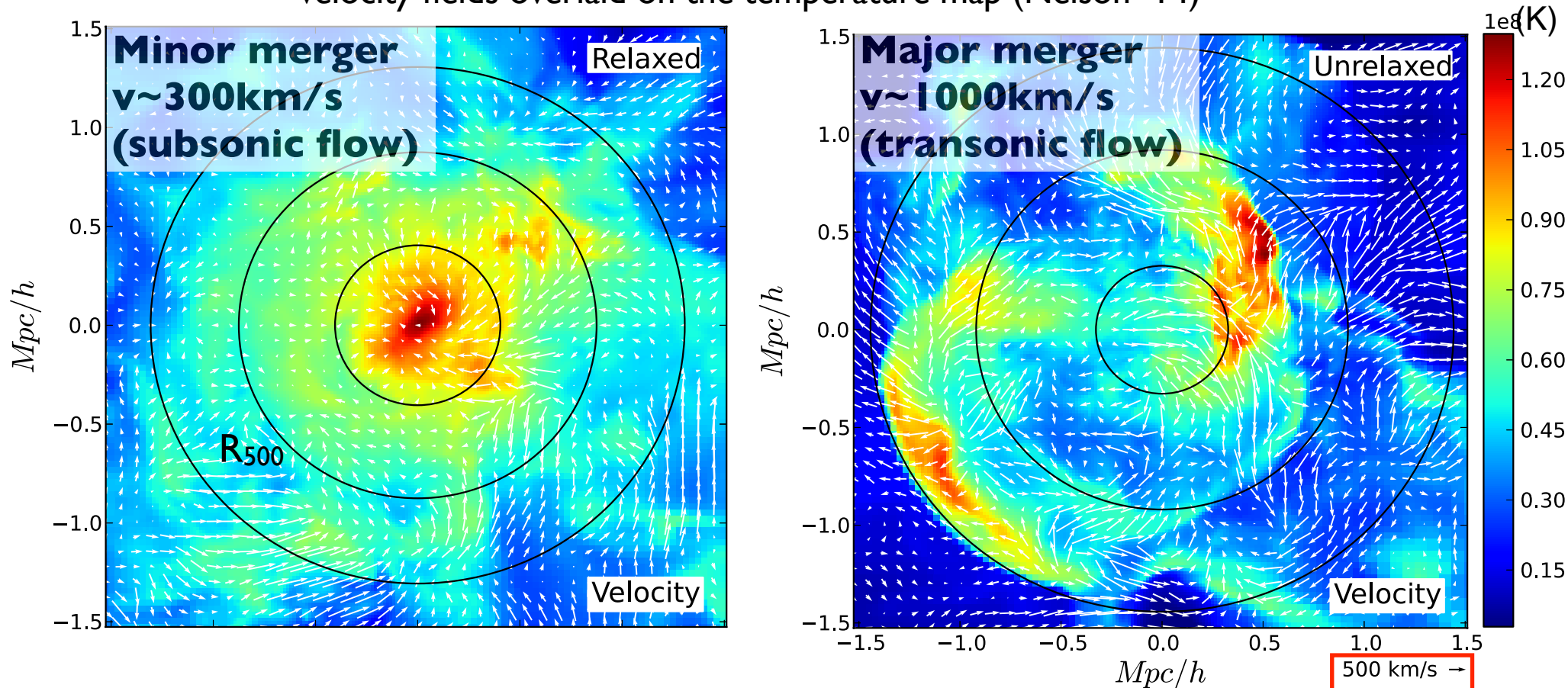
非熱的現象の研究は、銀河団進化や質量構造の理解にとって重要

See also Ota 12

ガス運動の探査

衝突合体で引き起こされるガスの速度場

Velocity fields overlaid on the temperature map (Nelson+14)



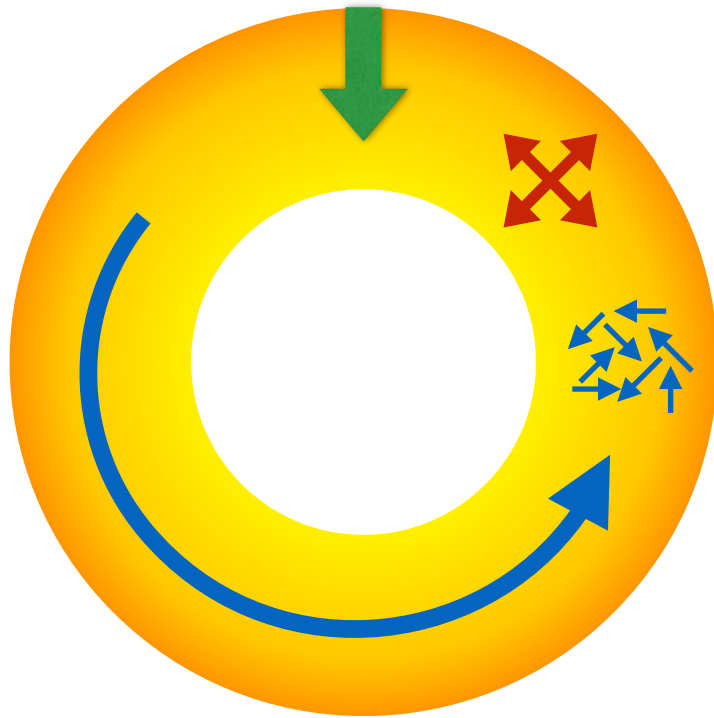
- 流体計算から大規模で複雑なガス運動が生まれると予言
→ 非熱的圧力が静水圧条件の質量推定において5–35%も効く (Nagai+07)

(See also e.g., Norman & Bryan 99; Dolag+05; Rasia+06; Vazza+09; Suto+13; Lau+13)



Hydrostatic cluster mass bias

$$M(< r) = \frac{-r^2}{G\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial \rho \langle v \rangle^2}{\partial r} + \frac{\partial \rho \sigma^2}{\partial r} \right)$$



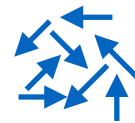
Measuring both bulk and random gas velocities recovers the total cluster mass



Gravity $\frac{GM(< r)}{r}$



Thermal Pressure P



Random gas motion σ
(Turbulence)



Bulk gas motion $\langle v \rangle$

Lau, Nagai, Nelson+13

輝線分光によるガス運動測定

1. 輝線シフト

• バルク運動

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{bulk}} &= E_0 v_{\text{bulk}}/c \\ &= 6.7\text{eV} (v_{\text{bulk}}/300 \text{ kms}^{-1}) \text{ for } 6.7\text{keV}\end{aligned}$$

2. 輝線ブロードニング

• 乱流運動

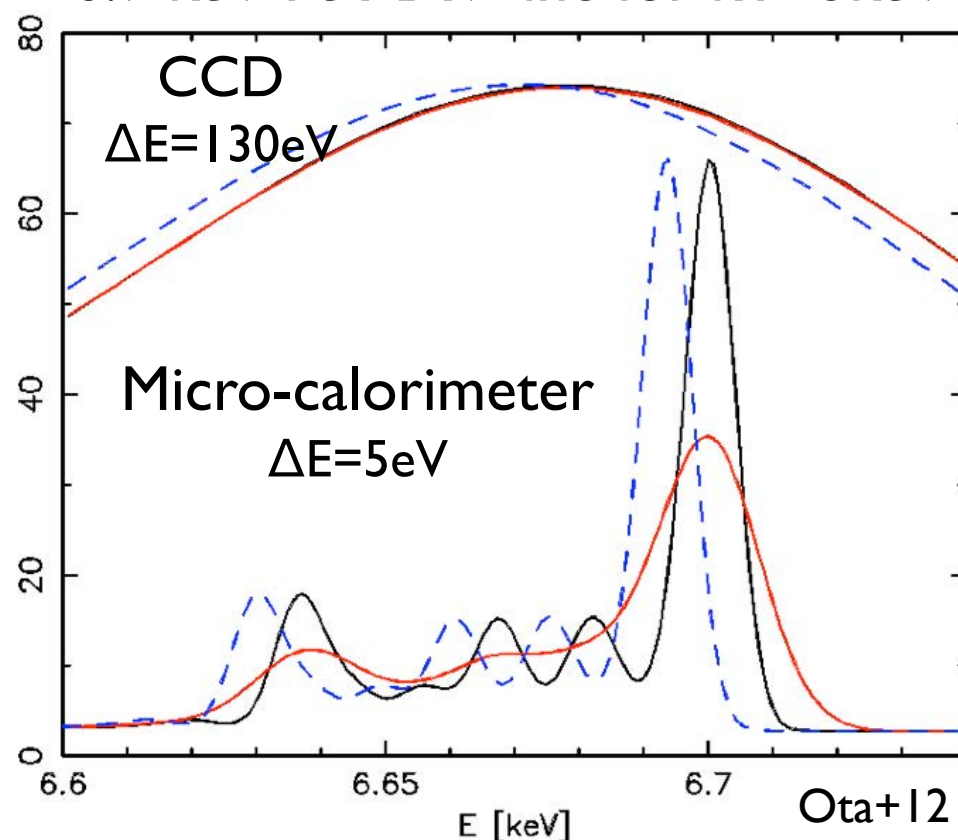
$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{turb}} &= E_0 \sigma_{\text{turb}}/c \\ &= 6.7\text{eV} (\sigma_{\text{turb}}/300 \text{ kms}^{-1}) \text{ for } 6.7\text{keV}\end{aligned}$$

• 熱運動

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{th}} &= E_0 (kT/m)^{1/2} / c \\ &= 3\text{eV} (kT/5 \text{ keV})^{1/2} \text{ for } 6.7\text{keV}\end{aligned}$$

m: atomic mass \uparrow $\Delta E_{\text{turb}}/\Delta E_{\text{th}} \uparrow$

6.7 keV Fe XXV line for kT=5keV



— Thermal
- - - Thermal + Bulk 300km/s
— Thermal + Turb. 300km/s

➡ 銀河団の速度診断にはFe-K輝線が最適

過去の銀河団ガス運動測定

X線CCDによるバルク運動測定*

relaxed
merging

- Suzaku/XIS
 - No detection in 12 clusters (Ota+07; Fujita+08; Sato+08; Sugawara+09; Sato+11; Nishino+12; Tamura+14; Ota & Yoshida 16)
 - Detection of $\Delta V \sim 1500 \text{ km s}^{-1}$ in A2256 (Tamura+11)
 - Marginal detection of $\Delta V \sim 200/1400/2100 \text{ km s}^{-1}$ in Perseus/A2029/A2255 (Tamura+14; Ota&Yoshida16)
- XMM/EPIC
 - Gas sloshing $\sim 480 \pm 210 \text{ km s}^{-1}$ in Perseus (Sanders+20)
 - Gas sloshing and AGN outflow in Virgo/Centaurus (Gatuzz+22a,22b)
- Chandra/ACIS (e.g., Dupke+06)
 - $\Delta V \sim 1400 \pm 300/4600 \pm 1100 \text{ km s}^{-1}$ in A2142/A115 (Liu+16)

Relaxed/merging両方にガス運動が存在することを示唆

→速度構造や非熱的圧力をより正確に測るにはカロリメータが必要

(*) 他にXMM/RGS乱流測定や間接測定 (共鳴散乱, 表面輝度ゆらぎ), 運動学的SZ効果など.

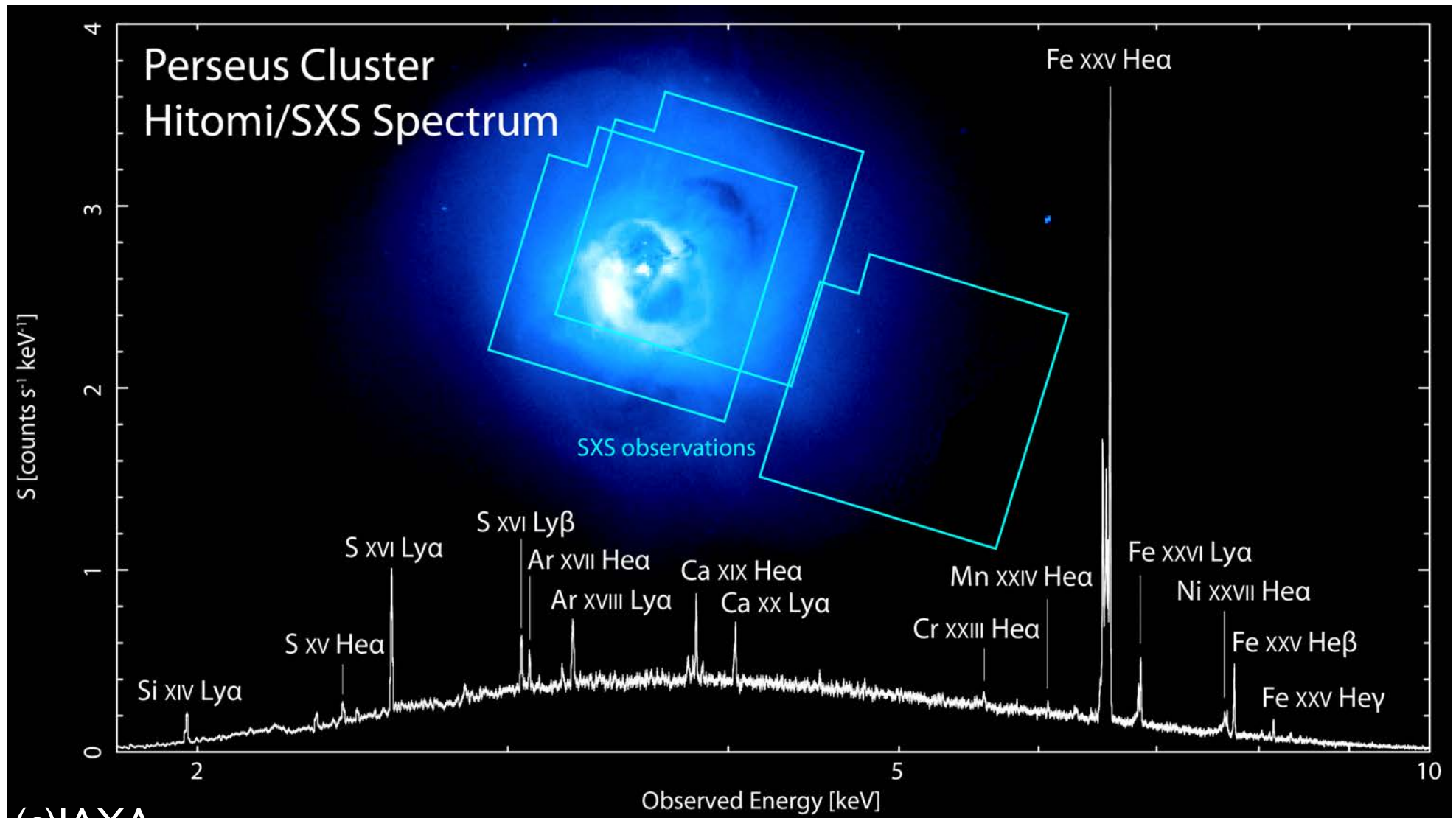
See also Sanders 23; Simionescu+19

3. 「ひとみ」衛星



ASTRO-H "Hitomi"
Launched on 17 Feb 2016

ひとみ衛星によるペルセウス座銀河団の観測



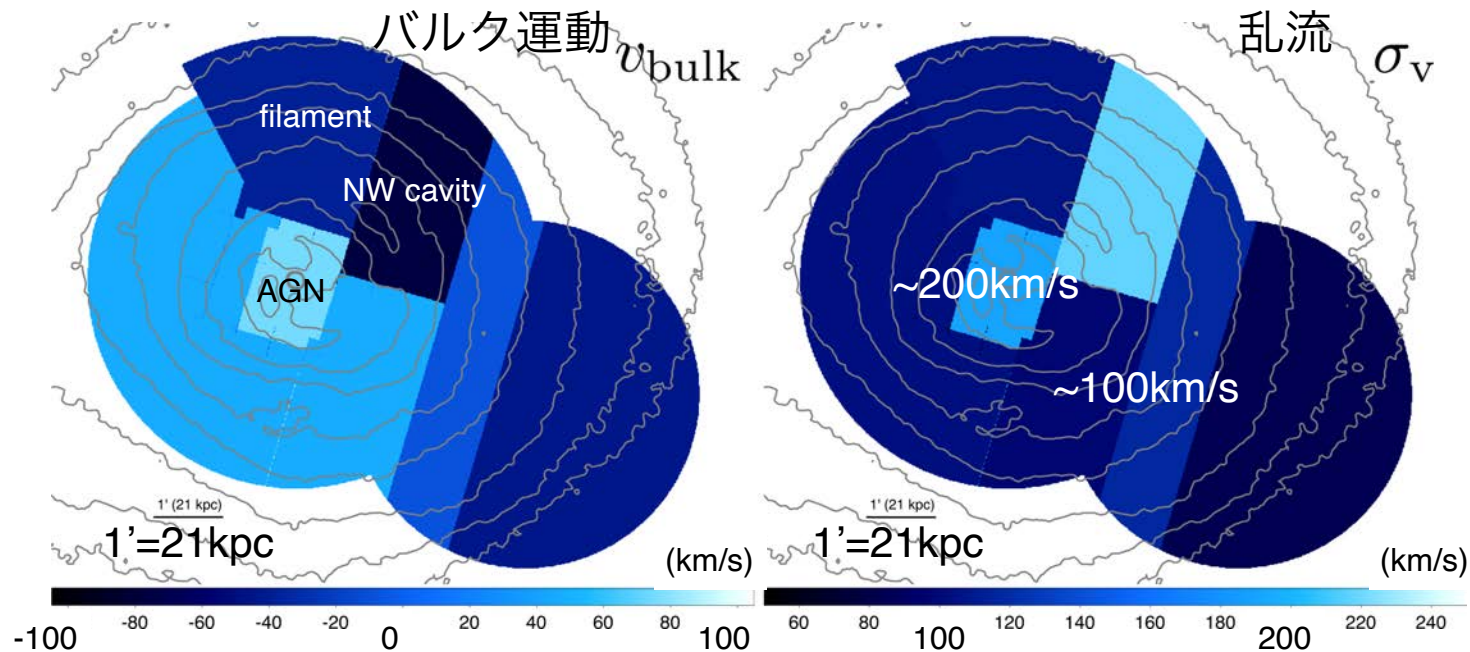
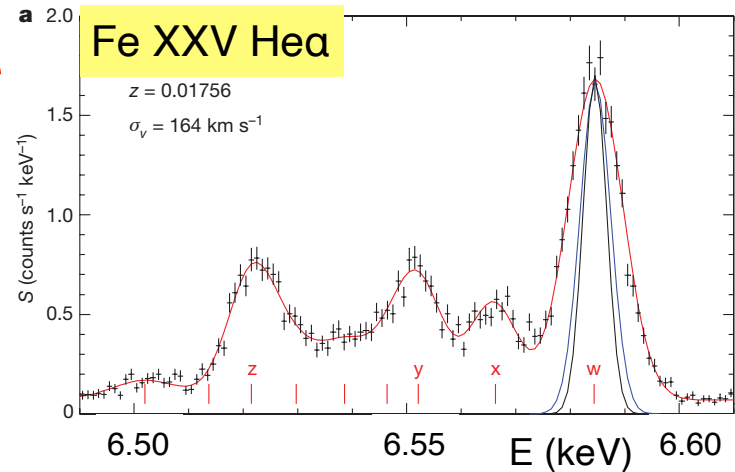
- Hitomi observed 6 celestial objects, including the Perseus cluster and SNRs
... to be continued by XRISM

ペルセウス座銀河団中心のガスダイナミクス

- 乱流速度は $164 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$ と小さい

↔ AGNのエネルギー注入とバブル形成

- 中心とキャビティで乱流速度大
- 速度勾配は $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$



コア領域の非熱的圧力の寄与は、熱的圧力の<10%と見積もられる

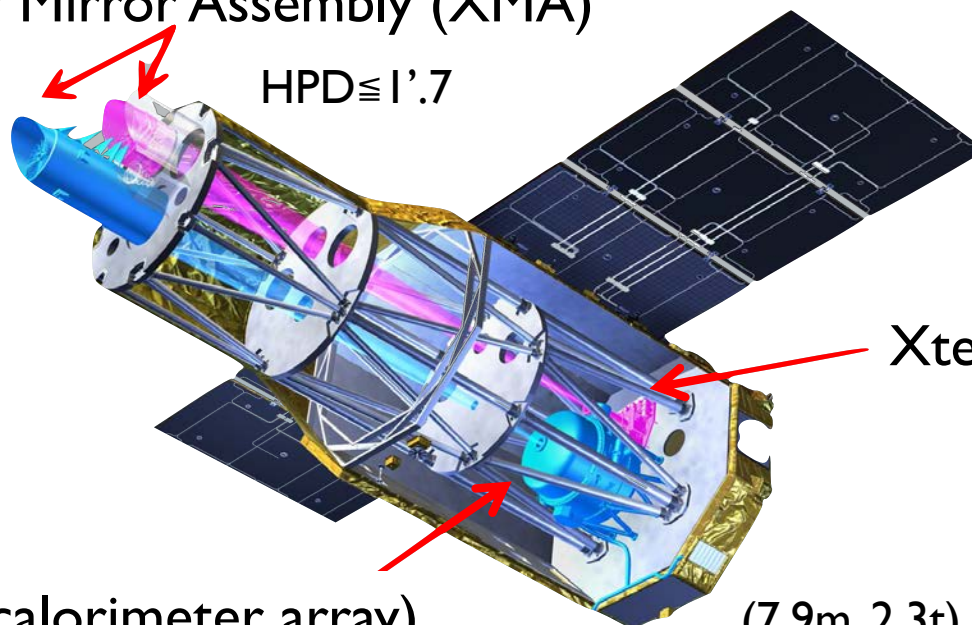
(Hitomi collaboration 2016; 2018)

4. XRISM衛星の概要と展望

XRISM X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission

X-ray Mirror Assembly (XMA)

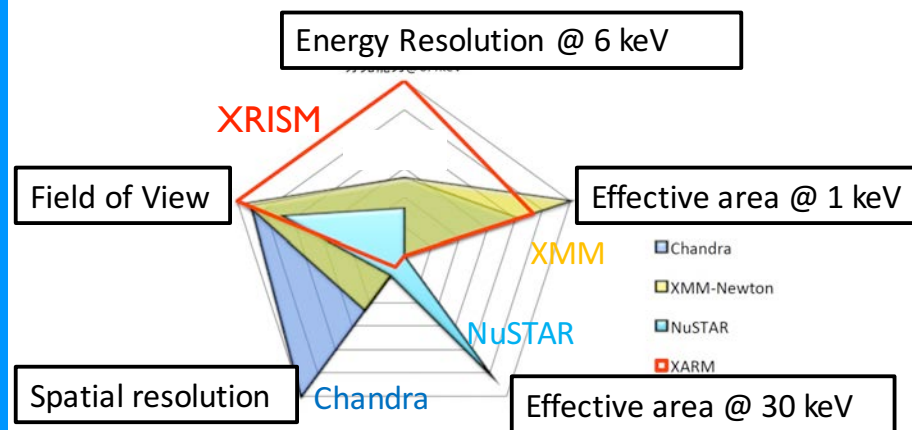
HPD $\leq 1'.7$



Xtend (X-ray CCD)

Resolve (μ -calorimeter array)

(7.9m, 2.3t)



| Instrument | FOV Pixel# | ΔE FWHM @6 keV | Band pass |
|--|--|--------------------------------|--------------|
| Resolve (XMA + X-ray μ -calorimeter) | 2.9' x 2.9' \square 6 x 6 pix | 7 eV (goal 5 eV) | 0.3 – 12 keV |
| Xtend (XMA + CCD) | 38' x 38' \square 1280 x 1280 pix | < 250 eV EOL (< 200 eV BOL) | 0.4 – 13 keV |

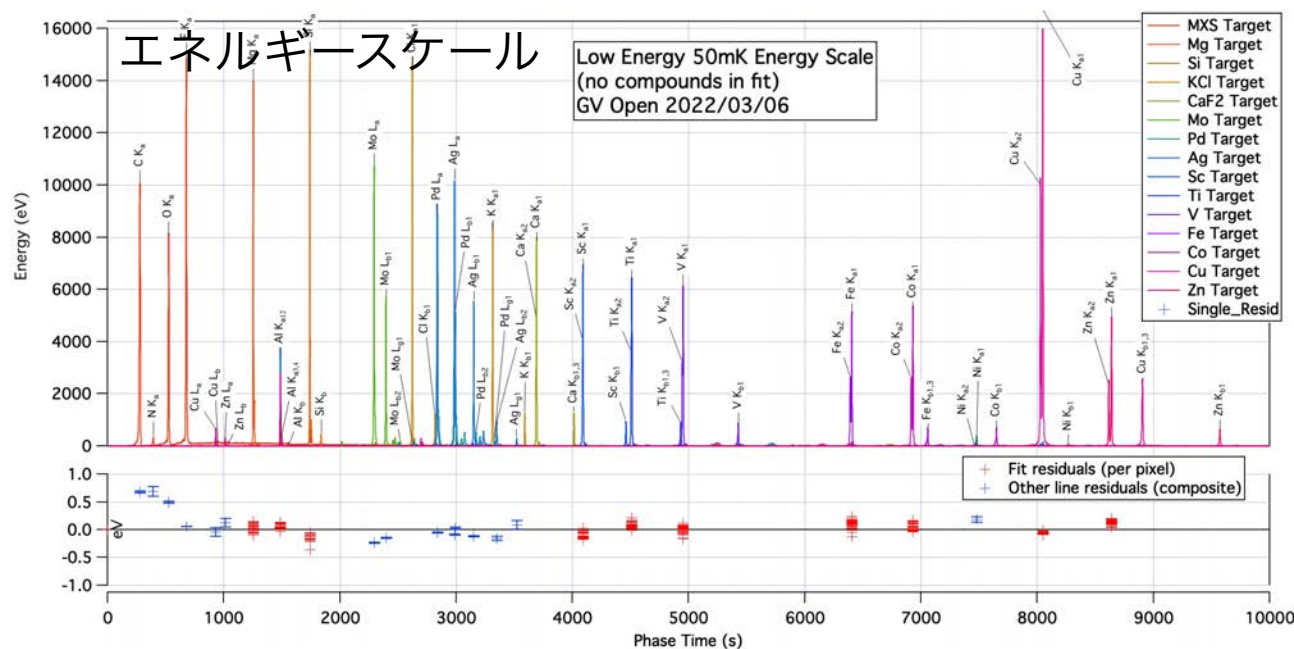
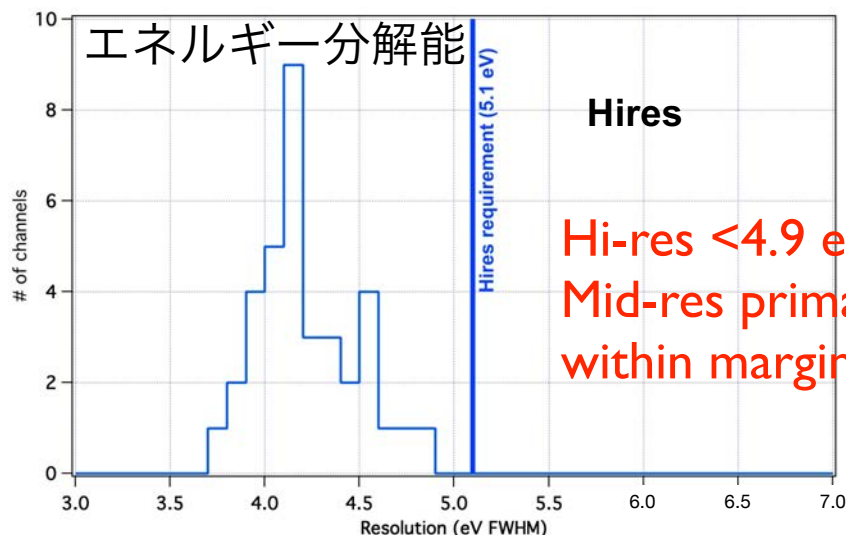
Tashiro et al. 2020; XRISM quick reference (arXiv:2202.05399)



Resolve status



(C) JAXA



Absolute energy scale accuracy < 2 eV in the 0.3–9 keV band



XRISM科学目標

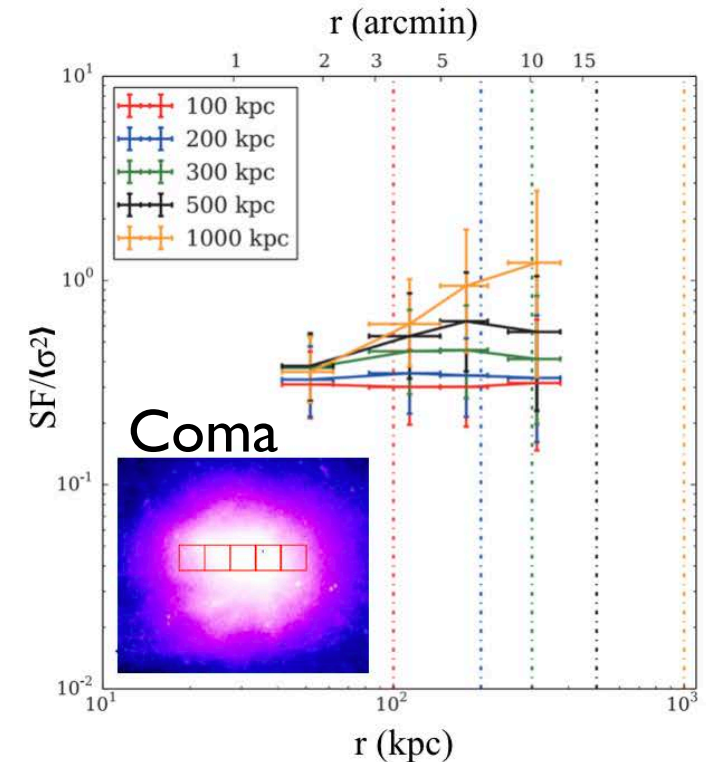
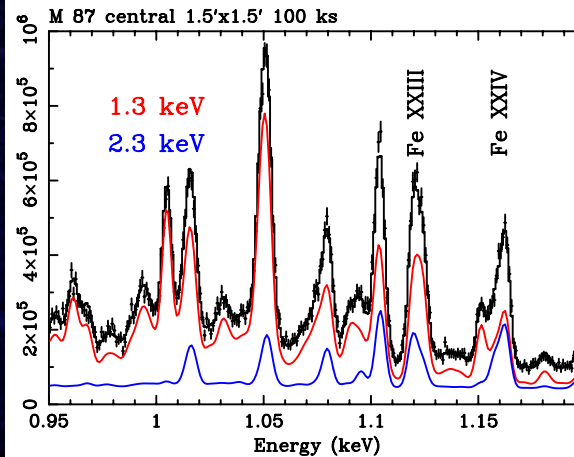
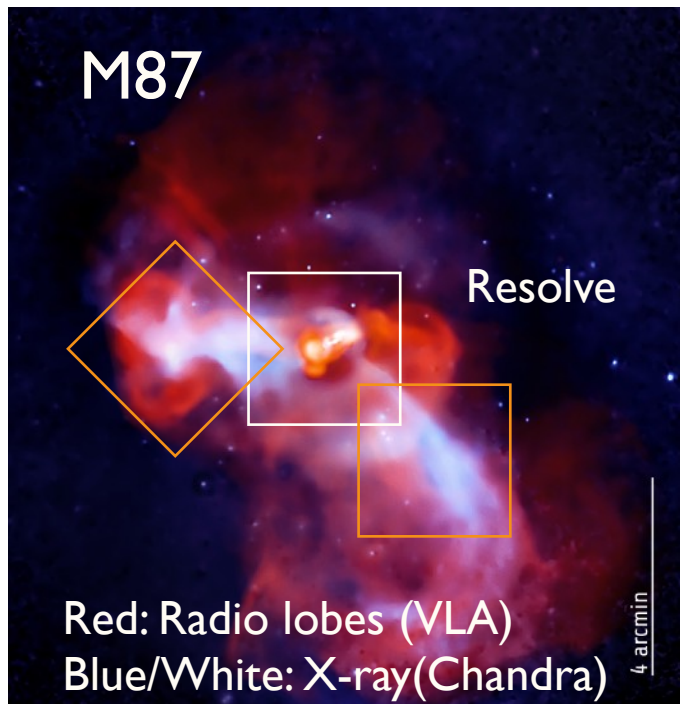
1. Revealing the structure formation of the Universe and evolution of galaxy clusters
2. Understanding the circulation history of baryonic matters in the Universe
3. Investigating the transport and circulation of energy in the Universe
4. Realizing the new science with high-resolution X-ray spectroscopy

| | | |
|---|---|---|
| <p>宇宙の謎 01</p> <p>銀河団の設計図</p> <p>力学的進化</p> <p>宇宙の大規模構造「銀河団」はどう やってできたか？</p>  <p>(C) JAXA</p> | <p>宇宙の謎 02</p> <p>宇宙のレシピ</p> <p>化学的進化</p> <p>宇宙の元素はどうやってつくれ、 流転してきたのか？</p>  | <p>宇宙の謎 03</p> <p>時空のはて</p> <p>ブラックホールのまわりでは何がお きているのか？</p>  |
|---|---|---|



Cluster science with XRISM

- AGN feedback
- Precise mass measurement and cluster cosmology
- Cluster mergers
- Chemical composition
- Missing baryons and WHIM
- New spectral features

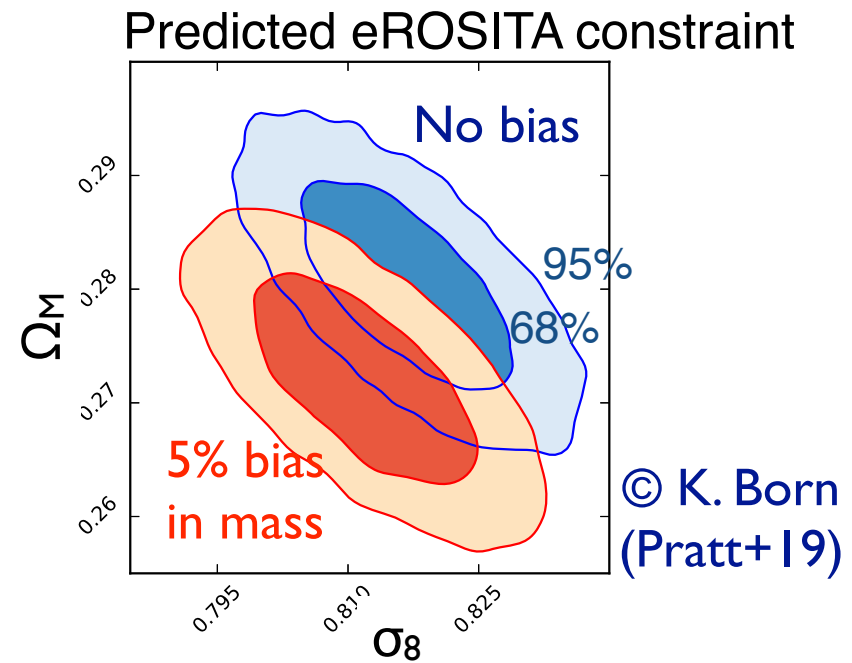
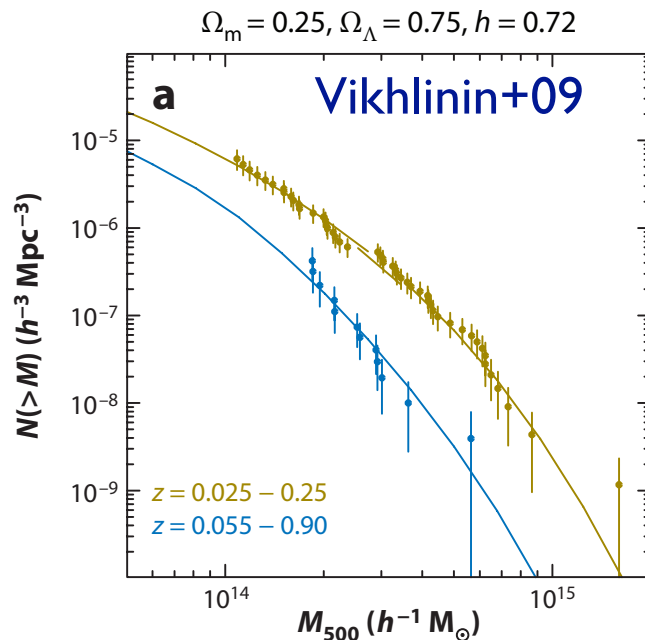


(例)銀河団ガス運動のXRISM模擬観測



Motivation

- 銀河団質量関数による宇宙論パラメータ決定 (Allen+11)
- eROSITAは5-10万個の銀河団検出(Merloni+12)、質量較正精度が鍵 (e.g., Wu+10)

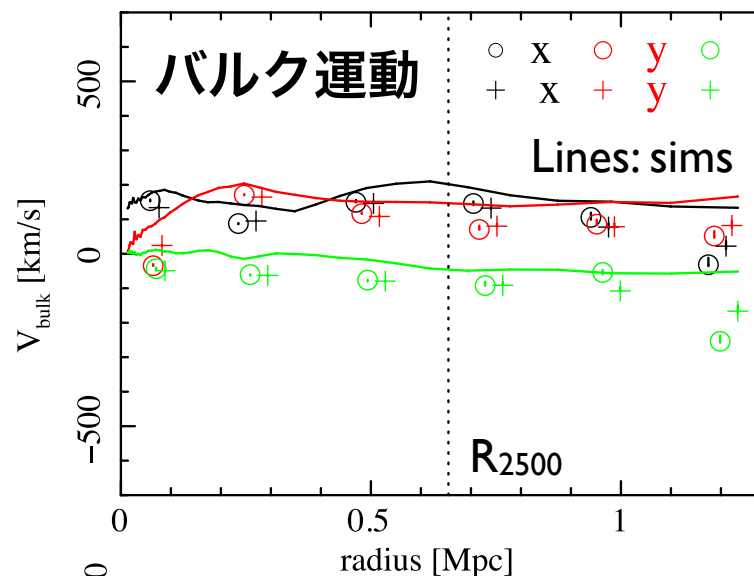
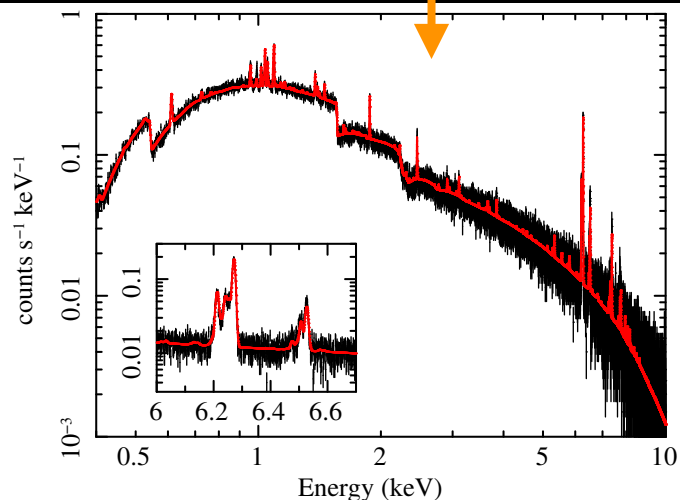
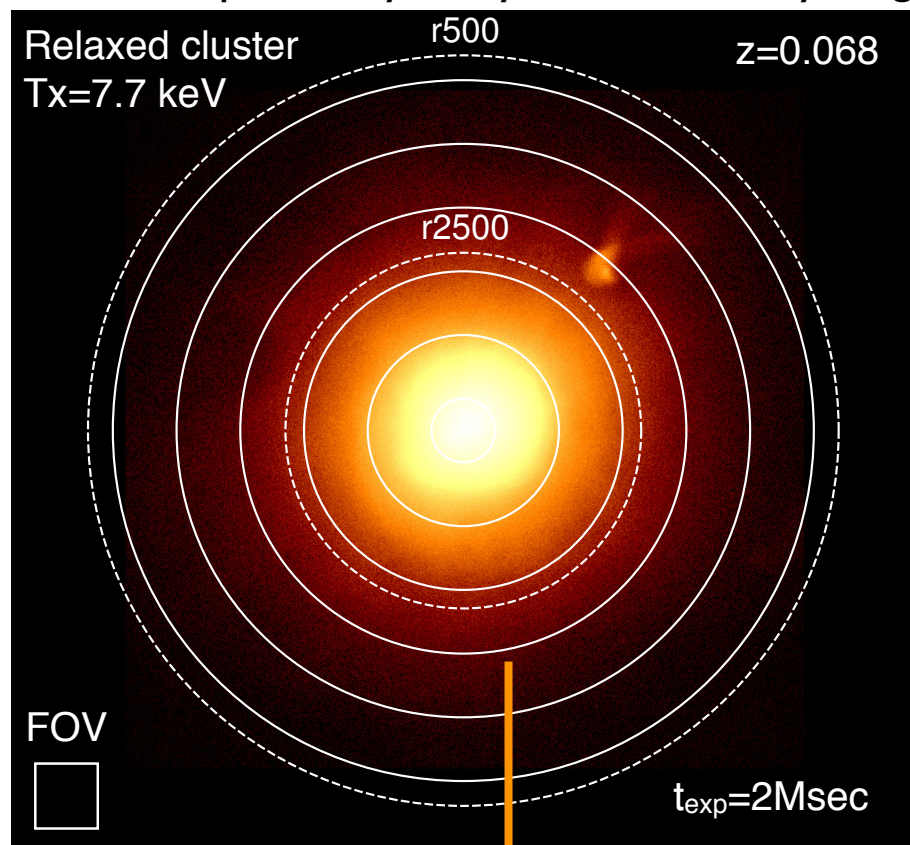


XRISM模擬観測

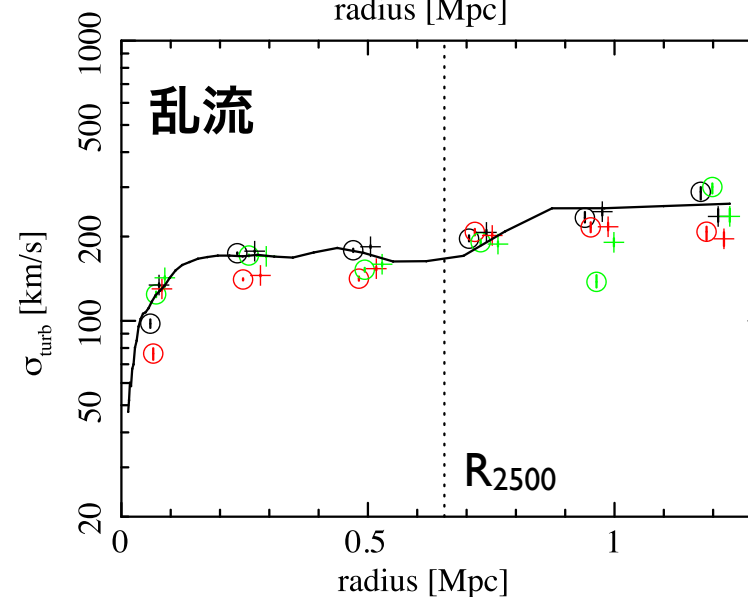
- XRISMはどのくらいガス速度やダークマター質量を正確に測れるか？ (Ota, Nagai & Lau 2018)

XRISM模擬観測: 銀河団ガス速度分布

Photon map from hydrodynamical sims by Nagai+07; Nelson+14



deprojected
projected



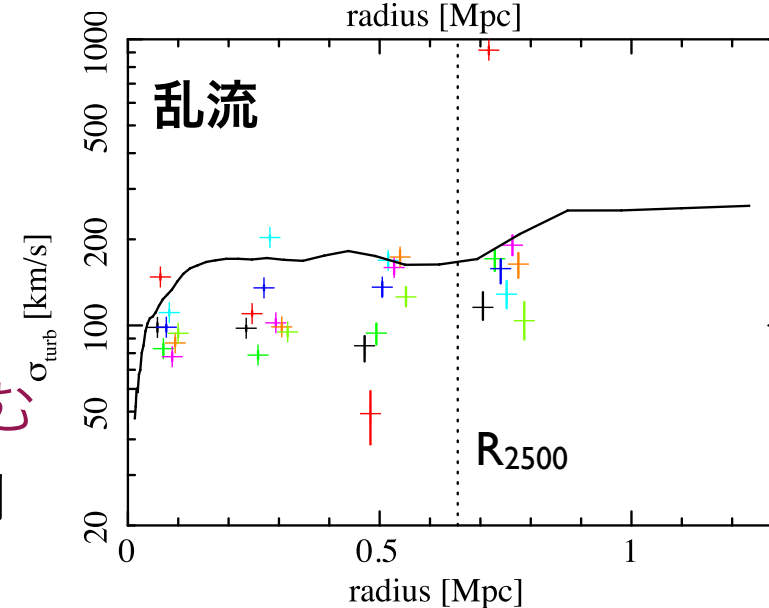
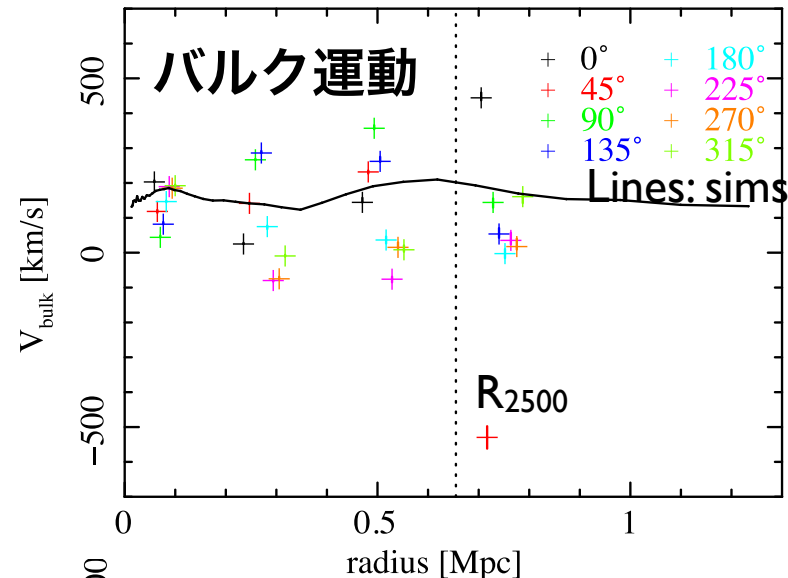
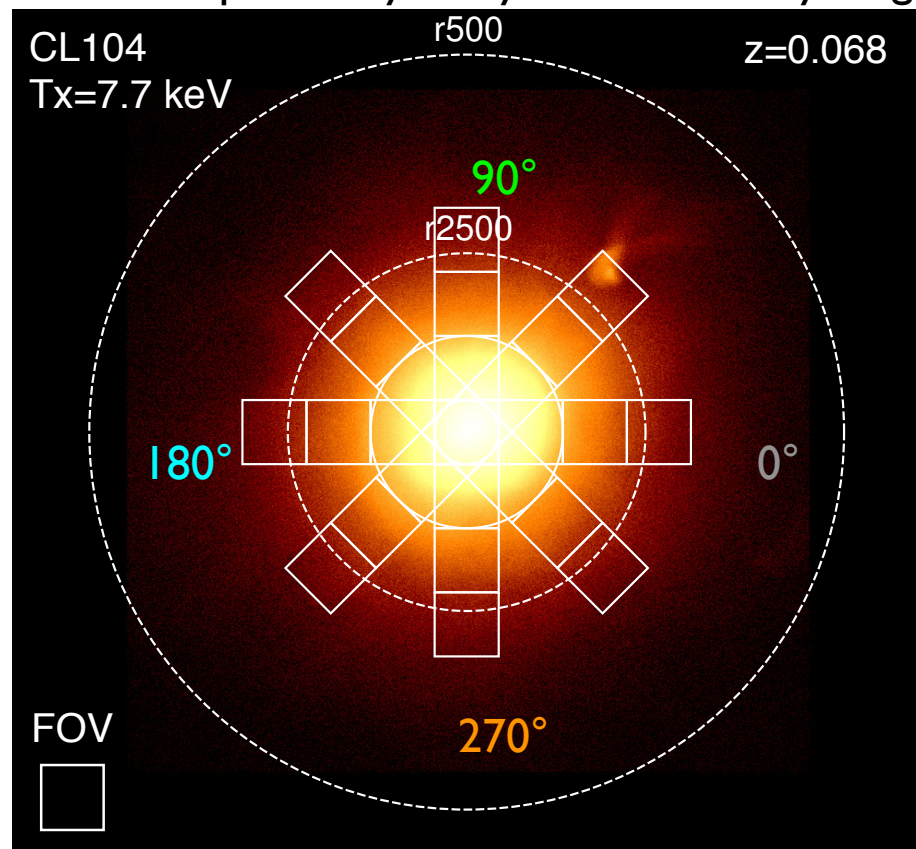
バルク運動・乱流とも高精度に測定 (<20%)

→ 5%の精度で質量を再現 @ R_{2500}

XRISM模擬観測: ガス運動の方位角依存性

Photon map from hydrodynamical sims by Nagai+07; Nelson+14

deprojected

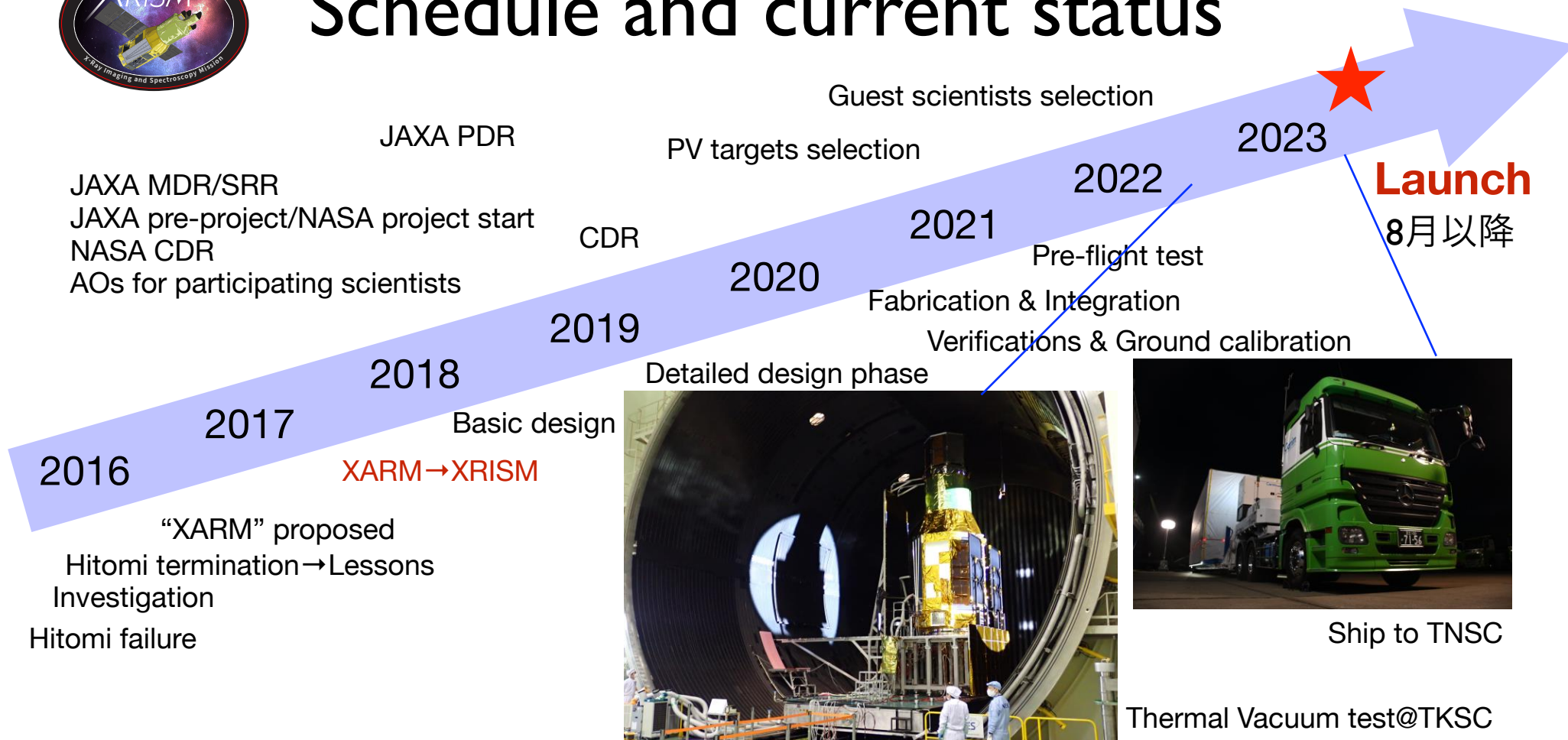


✓ガス運動は想像以上にバラエティに富む
領域サイズや場所に依存→二方向以上の観測

例) A2029銀河団のPV観測 非熱的圧力の寄与を1%レベルで制限

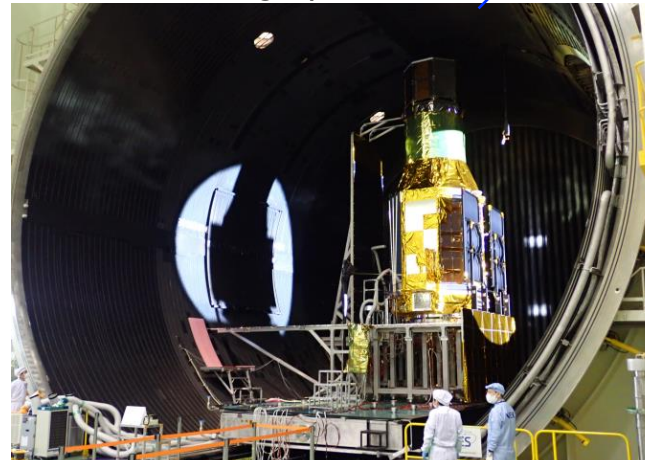


Schedule and current status



“XARM” proposed
Hitomi termination → Lessons Investigation
Hitomi failure

XARM → XRISM



Ship to TNSC

Thermal Vacuum test@TKSC

Call for AO I
~2mo after launch

xrism.isas.jaxa.jp

| Date | Event |
|-----------------------|---|
| Aug 2023 (Assumption) | Launch |
| Aug to Nov 2023 | Critical & Commissioning operation |
| Nov 2023 | First Light |
| Dec 2023 | Early release target, Calibration target |
| Dec 2023 to June 2024 | Performance Verification (PV) and Calibration |
| June 2024 | Guest Observers Program (GO-I) |

まとめ

- 銀河団は宇宙の構造形成, ガスの熱力学的進化, プラズマ物理のユニークな実験室
- ガス運動は銀河団の“missing energy”源
 - X線観測や流体計算は、銀河団形態によらずガス運動が存在し、非熱的圧力が無視できないことを示唆
 - 「ひとみ」は詳細X線分光が、銀河団の力学的進化やプラズマ診断に威力を発揮することを証明
- XRISMは2020年代の主要な国際天文台として、詳細X線分光の新しい窓を開く！