

Galaxy clusters at $z \sim 1$ imaged by ALMA with the Sunyaev-Zel'dovich effect

滝沢元和

山形大宇宙理論グループ談話会 (2023.10.27)

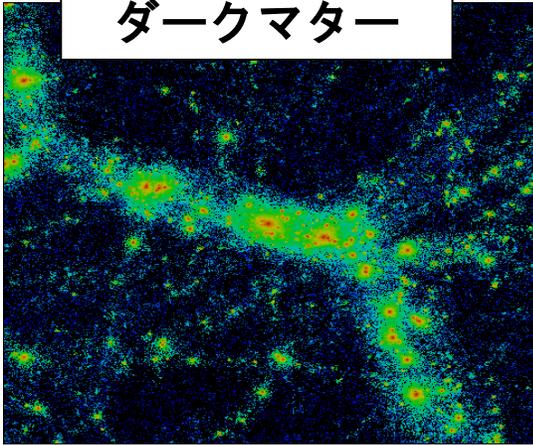
T. Kitayama, S. Ueda, N. Okabe, T. Akahori, M. Hilton, J. P. Hughes, Y. Ichinohe, K. Kohno, E. Komatsu, Y.-T. Lin,
H. Miyatake, M. Oguri, C. Sifon, S. Takakuwa, M. Takizawa, T. Tsutsumi, J. van Marrewijk, E. J. Wollack

Publications of the Astronomical Society of Japan, 2023, 75, 311

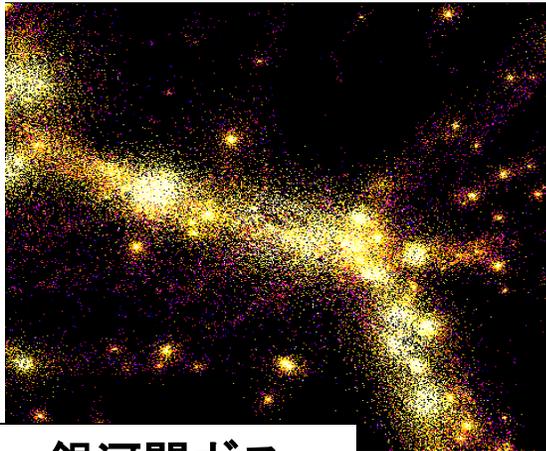
Introduction

Yoshikawa et al. (2003)

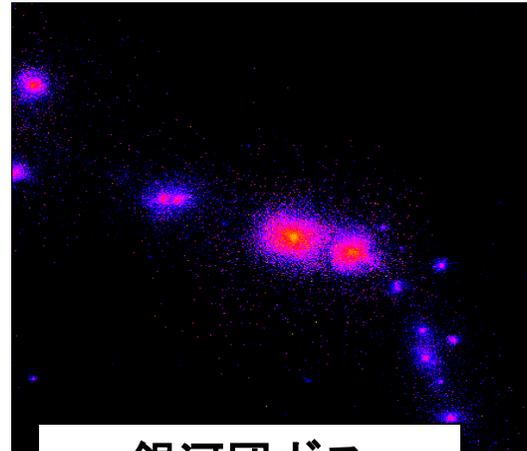
ダークマター



銀河



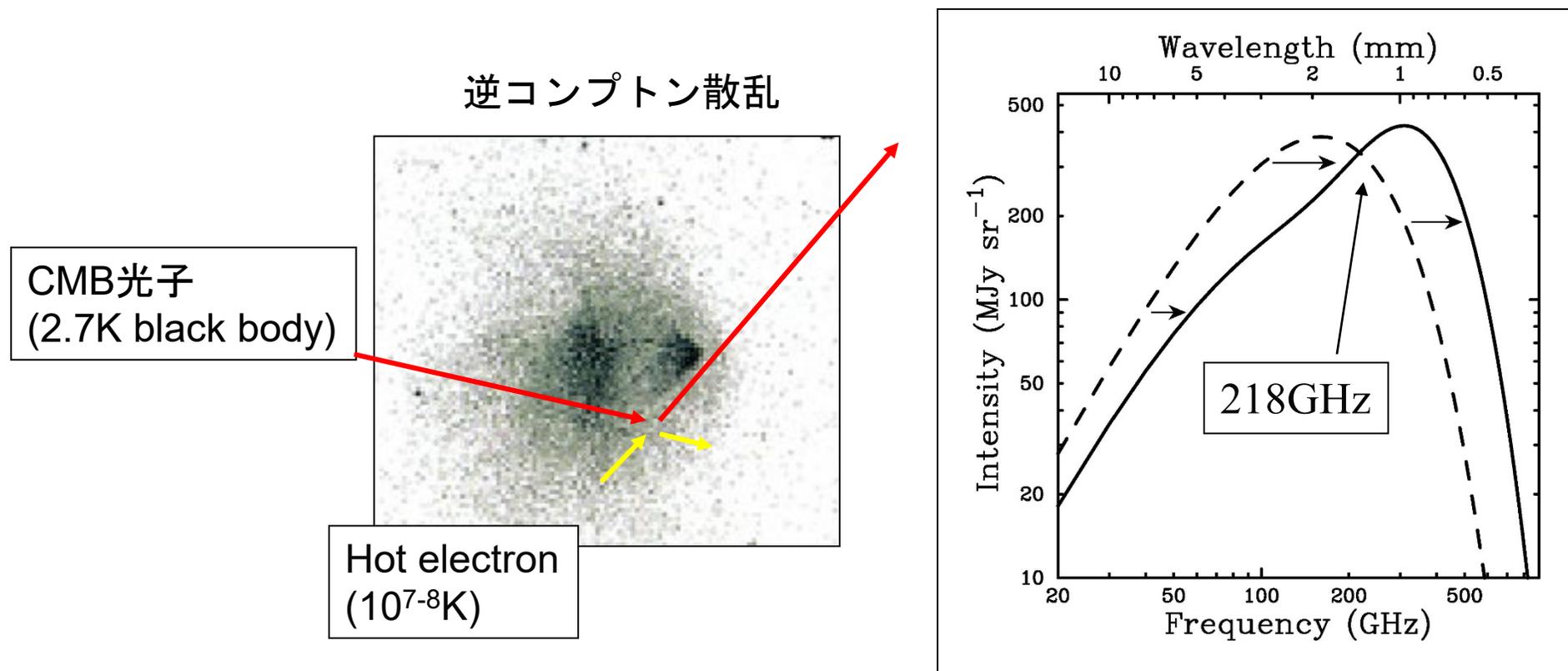
銀河間ガス
($\sim 10^5$ K)



銀河団ガス
($\sim 10^7$ K)

- 標準的な構造形成理論によれば、宇宙の構造は小さなものから大きなものへ (bottom up scenario)
- Cold Dark Matter
- Dark Halo, filaments
- バリオン (CDMの重力ポテンシャルで加熱)
 - 一部は冷えて銀河、星へ
 - 大部分は高温ガスに (X-ray, Sunaev-Zel'dovich効果)

Sunyaev-Zel'dovich Effect (SZE)



銀河団などの高温ガスによる逆コンプトン散乱で
Cosmic Microwave Background (CMB) のスペクトルが変形。

- ミリ波帯 (R-J側) では decrement
- サブミリ波帯 (Wein側) では increment

Thermal, Kinematic, and others

- **Thermal SZE:** Maxwell分布をした熱電子によるCMBスペクトルの変形。(Sunyaev&Zel'dvich 1972)

-----今回の話題はここまで-----

- **Kinematic SZE:** CMBに対するガス雲の運動によるCMBスペクトルの変形(Sunyaev&Zel'dvich 1980)

-----普通はせいぜいここまで-----

- **Non-thermal SZE:** 非熱的電子による
(Blasi et al. 2000, Colafrancesco et al. 2003など)
- **Grad-T SZE:** 熱伝導による (Hattori&Okabe 2005)

S Z 効果：波長依存性

Thermal SZ

$$\Delta I_{\text{th}} = i_0 y g(x)$$

ただし

$$i_0 = 2(kT_{\text{cmb}})^3 / (hc)^2$$

$$x = (hv / kT_{\text{cmb}})$$

$$y = \int \left(\frac{kT_e}{mc^2} \right) n_e \sigma_T dl,$$

$$g(x) = \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} \left[\frac{x(e^x + 1)}{e^x - 1} - 4 \right],$$

Kinematic SZ

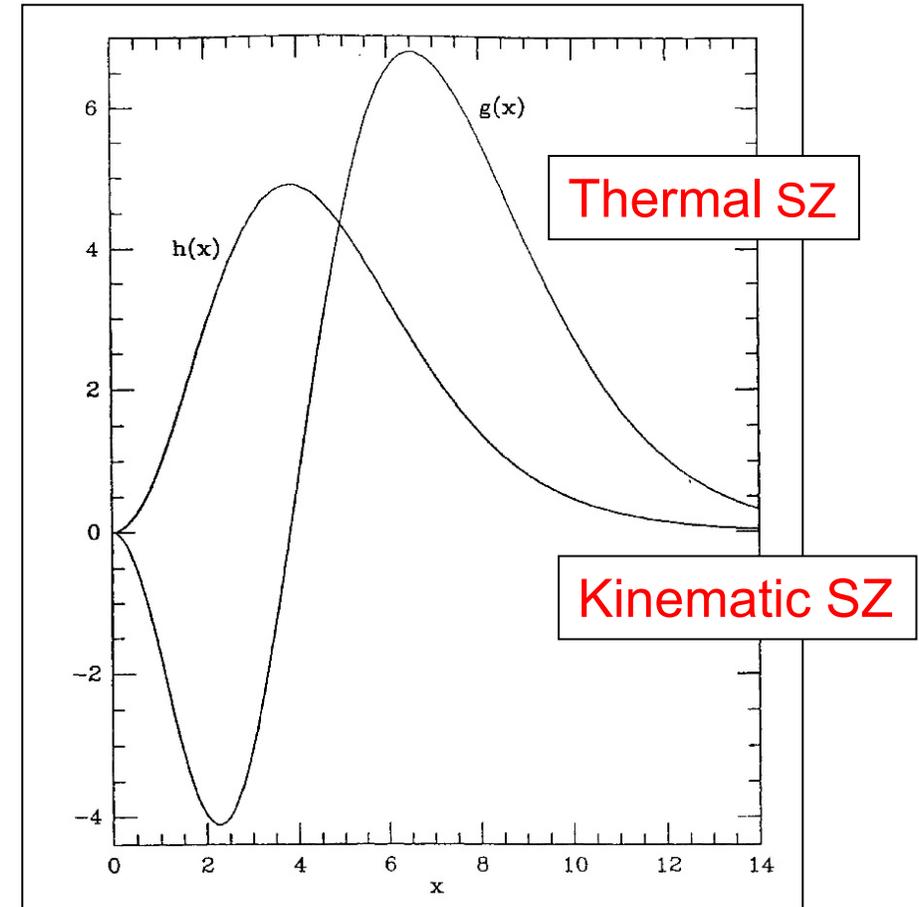
$$\Delta I_{\text{th}} = -i_0 h(x) (V_r / c) \tau$$

ただし、 V_r は遠ざかる時を正とし、

$$\tau = \sigma_T \int n_e dl$$

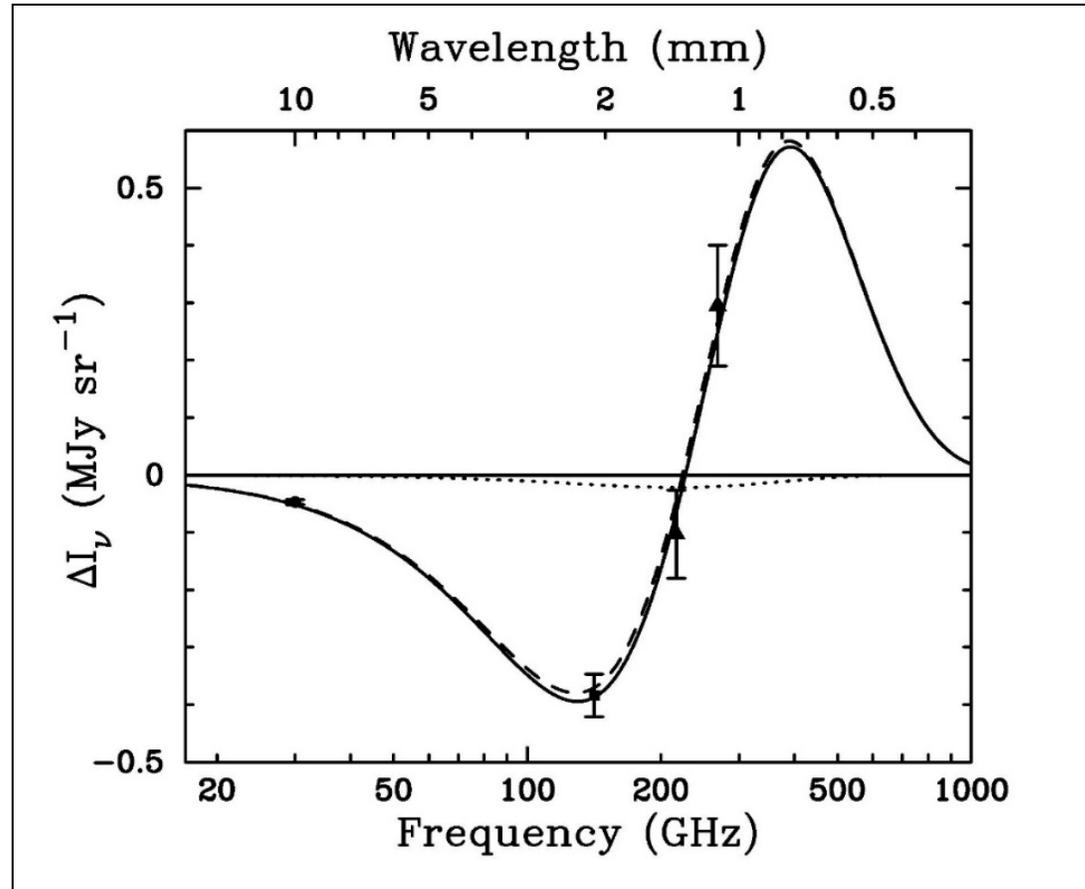
$$h(x) = \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2},$$

Black body からのずれ具合



多波長観測することで原理的には両者は分離可能。

Thermal vs Kinematic SZ



Dashed: best fit thermal SZ
Dotted: best fit kinematic SZ
Solid: thermal+kinematic



$$y = 3.56^{+0.41+0.27}_{-0.41-0.19} \times 10^{-4}$$
$$v = 410^{+1030+460}_{-850-440} \text{ km s}^{-1}$$

The measured SZ spectrum of A2163
(Holzapfel et al 1997; LaRoque et al. 2002)

(Thermal) SZE vs X-ray

$$I_X \propto \int n_e^2 T_e^{-1/2} dl$$

$$I_{SZ} \propto \int n_e T_e dl$$

X線は密度構造、SZEは圧力構造の良いprobe。

両者を組み合わせるとイメージングデータのみから温度の情報を求められる。

$$I_X \propto (1+z)^{-4}$$

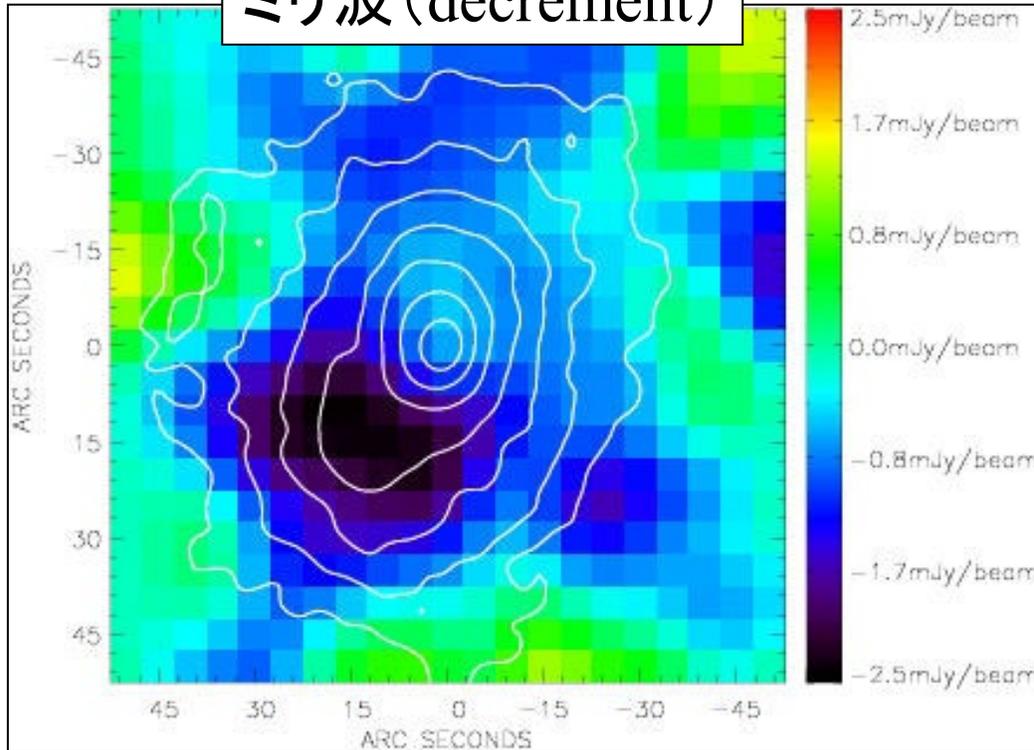
$$I_{SZ} \propto (1+z)^0 \quad (U_{CMB} \propto (1+z)^4 \text{ のため})$$

high z object にはSZEが相対的に有利

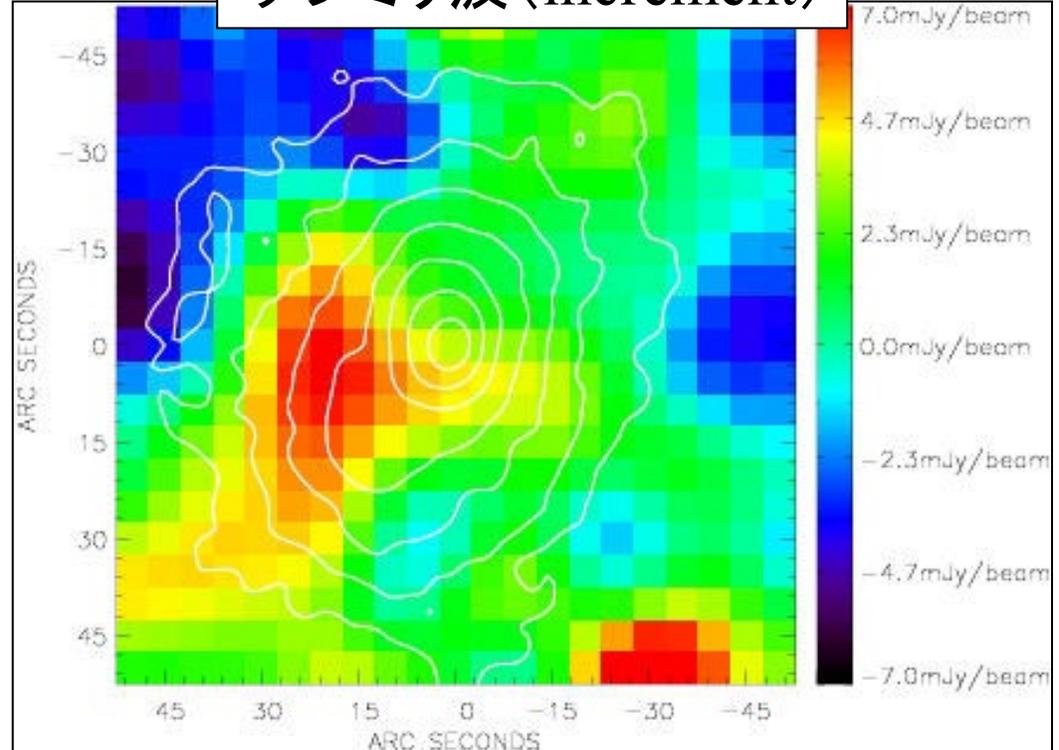
z~1付近の遠方銀河団ではX線のスペクトル解析で温度分布を出すのは難しい。SZ+Xのジョイントイメージ解析が現状唯一の可能性

SZE vs X-ray maps of RX J1347.5-1145

ミリ波 (decrement)



サブミリ波 (increment)



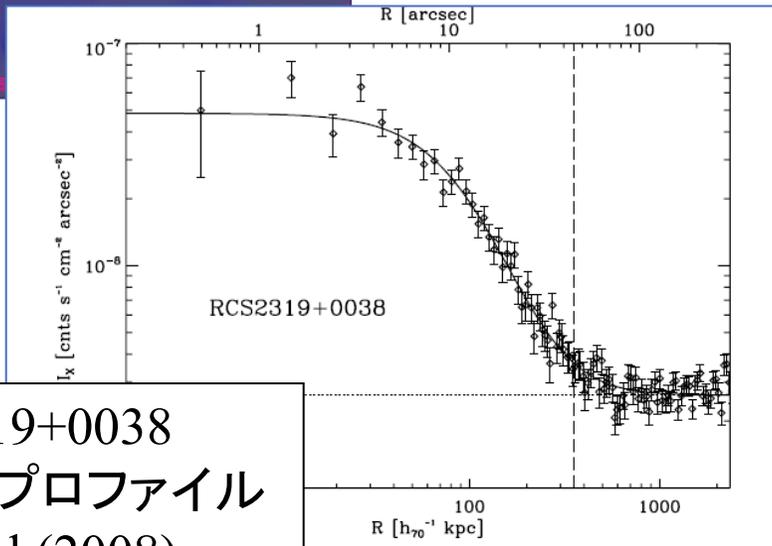
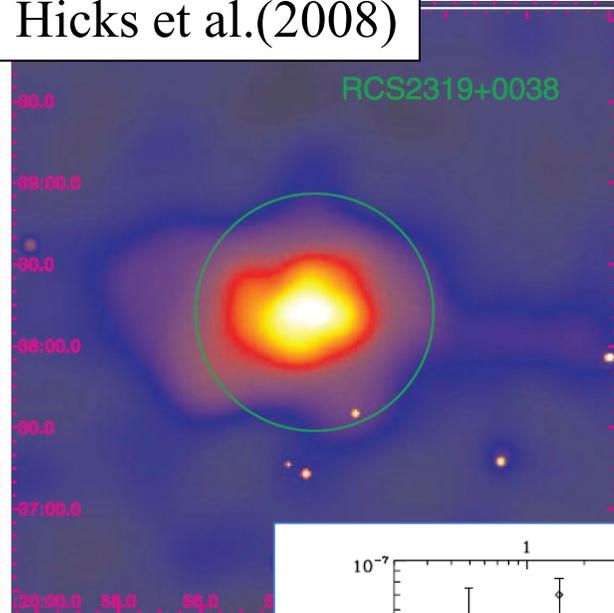
150GHz, NOBA on Nobeyama 45m
13'' beam, 15'' smoothing
(Komatsu et al. 2001)

Contours: Chandra X-ray (Allen et al. 2002)

350GHz, SCUBA on JCMT 15m
15'' beam, 15'' smoothing
(Komatsu et al. 1999)

観測天体 (RCS J2319+0038, HSC J0947-0119)

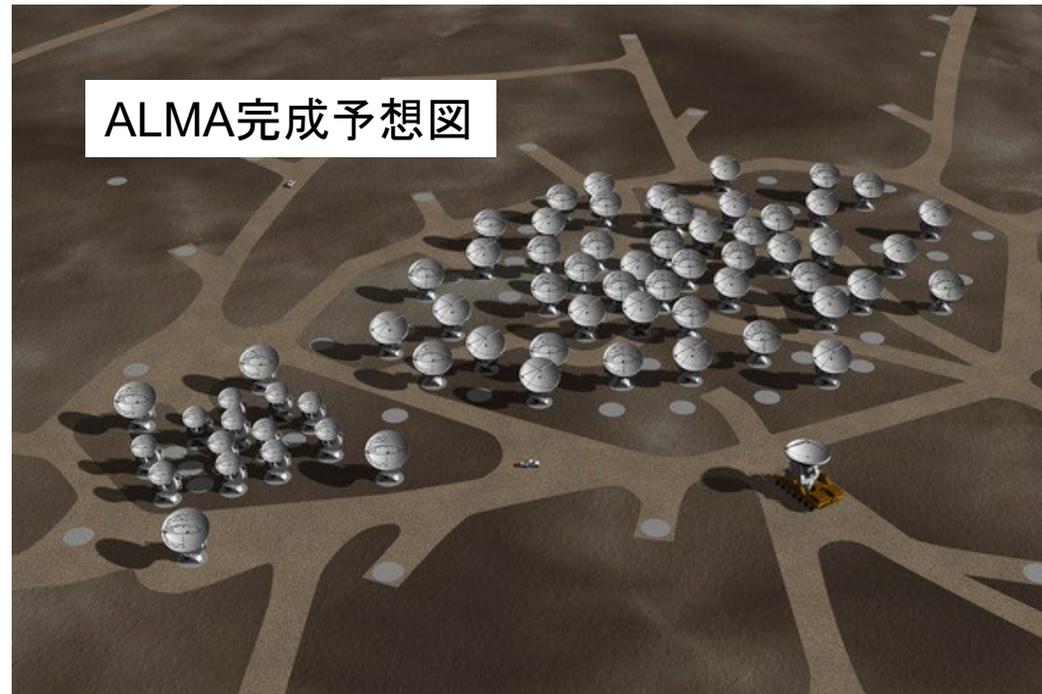
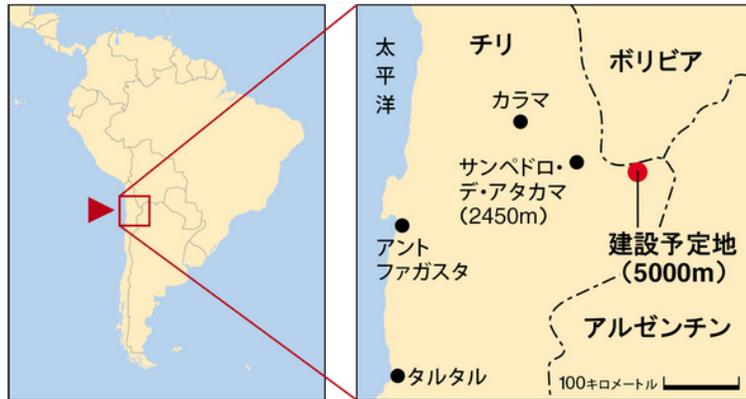
RCS J2319+0038
X線イメージ
Hicks et al.(2008)



RCS J2319+0038
X線強度プロファイル
Hicks et al.(2008)

- RCS J2319+0038
 - Red-Sequence Cluster Survey (Gladders & Yee 2005) で発見
 - $z=0.90$
 - Chandra でガス密度分布と平均温度 ($kT = 6.2_{-0.8}^{+0.9}$ keV) が得られている。
- HSC J0947-0019
 - Hyper-Suprime-Cam Subaru Strategic Program (Miyazaki et al. 2018) で発見 (やり方は Red-Sequence を用いている)
 - $z=1.11$
 - X線観測データはなし

Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA)



- ミリ波・サブミリ波で最高の感度・分解能を誇る電波干渉計
- 12m-Array (50台)、7 m-Array(12台 + 12mを4台)
- 2011年より初期運用開始、2013年より本格運用
- 東アジア、米、欧、チリによる国際共同プロジェクト

観測

Table 1. Summary of ALMA observations.

	RCS J2319+0038		HSC J0947-0119	
	12 m	7 m	12 m	7 m
Project code	2019.1.00673.S		2018.1.00680.S	
Field center	(23 ^h 19 ^m 53 ^s .280, 0°38'13"400)		(9 ^h 47 ^m 58 ^s .565, -1°20'05"780)	
Number of pointings	7	7	7	7
Observation start	2019 Nov 15	2019 Oct 22	2019 Jan 14	2018 Nov 28
Observation end	2019 Nov 22	2020 Jan 2	2019 Jan 20	2019 May 13
Total on-source time [h]	12.1	78.6	8.0	64.5
Number of antennas	43-47	9-11	46-51	9-12
Central frequency [GHz]	92	92	92	92
Band widths [GHz]	7.5	7.5	7.5	7.5
Baseline coverage [kλ]	4.2-147	2.5-16.3	4.2-120	2.5-16.3

- 2018年11月－2019年11月にかけて観測。

- RCS J2319

12m-array ~12.1h

7m-atrray ~78.6h

- HSC J0947

12m-array ~8.0h

7m-atrray ~64.5h

- Band3

- 中心波長 92GHz

- 帯域幅7.5GHz

- 合成ビームサイズ

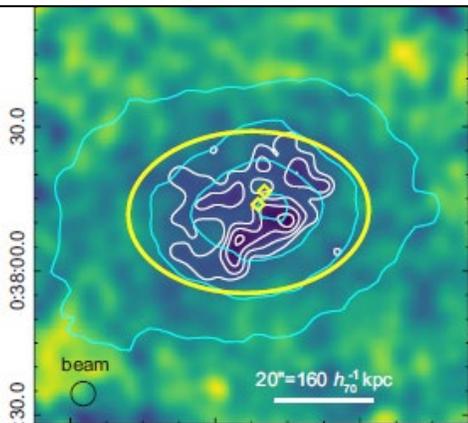
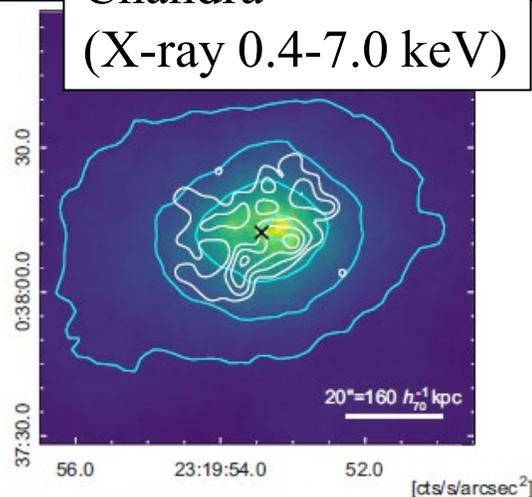
- おおよそ3.7"x3.3"

Table 2. Properties of the synthesized images from a range of baselines.

	RCS J2319+0038				HSC J0947-0119			
	>15kλ	12 m	7 m	All*	>15kλ	12 m	7 m	All*
Beam major axis FWHM ["]	3.14	3.60	18.7	3.76	3.16	3.63	17.8	3.77
Beam minor axis FWHM ["]	2.82	3.25	11.9	3.38	2.71	3.11	11.2	3.22
Beam position angle [°]	82.2	82.6	-86.1	82.5	-90.0	-89.1	-84.4	-89.1
Average 1σ noise [μJy beam ⁻¹]	5.6	5.0	19.4	4.8	5.8	5.1	21.0	5.0

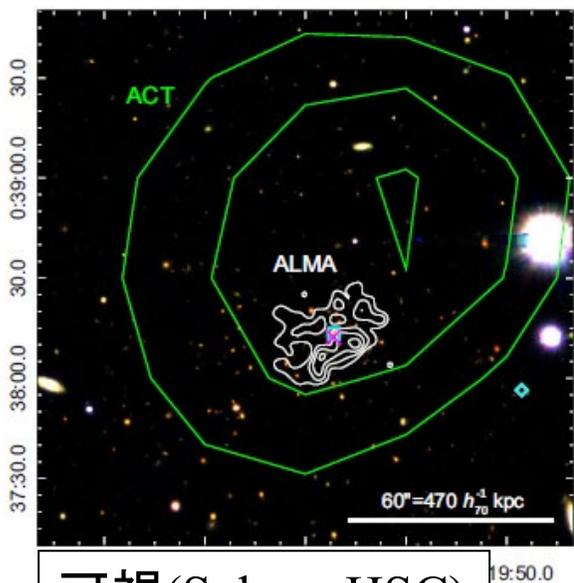
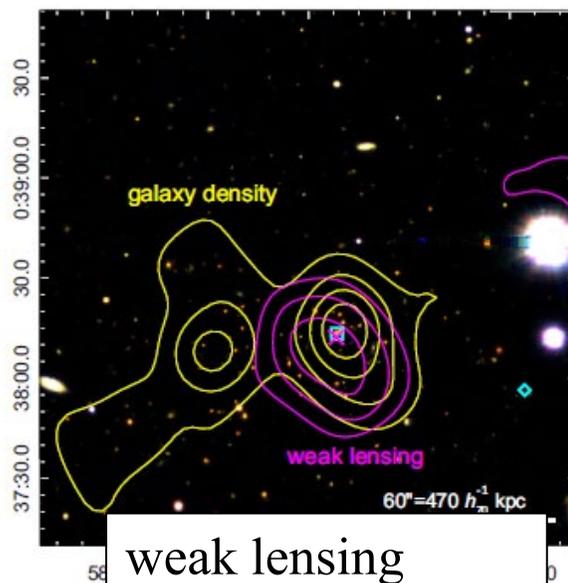
*The 1σ noise for all baselines after smoothing to 5" FWHM is 5.8 μJy beam⁻¹ and 5.9 μJy beam⁻¹ for RCS J2319+0038 and HSC J0947-0119, respectively.

ALMA SZE(92GHz)

Chandra
(X-ray 0.4-7.0 keV)

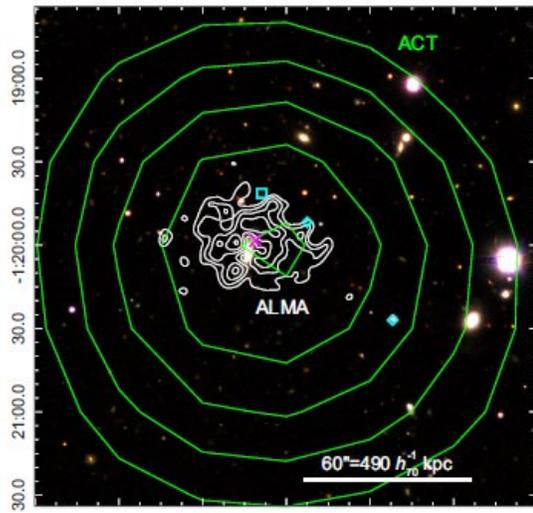
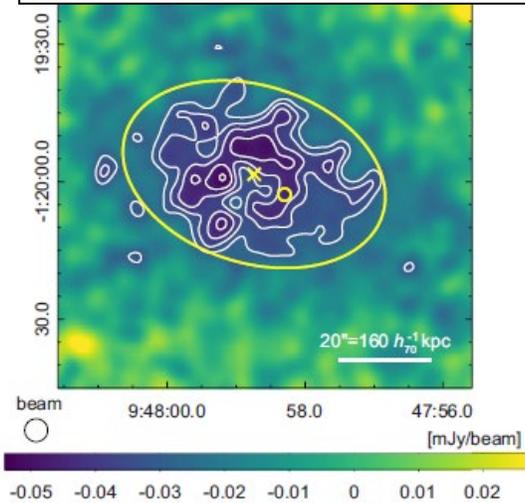
RCS J2319+0038: Multi-wavelength view

- ALMAのSZEマップ、ChandraのX-ray imageは位置と形状（楕円の軸比、方位角）でおおむね一致。
- galaxy distributionのメインコンポーネント、weak lensing signal (marginally detected) の位置もおおむね一致。
- $M_{500} = 3.6_{-2.2}^{+4.6} \times 10^{14} h_{70}^{-1} M_{\odot}$
- ACTのSZEは有意にずれている。ただし検出の有意度がそもそも低く、CMBの空間変動で説明がつく。

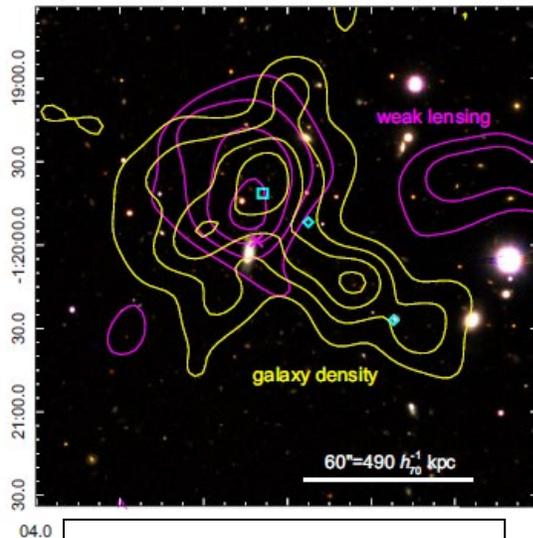
可視(Subaru HSC)
ACT (SZE)weak lensing
galaxy distribution

HSC J0947-0119: Multi-wavelength view

ALMA SZE(92GHz)

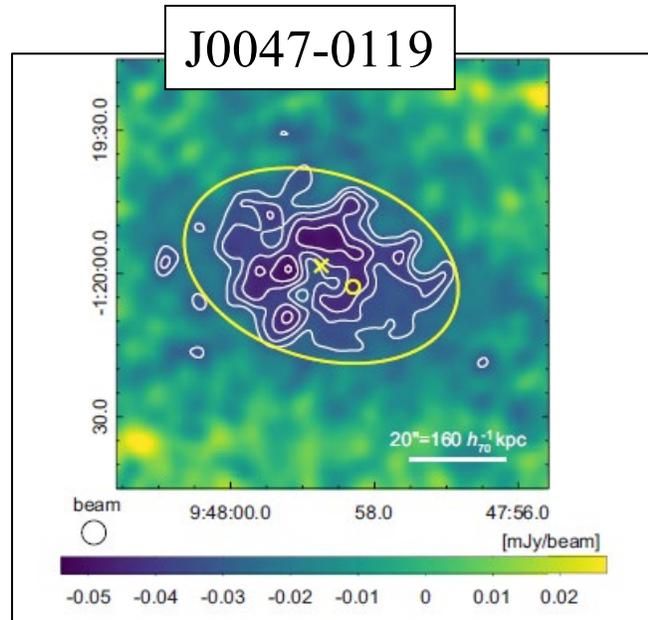
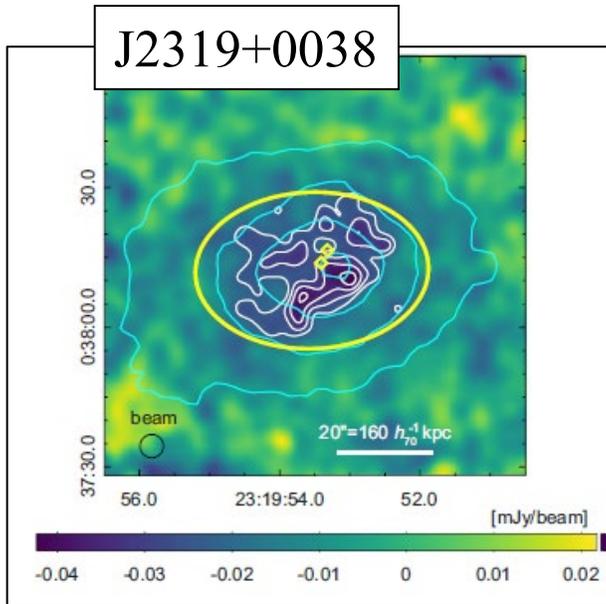


可視(Subaru HSC)
ACT (SZE)



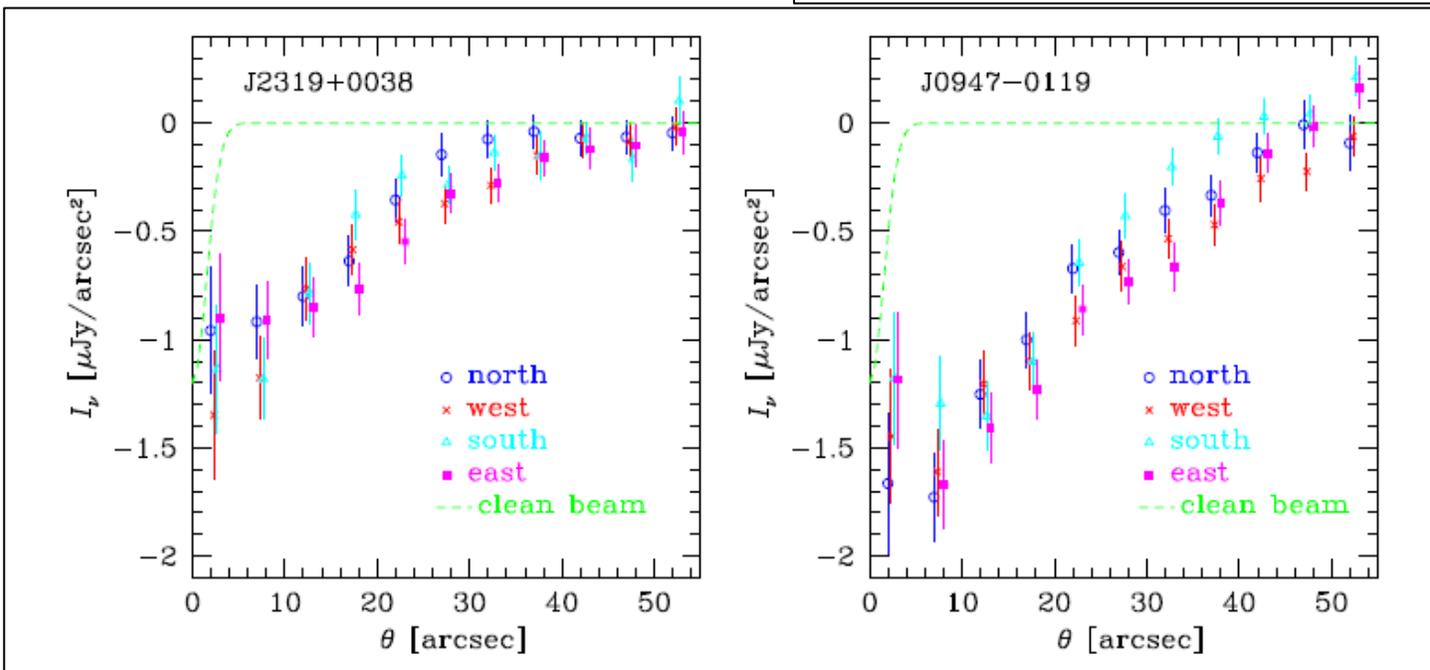
weak lensing
galaxy distribution

- ALMAのSZEマップの形状は楕円状
- ALMAのSZマップ、 galaxy distributionのメインコンポーネント、 weak lensing signal (marginally detected)の位置もおおむね一致。
- $M_{500} = 2.6_{-1.4}^{+3.2} \times 10^{14} h_{70}^{-1} M_{\odot}$
- ACTのSZEの位置もおおむね一致。



Azimuthally averaged SZE profile

- 東西南北4方向に分けて方位角方向で平均化したSZE profileを比較
- おおよそ東西方向に伸びた形状の楕円体
- 二次元楕円ガウス分布フィットからも確認



	Major axis FWHM ["]	Minor axis FWHM ["]	Position angle [°]
RCS J2319+0038	49.8 ± 4.8	33.6 ± 3.2	92.0 ± 9.7
HSC J0947-0119	58.6 ± 3.5	38.7 ± 2.3	72.3 ± 5.5

楕円モデルを用いた解析

- X線表面輝度分布を楕円ベータモデルでフィット

$$S(\vec{\theta}) = S_0 \left[1 + \left(\frac{\bar{\theta}}{\theta_c} \right)^2 \right]^{-3\beta + \frac{1}{2}}, \quad \bar{\theta} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{q}} & 0 \\ 0 & \sqrt{q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{pmatrix},$$

$q(<1)$ ---長軸と短軸の比、 ψ ---長軸の position angle

S_0 [counts s ⁻¹ arcsec ⁻²]	β	θ_c ["]	q	ψ [°]
$(2.64^{+0.21}_{-0.20}) \times 10^{-5}$	$0.673^{+0.034}_{-0.032}$	$13.2^{+1.4}_{-1.2}$	$0.694^{+0.036}_{-0.034}$	96.7 ± 3.9

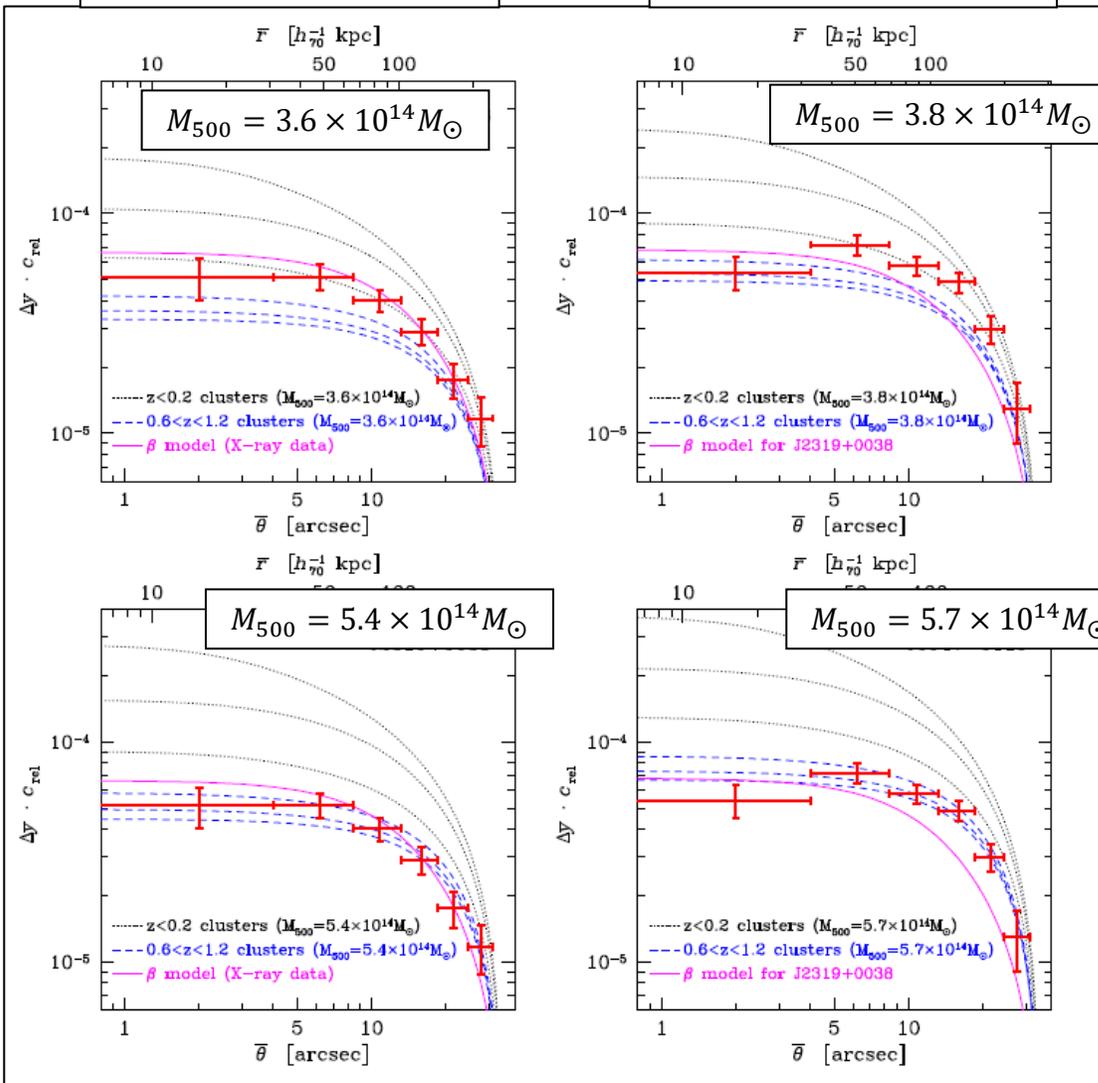
- 三次元構造は奥行き方向の軸比を仮定したガス密度モデル

$$n_e(\vec{r}) = n_{e0} \left[1 + \frac{\bar{\theta}^2 + (\phi/\eta)^2}{\theta_c^2} \right]^{-\frac{3}{2}\beta}, \quad \text{軸比は} \quad \sqrt{q} : \frac{1}{\sqrt{q}} : \eta$$

圧力プロファイルの比較

RCS J2319+0038

HSC J0947-0119



- generalized NFW pressure profile と比較
- 黒点線： $z < 0.2$ X-ray selected cluster (Arnaud et al. 2010)。
- 青破線： $0.6 < z < 1.2$ SZE selected cluster (McDonald et al. 2014)
- 線が3本あるのは上からcoolcore, all, non-coolcore
- 重力レンズで得た M_{500} だと合わない（上段）。1.5倍程度重くすると合う（下段）
- J2319--- $0.6 < z < 1.2$ のサンプルと合う
- J0947---- $0.6 < z < 1.2$, non-coolcoreが良さそう。

Deprojection analysis

- RCS J2319+0038についてX線とSZのデータを用いてdeprojection

---> kT , n_e の楕円 profile

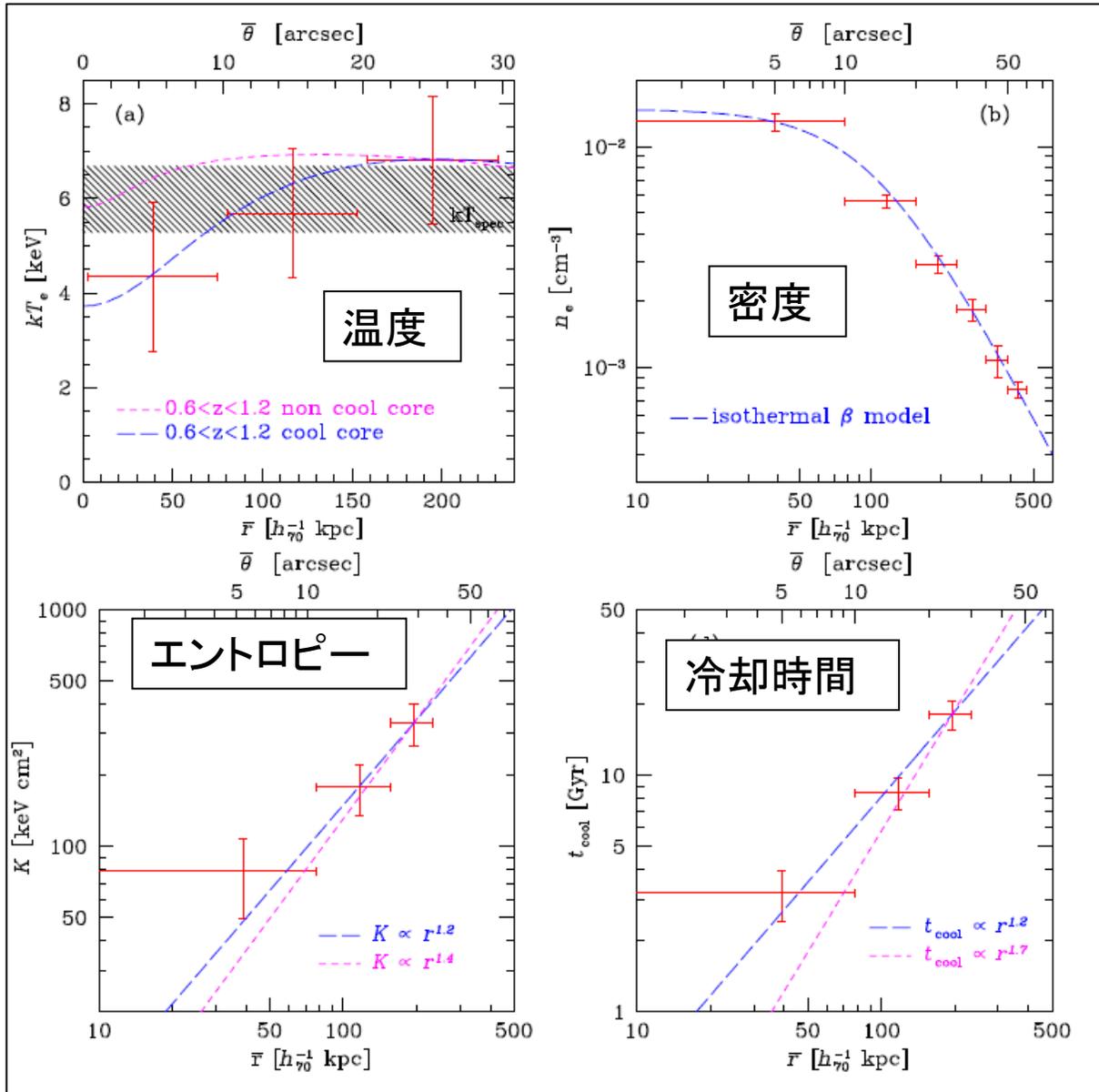
0.6<z<1.2のcool core (McDonald et al. 2014)にあう。

- $K = kT_e n_e^{-\frac{2}{3}}$

- $t_{cool} = \frac{3(n_e + n_H + n_{He})kT_e}{2 n_e n_H \Lambda_{bol}}$

Λ_{bol} : 熱制動放射 + line emission

エントロピーや冷却時間からは弱めのcool coreがあるように見える。



Summary

- 遠方銀河団RCS J2319+0038($z=0.9$)およびHSC J0947-0119($z=1.1$)にたいしてALMA Band3(92GHz)を用いてSZEのイメージング観測を行った。
- X-ray(Chandra, RCS J2319のみ)、SZE(ACT)、可視光 & 弱重力レンズ(Subaru)のデータとも比較を行った。
- SZEとX-rayイメージに対して楕円体モデルを用いてdeprojectionをおこなった ($z>0.9$ の天体では初の試み)。
 - 両天体に対して圧力プロファイルを求めた。
 - RCS J2319に対して温度 & ガス密度プロファイルを求め、さらにエントロピーと冷却時間も調べた。
- RCS J2319は (近傍に比べて) 弱いcool coreを持っている可能性が高い。
- HSC J0947はnon cool core銀河団の可能性が高い。
- ALMAによる高空間分解能SZE観測が遠方銀河団ガスの物理状態を調べるのに有効であることを示した。