

かみのけ座銀河団の乱流

主に以下の論文紹介

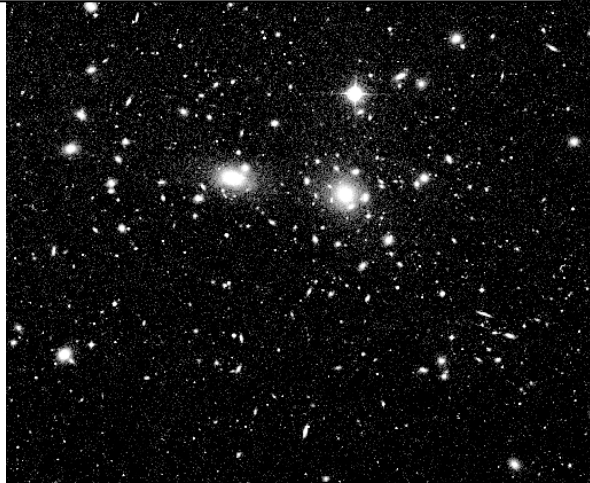
XRISM Forecast for the Coma Cluster: Stormy with a Steep Power Spectrum
XRISM Collaboration (2025) ApJ, 985, L20

滝沢元和

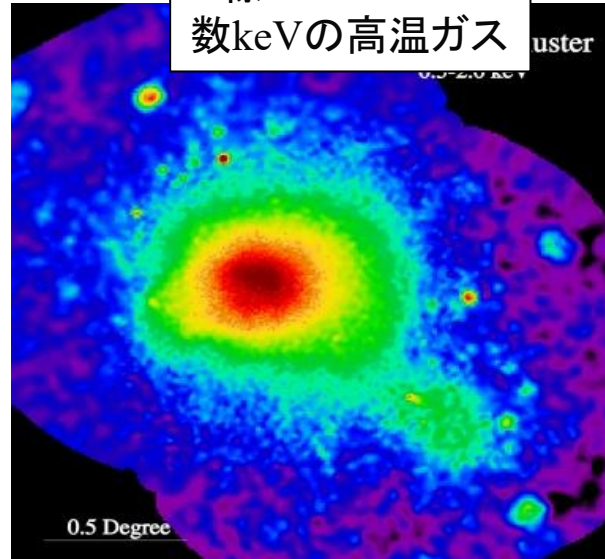
研究室談話会（2025.11.26）

Introduction: 銀河団

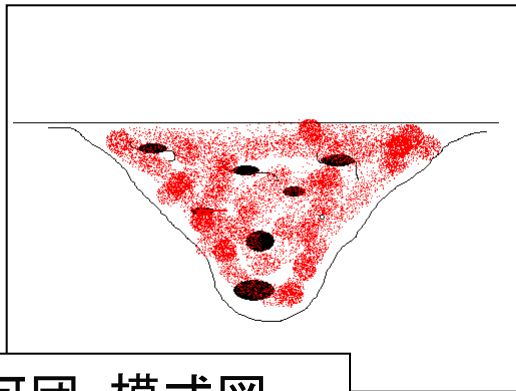
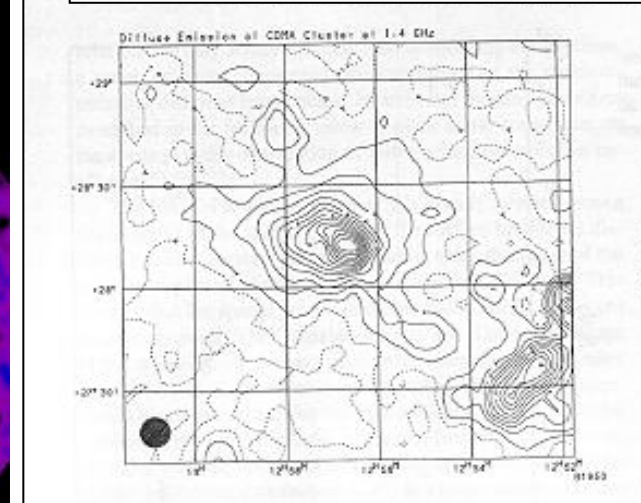
可視光
(数100個の銀河の集まり)



X線
数keVの高温ガス



電波
数GeVの高エネルギー電子+磁場



銀河団: 模式図

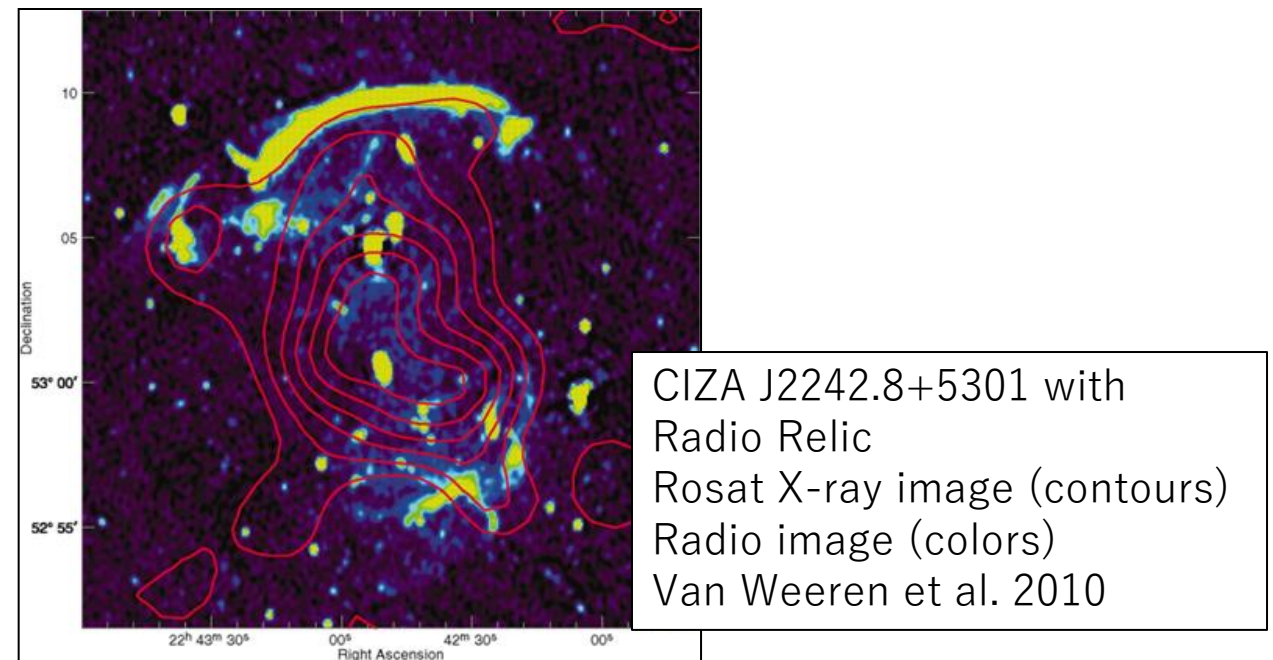
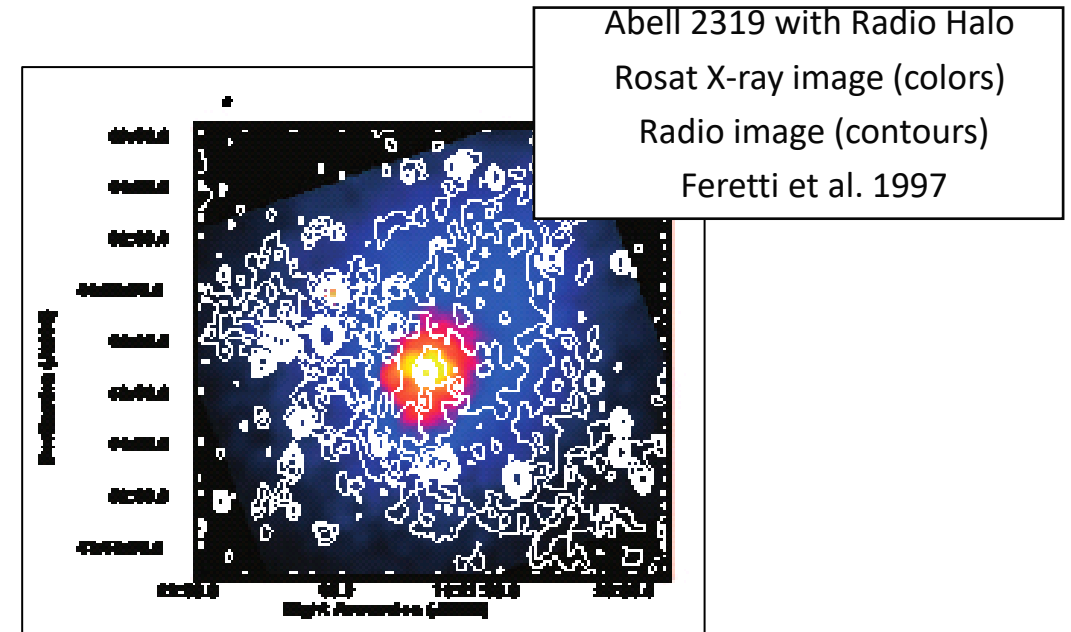
- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ($n \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $kT \sim \text{keV}$) と銀河のかたまり。
- 宇宙で最大のビリアライズした天体
($R \sim \text{Mpc}$, $M \sim 10^{14-15}$ 太陽質量)
- 宇宙の構造形成の (観測可能な) 現場
- プラズマ物理の実験場 (理想的な無衝突プラズマ)
- 暗黒物質の実験場 (重力レンズ、**self-interacting dark matter** など)

Radio Halos / Relics

- Some merging galaxy clusters have diffuse non-thermal radio emitting regions.

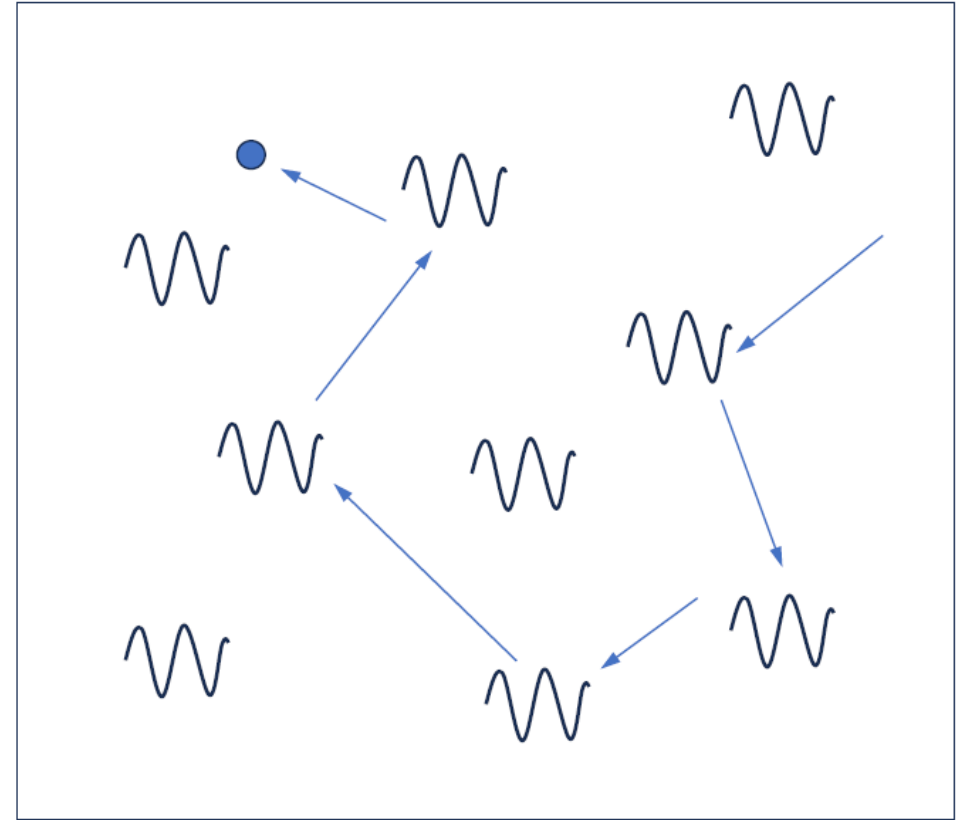
$$(E_e \sim \text{GeV}, B \sim \mu\text{G})$$

- Radio halos and (mini halos)
 - Located near the center, similar to X-ray morphology
 - Associated with ICM turbulence???
- Radio relics
 - Located in the outskirts, arc-like shape,
 - Likely associated with ICM shocks?



乱流加速（Fermi二次加速）

- オリジナルのFermiのアイデアはランダムに運動する散乱体による多重散乱。
- 正面衝突の頻度のほうが追突よりも多くなるために粒子加速がおきる。
- 散乱体として電磁流体乱流中での各種波動との（共鳴）散乱などが考えられているが諸説ある。
- 加速効率はあまりよくない。
- 粒子のエネルギースペクトルの予測は非自明。



コルモゴロフ理論

- 外部からのエネルギー注入 → 大スケール渦 → 小スケール渦 → 散逸して熱エネルギー

- 次元解析

エネルギー注入率: $[\varepsilon] \sim L^2 T^{-3}$

粘性率: $[\nu] \sim L^2 T^{-1}$

エネルギースペクトル: $[E(k)] \sim L^3 T^{-2} \sim [\varepsilon^{1/4} \nu^{5/4}]$

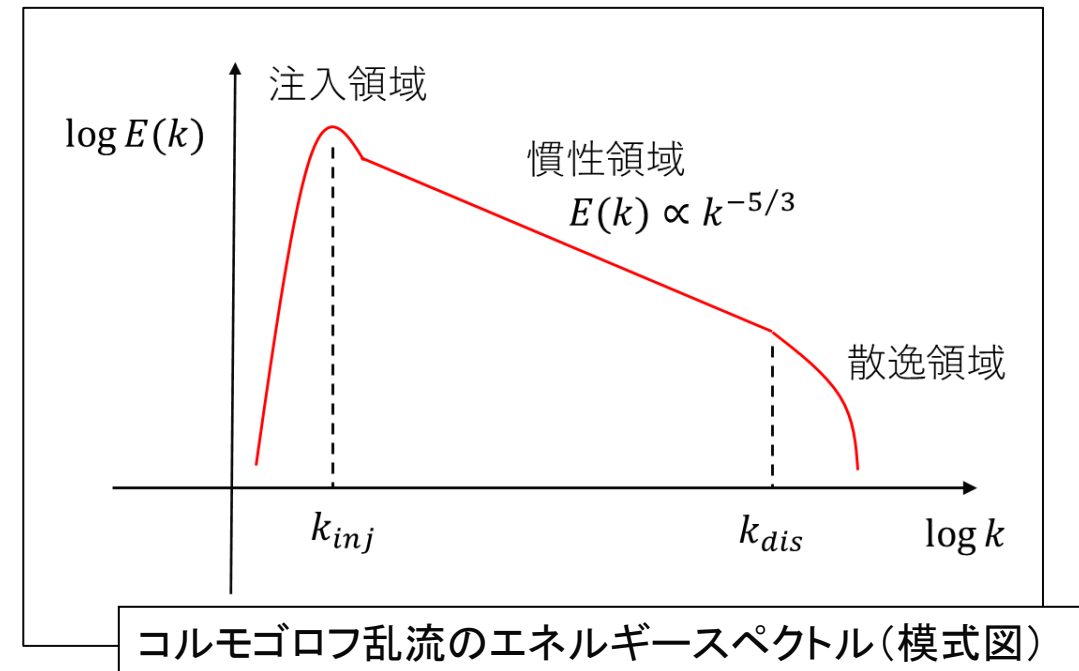
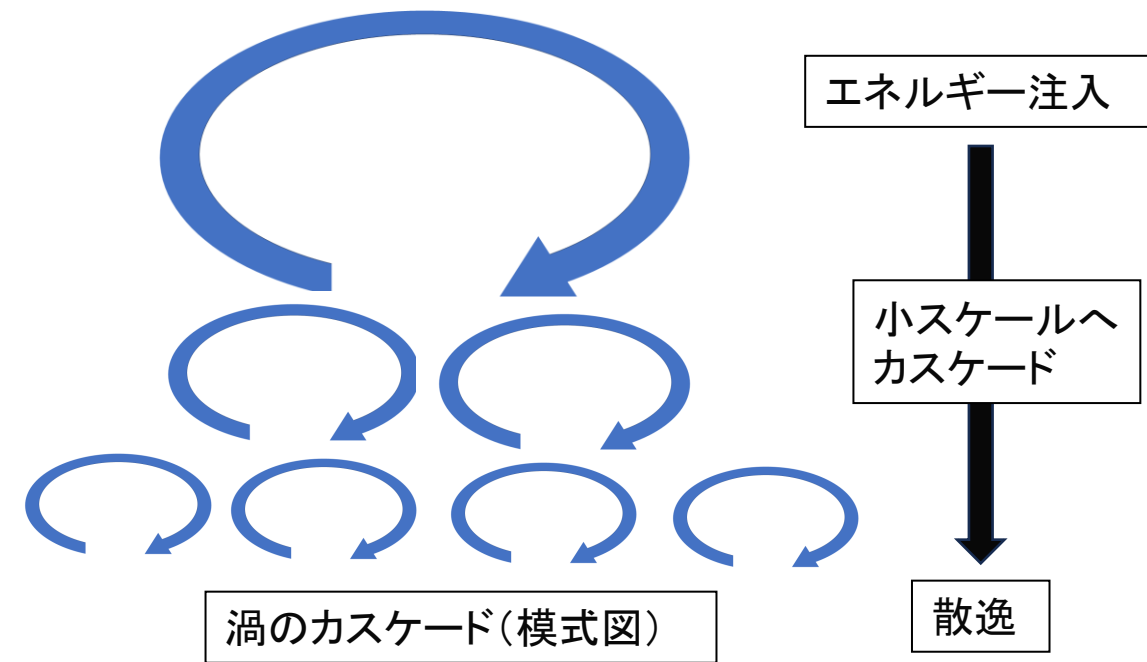
波数: $[k] \sim L^{-1} \sim [\varepsilon^{1/4} \nu^{-3/4}]$

以上より $E(k) \sim \varepsilon^{1/4} \nu^{5/4} F\left(\frac{k}{(\varepsilon^{1/4} \nu^{-3/4})}\right)$

慣性領域では $E(k)$ は ν に依存しないとすると

$F(k) \sim \nu^{-4/5}$ より $E(k) \propto k^{-5/3}$

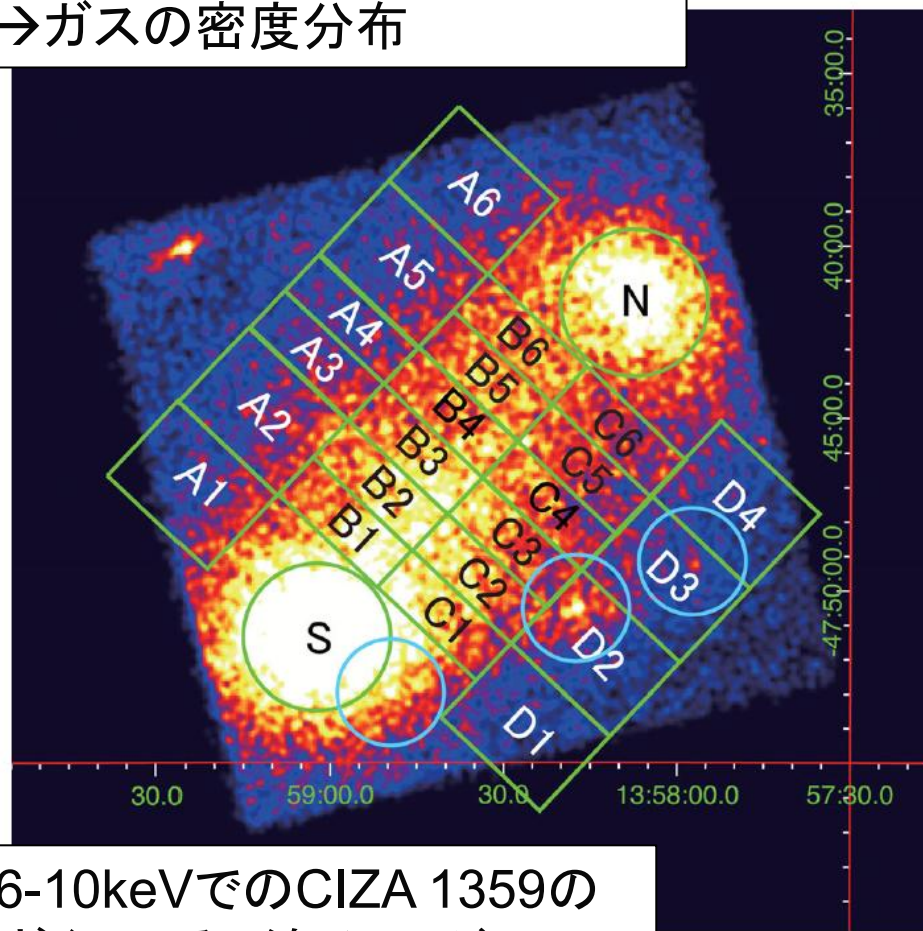
- 速度パワースペクトルは 3D では $P_v(k) \propto k^{-11/3}$
($\because E(k)dk = P_v(k)4\pi k^2 dk$)



X線観測でなにがわかるか (高温ガスからの熱的X線の場合)

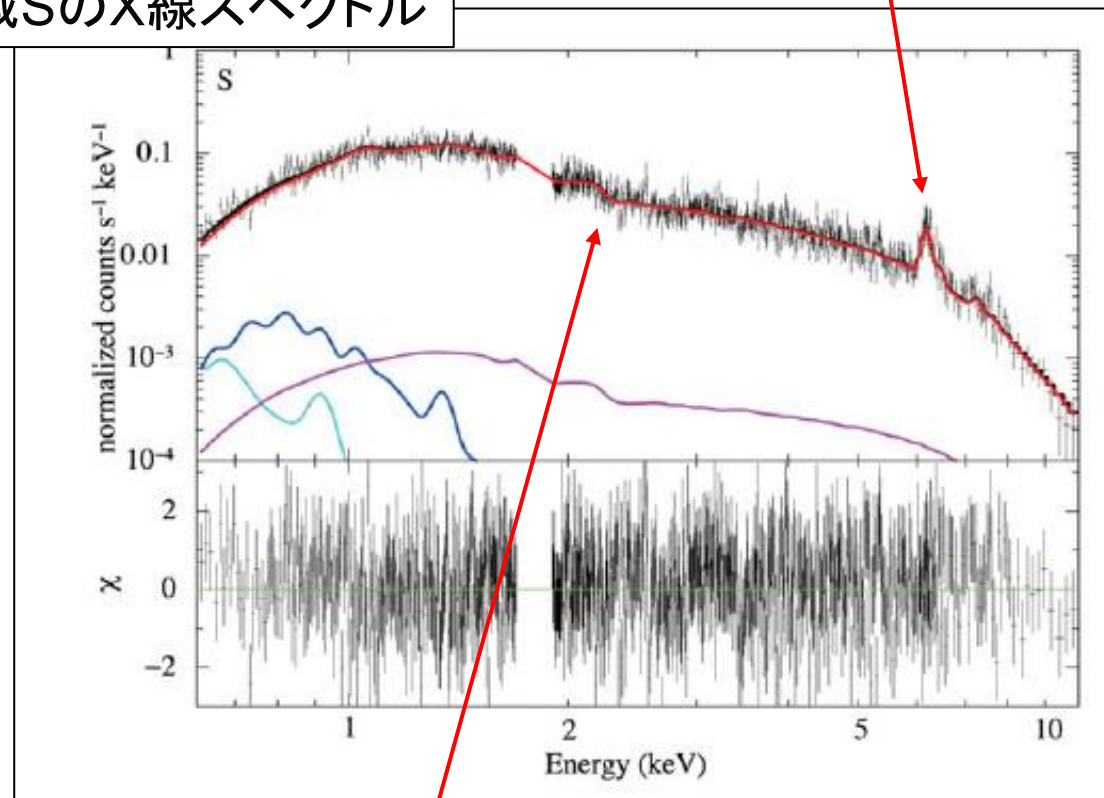
図はKato et al. (2015)より

X線表面輝度 $\propto \int n_e n_i T^{0.5} dl$
→ ガスの密度分布



0.6-10keVでのCIZA 1359の
すざくによるX線イメージ

領域SのX線スペクトル

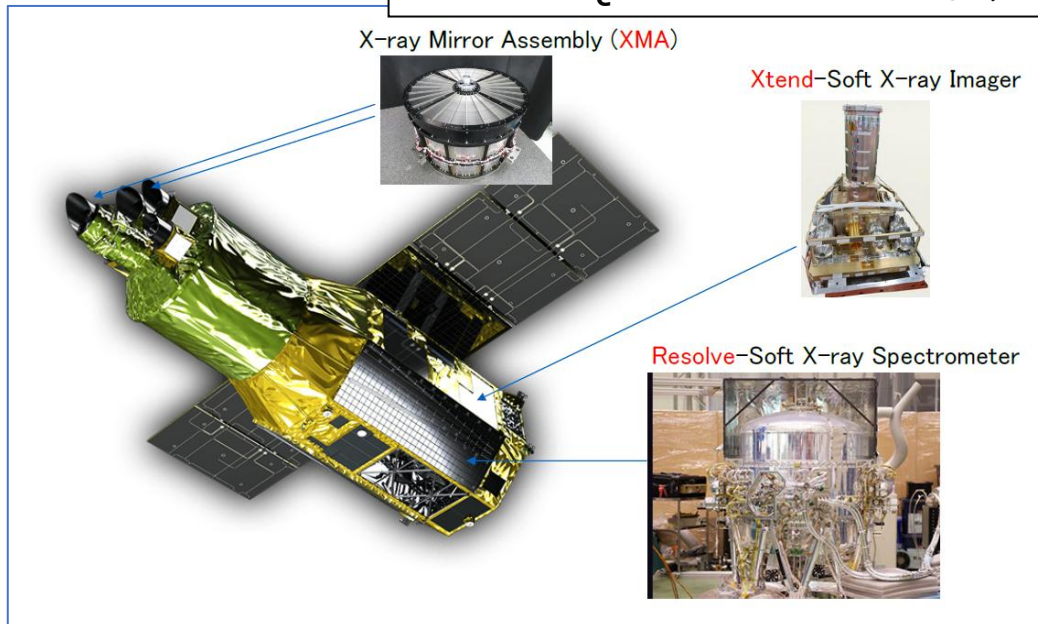


重元素の輝線
→ 重元素量、赤方変位、
ドップラー変位、温度etc

連続成分の形 → 温度
強度 → $\int n_e n_i T^{0.5} dl$

XRISM

XRISM Quick Reference より



- 高エネルギー分解能X線観測を主目的とした日米共同開発の衛星
- 2023年9月7日打ち上げ、同年10月first light
- ゲートバルブが開かない不具合が発生
(Resolveの2keV以下はほぼアウト)
- PV phase を経て現在は公募観測中心に。

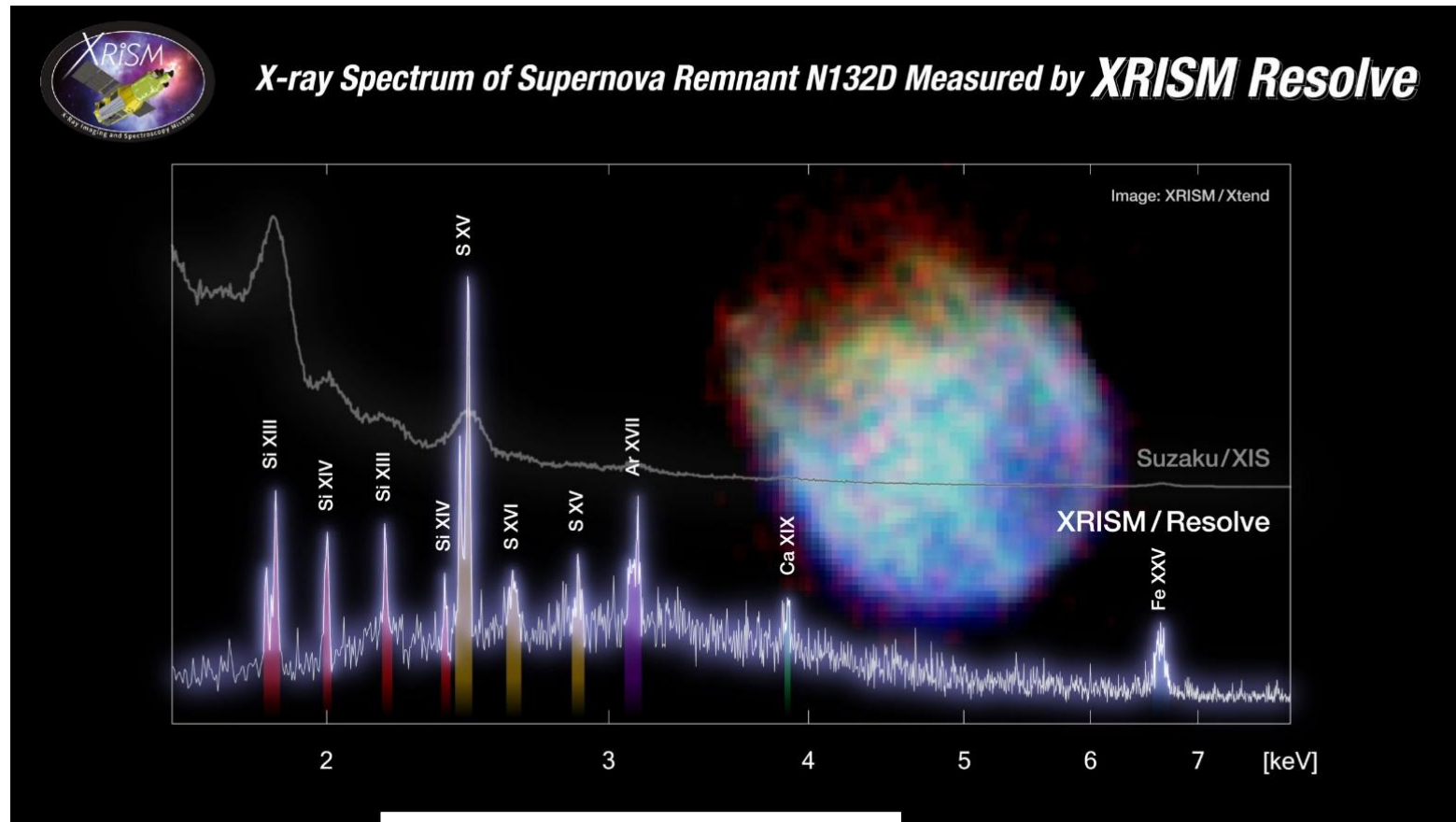
Table 1 Key parameters and performance requirement of the XRISM observatory
(Tashiro et al. 2018)

Parameters	Resolve	Xtend
X-ray mirrors	Conically approximated Wolter I optics (203 nested)	
Focal length	5.6 m	
Angular resolution	≤ 1.7 arcmin (HPD ^{*1})	
Detector technology	X-ray micro-calorimeter	X-ray CCD
Effective area	$\geq 210 \text{ cm}^2$ @ 6keV, $\geq 160 \text{ cm}^2$ @ 1keV	$\geq 300 \text{ cm}^2$ @ 6 keV
Field of View	$\geq 2.9 \times 2.9 \text{ arcmin}^2$	$\geq 30 \times 30 \text{ arcmin}^2$
Energy range	0.3 – 12 keV	0.4 – 12 keV
Absolute energy scale	$\leq 2 \text{ eV}$	–
Energy resolution	$\leq 7 \text{ eV FWHM @ 6keV}$	$\leq 250 \text{ eV @ 6keV}$ (EOL)
Non X-ray background	$\leq 2 \times 10^{-3} \text{ c/s/keV/array}$	$\leq 1 \times 10^{-6} \text{ c/s/keV/arcmin}^2$ (in 5–10 keV)
Time tagging accuracy	$\leq 1 \text{ ms}$	–

*1 Half Power Diameter

カロリメーターとCCDとの比較

- 超新星残骸N132Dのスペクトル。
- 白色で示したスペクトルはResolveで取得されたもの。
- 灰色で示したスペクトルはSuzaku XIS(CCD)で取得されたもの（Bamba et al., 2018）。
- 背景の画像はXtendによるX線イメージ。

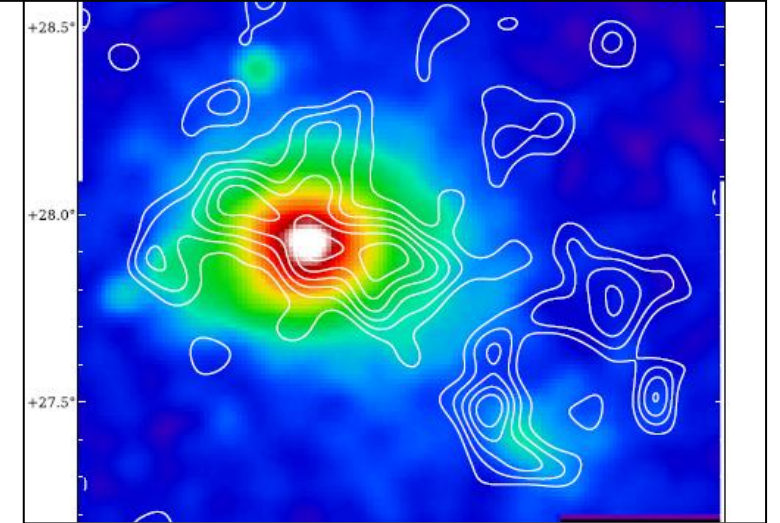


XRISMホームページより

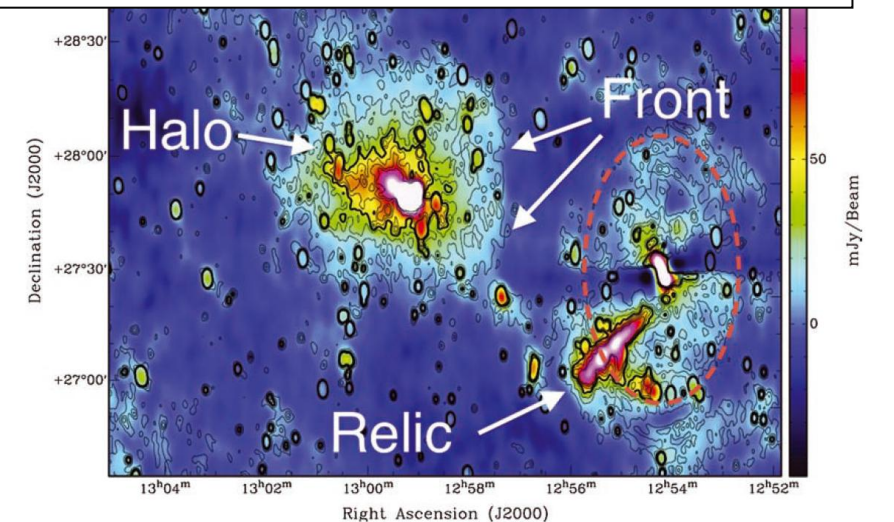
かみのけ座銀河団

- 近傍($z=0.02333$)のdisturbed clusterでcool coreや強力なAGN feedbackの兆候を持たない。
→ 構造形成によるICMの運動を見るには適
- 速度差(720km/s)をもった二つのcD銀河(NGC4874, NGC4889)
→ 過去のmajor mergerの名残
- より外側にもX-ray, galaxies, weak lensingなどでsubhaloが見つかっている。
- 典型的な電波ハローあり
→ 乱流による粒子加速？

X-ray image (カラー) & 質量分布 (等高線)
Okabe et al. (2014)



Radio (352GHz) image (カラー&等高線)
Brown & Rudnick(2011)



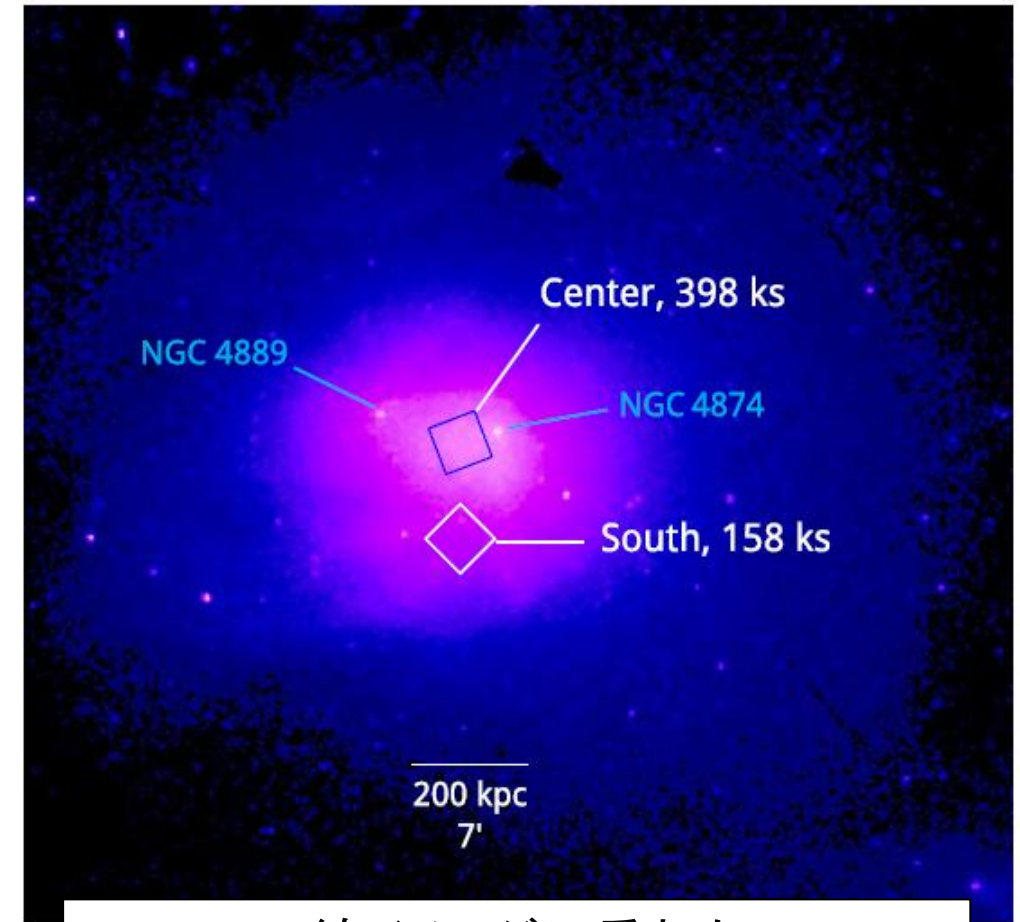
XRISMによるかみのけ座銀河団の観測

- 2024 July 9-18で2 pointings (Center&South)
- 標準的なscreeningの結果、cleanな exposureは以下のよう。

Center: 398 ksec

South: 158 ksec

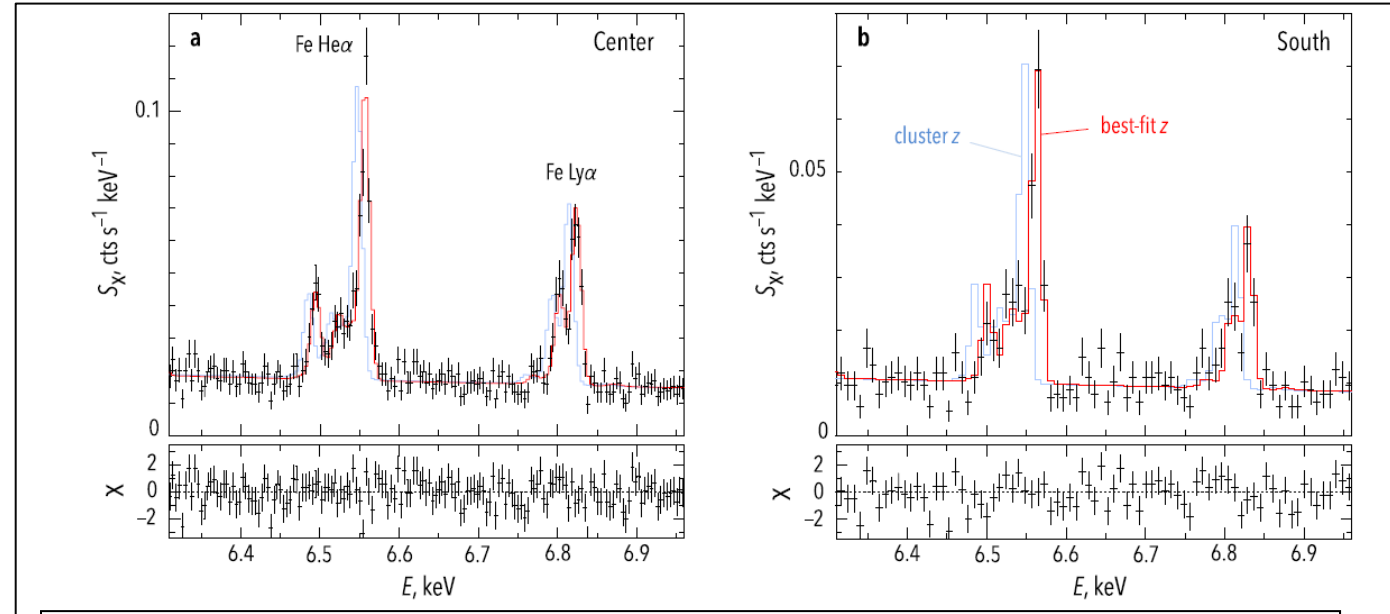
- RESOLVEの主な性能
 - energy resolution: FWHMで4.5eV
 - energy scale uncertainty: <0.3eV
 - 空間分解能（ミラーで決まる）：1'.3
 - 視野：3'×3'
- 今回の解析ではPSFの効果は考慮していない。
- NXBはモデルで。CXBは考慮していない（寄与は<1%）



XMMのX線イメージに重ねたXRISMの視野(XRISM colab. 2025)

Gas Temperature and Abundances

- 2-9 keV, 6.4-6.9keVでスペクトルfit。
- モデルはGalacticな吸収を受けた熱的プラズマ（thermal broadeningあり）
- エネルギー帯の違いで温度等に食い違いは無し。速度分散の信頼性という点では良い兆候。



各視野の鉄ライン付近のスペクトル(XRISM colab. 2025)

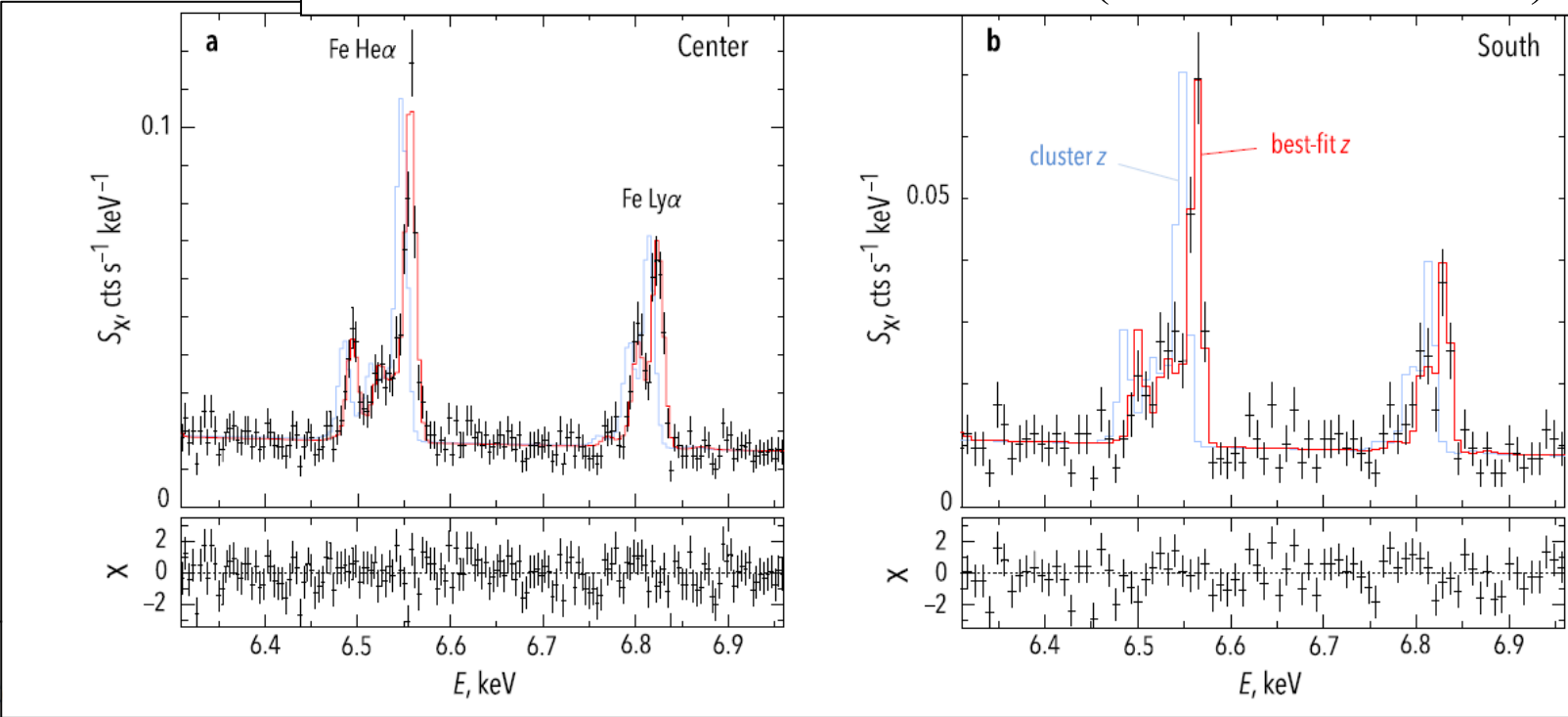
Table 1
Parameters for One-component Fits to Spectra in Full Center and South Regions

	Center		South	
	2-9 keV	6.4-6.9 keV	2-9 keV	6.4-6.9 keV
T (keV)	8.37 ± 0.15	8.55 ± 0.25	7.53 ± 0.25	7.44 ± 0.44
Fe abundance	0.32 ± 0.01	0.33 ± 0.02	0.36 ± 0.025	0.32 ± 0.04
z		0.02183 ± 0.00005		0.02089 ± 0.00009
σ_z (km s $^{-1}$)		208 ± 12		202 ± 24

Gas Velocities and Dispersions

- 可視光赤方偏移
($cz = 6995 \pm 39\text{km/s}$)
と大きく異なる。
- $\Delta cz =$
 - $-450 \pm 15\text{km/s}$ (center)
 - $-730 \pm 30\text{km/s}$ (south)
- 速度分散は両領域とも
 $\sigma_z \approx 200\text{km/s}$

各視野の鉄ライン付近のスペクトル(XRISM colab. 2025)

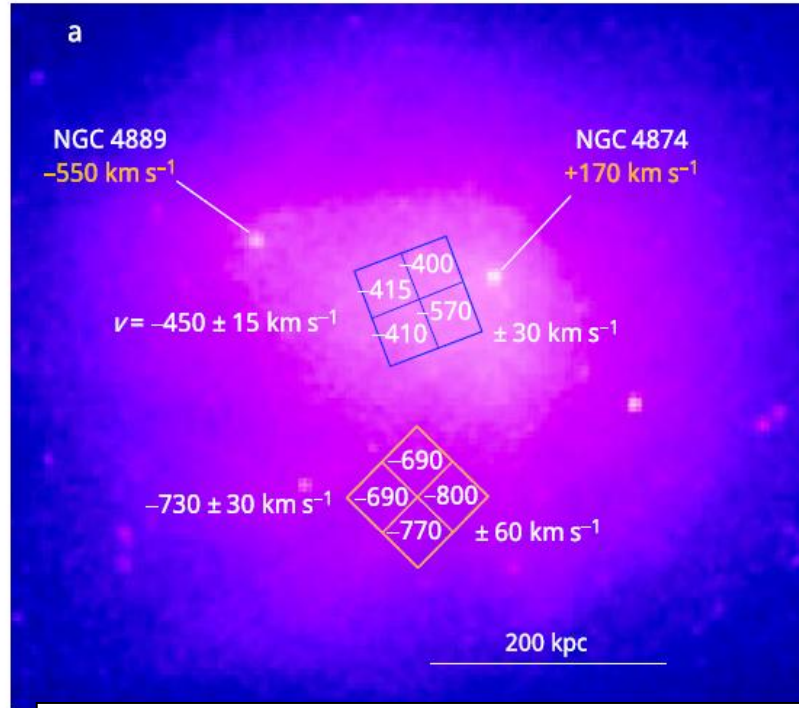


Paramet

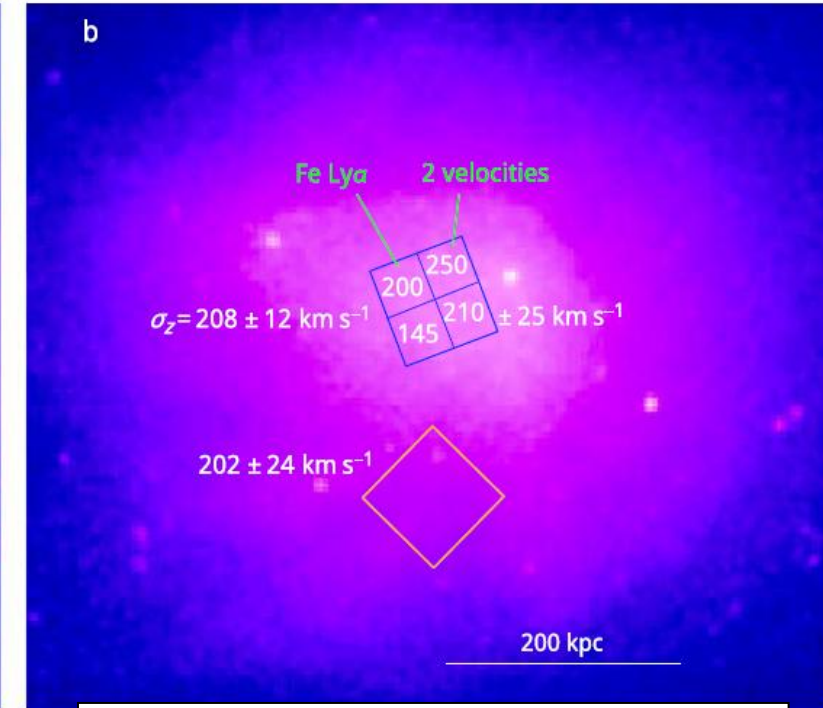
	Center		South	
	2–9 keV	6.4–6.9 keV	2–9 keV	6.4–6.9 keV
T (keV)	8.37 ± 0.15	8.55 ± 0.25	7.53 ± 0.25	7.44 ± 0.44
Fe abundance	0.32 ± 0.01	0.33 ± 0.02	0.36 ± 0.025	0.32 ± 0.04
z		0.02183 ± 0.00005		0.02089 ± 0.00009
σ_z (km s^{-1})		208 ± 12		202 ± 24

視野内での速度差など

- 視野内で4分割して視線測度と速度分散を出してみた。
- vvariationがあるようだ。
- ただし、PSFの効果を考えていないことに注意（かなりなまされている）。
 - 空間分解能（ミラーで決まる）：1'.3
 - 視野：3' × 3'



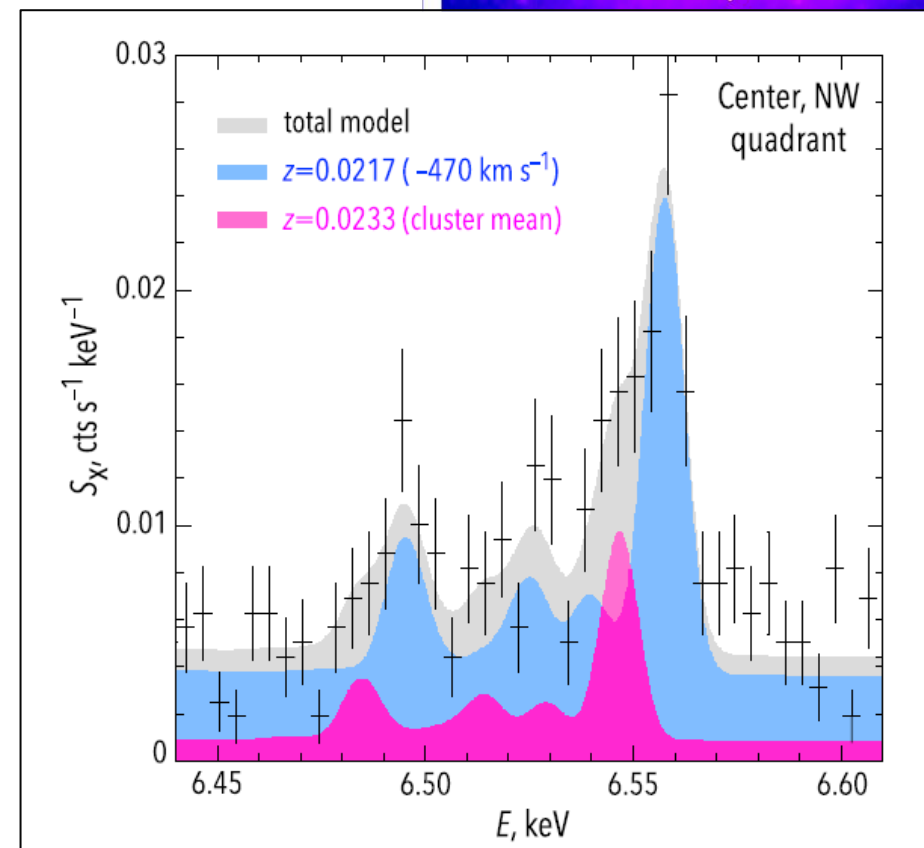
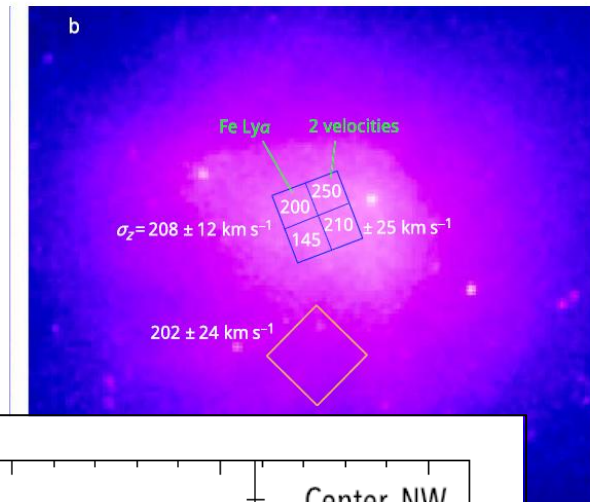
視野内4分割での可視赤方偏移（銀河平均）との差。Blue shiftがマイナス



視野内4分割での速度分散
Centerの北2領域については後述

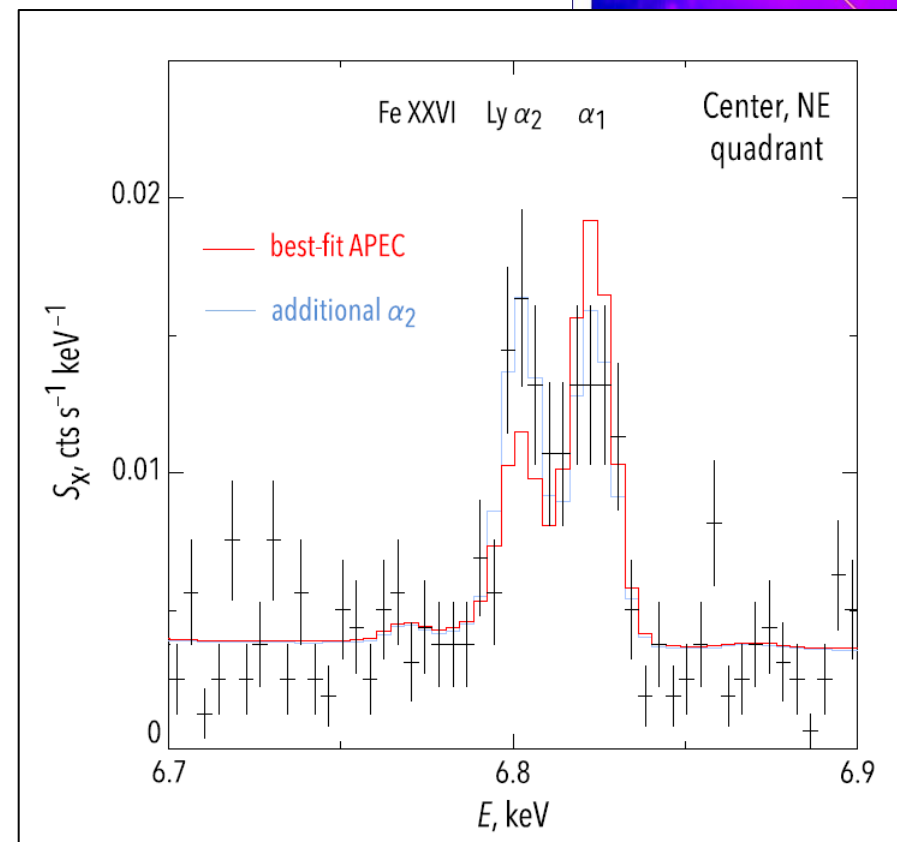
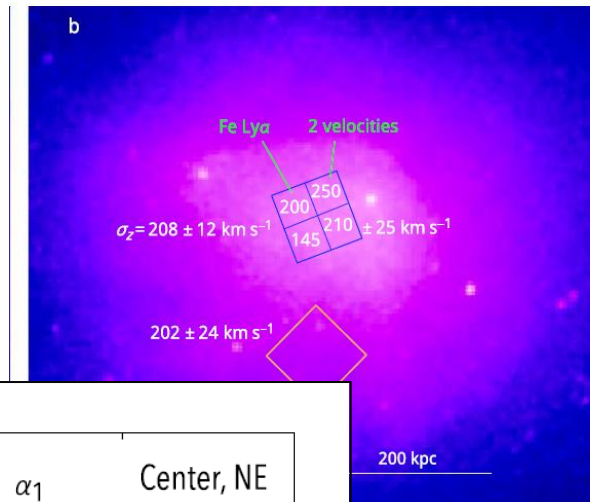
Center 北西領域：二速度成分？

- center北西領域は 2 成分目があるよう？
- 実際に 2 速度成分でfitしてみた。
- fitは改善($\Delta\chi^2 = 10.6$)
- メイン： $z=0.02117$
optical cz とは-470km/sの差
 $kT=9.4\pm0.8\text{keV}$
- サブ： $z=0.0233\pm0.0004$ (22%程度の寄与)
optical redshift と一致
 $kT=6.8\pm1.8\text{keV}$
- 温度高めなので外縁部のガスではなさそう。



Center北東領域：Fe Ly α Anomaly

- Center 北東領域のFe Ly α の強度比に異常がみられる（APEC model と合わない）。
- 共鳴散乱では説明できない（光学的に薄すぎる）。
- X、可視、電波でみても特に変な天体はない。
- 結局よくわからないが、同様な anomaly がA2029でも見つかっている。



Discussion: 速度分散と乱流圧力

- 等方性を仮定して視線方向速度分散を 3D速度分散へ変換

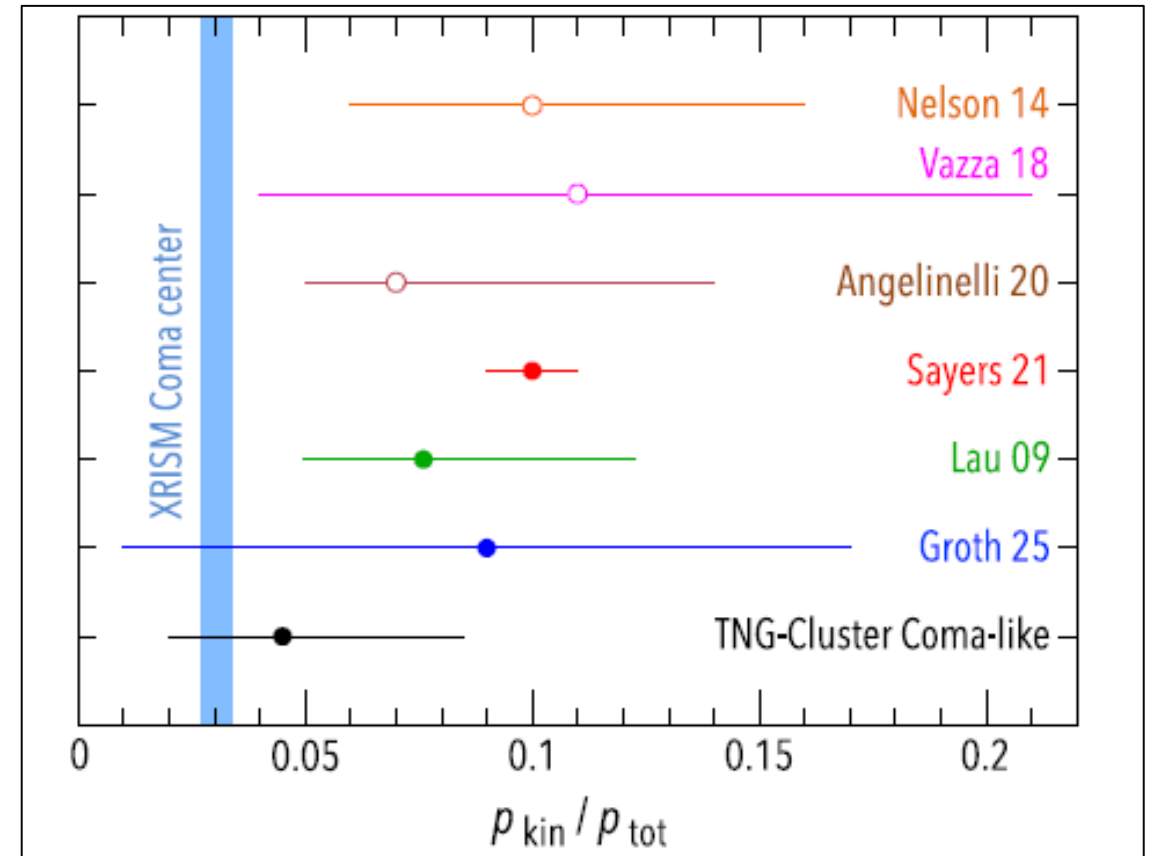
- マッハ数で考えると

$$M = \begin{cases} 0.24 \pm 0.015 & (\text{center}) \\ 0.25 \pm 0.03 & (\text{south}) \end{cases}$$

- 乱流圧の寄与は

$$\frac{p_{kin}}{p_{tot}} = \begin{cases} 3.1 \pm 0.4 \% & (\text{center}) \\ 3.3 \pm 0.8 \% & (\text{south}) \end{cases}$$

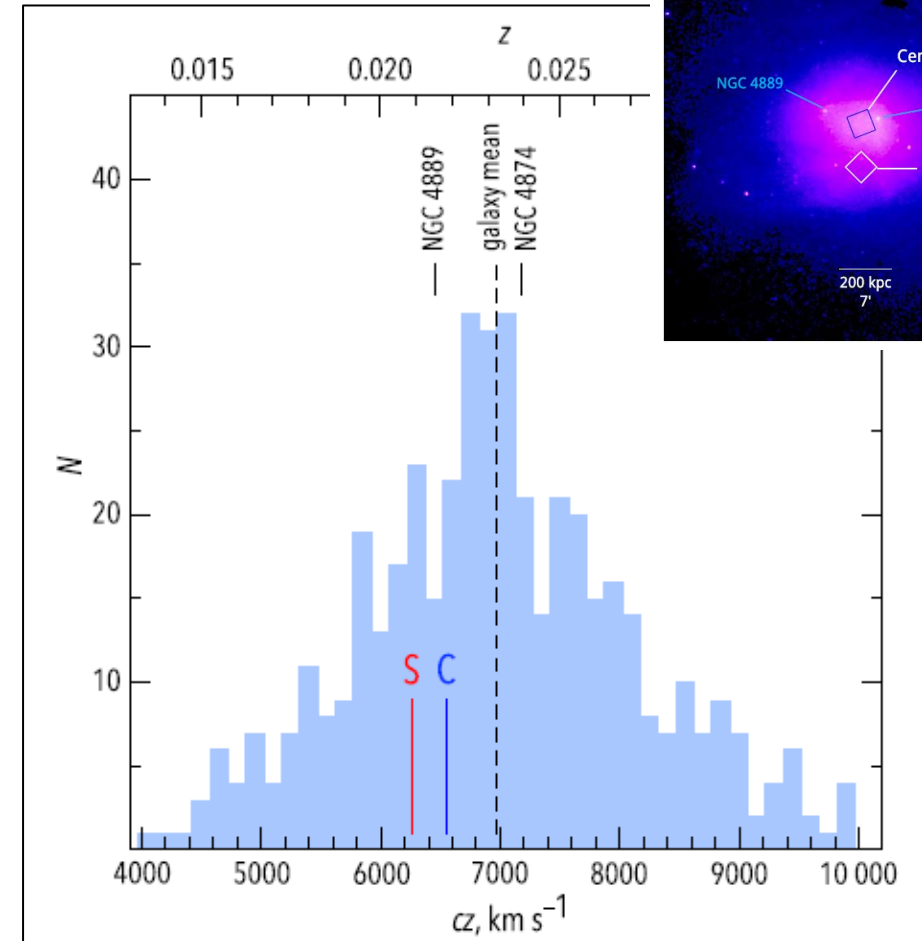
- 主なcosmological simulationと比較するとlower endにかかるかどうかといったところ。



乱流圧について、XRISMのComaの結果と
主なシミュレーションとの比較

Discussion: ガスと銀河の速度比較

- $r < 20' \sim 0.6\text{Mpc}$ の領域では銀河の視線速度分布は単一のガウス分布でよくあう。
 - ongoing major merger はなさそう
- しかし、Center、South 共に
 - 銀河平均と大きな速度差がある。
 - Main cD (NGC4874) より second cD(NGC4889)の速度に近い
 - NGC4874近傍でも銀河平均に近い成分はマイナー（前述）
- 乱流が弱い($M_{1D} = 0.14$)一方で比較的整った流れが強い($M_{1D} = 0.3 - 0.5$)



$r < 20' \sim 0.6\text{Mpc}$ の領域での銀河の視線速度分布とガスの視線速度の比較

Discussion: Velocity Power Spectrum(1)

- Velocity structure function (VSF)

$$VSF(r) \equiv \langle |v_z(\mathbf{x} - \mathbf{r}) - v_z(\mathbf{x})|^2 \rangle$$

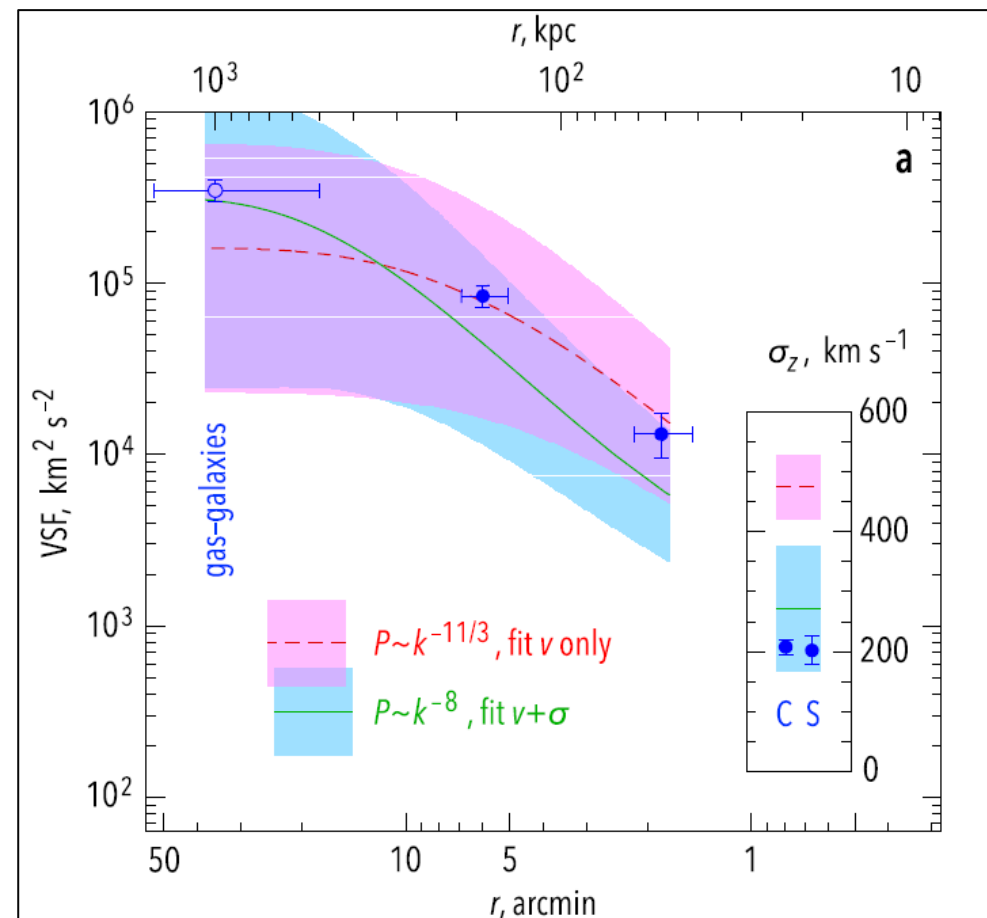
$P(k)$ と等価で、欠測値のあるデータでも計算しやすい。

- 以下のデータからVSFを計算
 - centerとsouth ($r \sim 6'$)
 - 視野内の4分割 ($r \sim 1.8'$)
 - 視野内速度分散 ($r \rightarrow 0$)
 - Center & southと銀河平均 ($r \sim 35'$)
- 以下のモデル $P(k)$ に対応するVSFと比較

$$P(k) = P_0 \left[1 + (kl_{inj})^2 \right]^{\alpha/2} \exp[-(kl_{dis})^2]$$

$$l_{inj} = 1 \text{ Mpc}, l_{dis} = 1 \text{ kpc}$$

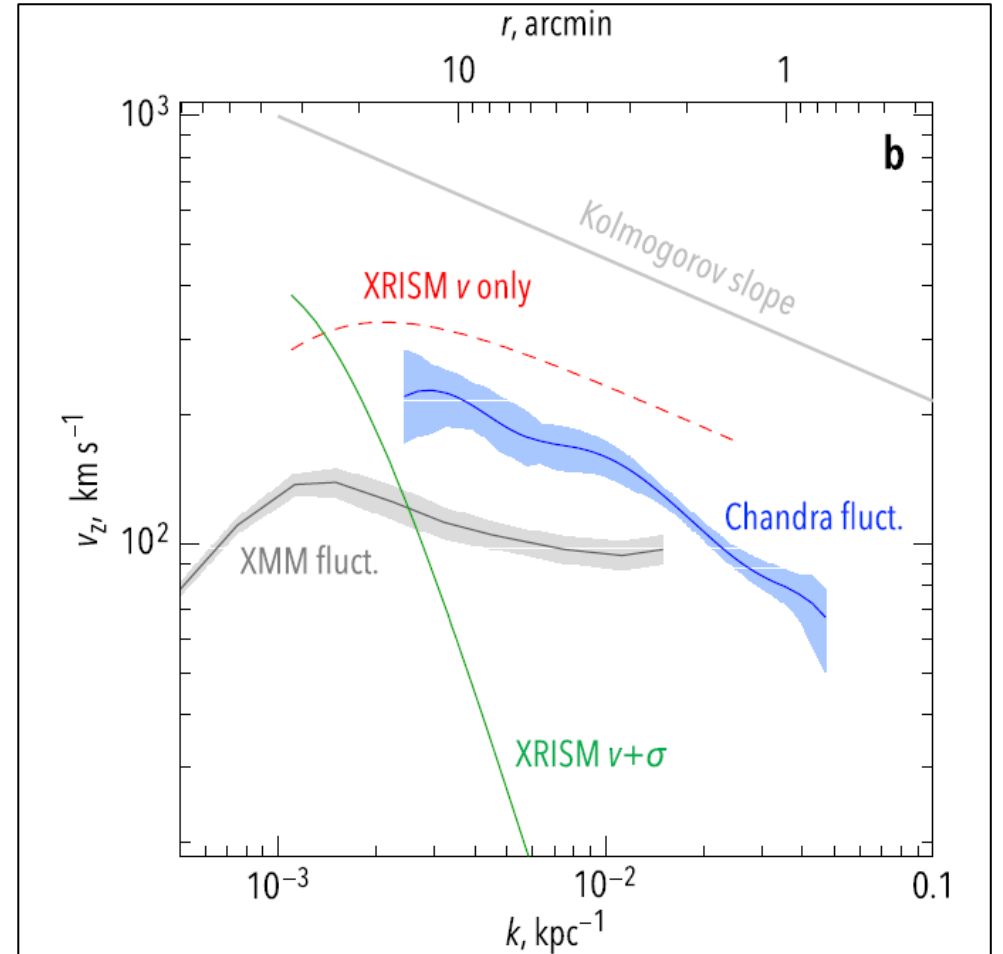
- コルモゴロフ ($\alpha = -11/3$)だと速度分散を説明できない。
- あわせるには $\alpha = -8$ とか。
- コルモゴロフであわせるには $l_{dis} = 1000 \text{ kpc}$ とか。



観測から得られたVSFと乱流モデルとの比較

Discussion: Velocity Power Spectrum(2)

- X線表面輝度fluctuationの結果と比較
(乱流の間接的測定)
 - $\delta I_X / I_X \sim 2 \delta \rho / \rho$
 $\delta \rho / \rho \sim \delta v / c_s$
 - Chandra(Zhuravleva et al. 2019):core内で
 - XMM(Sanders et al. 2020)もっと広い範囲なので注意
- Chandraの表面輝度ゆらぎとXRISMの速度分散の結果とは明らかに矛盾。



XRISMの視線測度直接測定とChandra, XMMでのX線表面輝度ゆらぎによる間接測定結果の比較

Discussion: Velocity Power Spectrum(3)

- XRISMの結果はKolmogolovと比較すると、大スケールでの速度成分のわりに小スケールでの速度成分が明らかに少ない。以下の二つの可能性。
 - (a)中間スケールで散逸が起きている？
 - $l_{dis} > \sim 240\text{kpc}$ が必要 (c.f. クーロン散乱だと $l_{mfp} \sim 10\text{kpc}$)
 - Radio haloが乱流加速だとすると矛盾？
 - (b)小スケールまでカスケードがまだ到達していない一時的な状況？
 - 大スケールeddyのturn over timeは2-3Gyr。
 - 銀河の速度分布でmajor mergerの兆候が見えないことと矛盾？
- どちらの可能性も難しそうに見える。速度測定サンプルを増やす必要。

まとめ

- かみのけ座銀河団は近傍にある銀河団でさまざまな波長で詳細な観測がなされている。
また典型的な電波ハローを持ち、乱流による粒子加速が起きていると考えられている。
- XRISM衛星を用いてかみのけ座銀河団のコアを2視野観測しガスのバルク速度や速度分散の直接測定を行った。
- バルクな速度に比べて速度分散の値が小さめな結果が得られた。
- 速度のパワースペクトルはコルモゴロフ乱流に比較すると冪がきついor散逸が比較的大きなスケールで起きていることを示唆する。
- ただし上記の可能性は、X線表面輝度分布ゆらぎの観測や電波ハローの乱流加速モデルとは矛盾しているように見える。