

JVLA S-band and X-band Polarimetry of Abell 2256

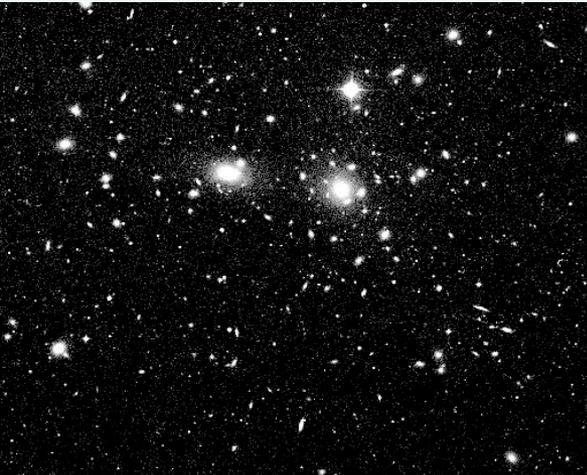
Ozawa,,,,,Takizawa, Takahashi,,,,et al.
to be submitted to PASJ

滝沢元和

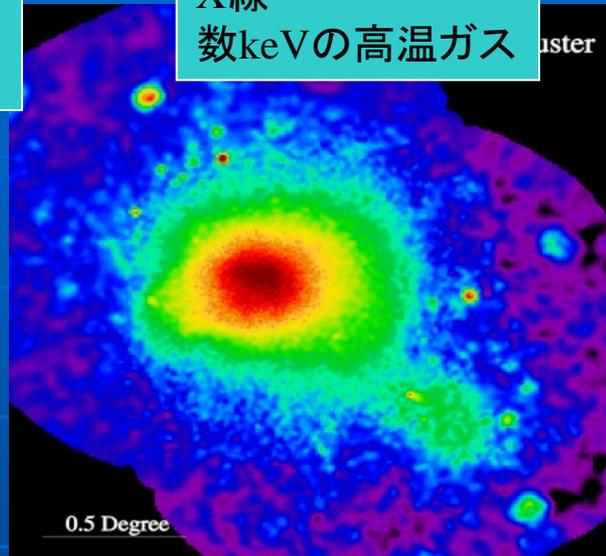
2015.5.8
研究室談話会

Introduction: 銀河団

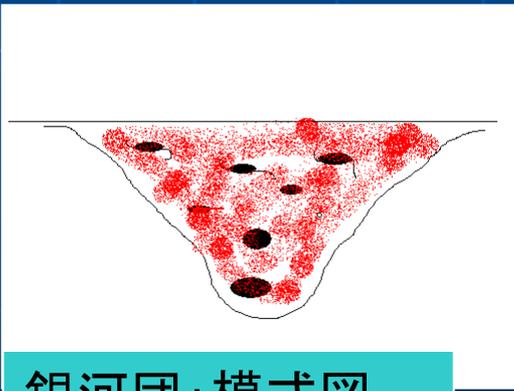
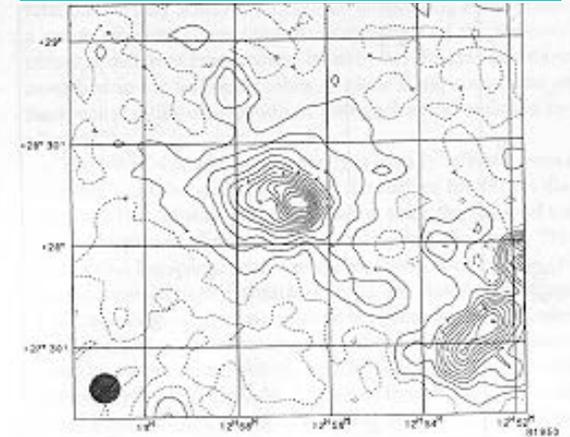
可視光
(数100個の銀河の集まり)



X線
数keVの高温ガス



(シンクロトロン)電波
数GeVの高エネルギー電子
 μG 程度の磁場



銀河団: 模式図

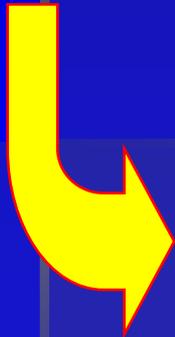
- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ($T \sim 10^7 - 8 \text{K}$) と銀河の集団。
- 宇宙で最大のビリアライズした天体 ($R \sim \text{Mpc}$, $M \sim 10^{14-15}$ 太陽質量)
- 宇宙の構造形成の (観測可能な) 現場
- プラズマ物理の実験場 (理想的な無衝突プラズマ)
- 暗黒物質の実験場 (重力レンズ、self-interacting dark matter など)
- 高エネルギー粒子や磁場も重要かつおもしろい。

Observational Evidence of Intracluster Magnetic Field (1): Radio Halos / Relics

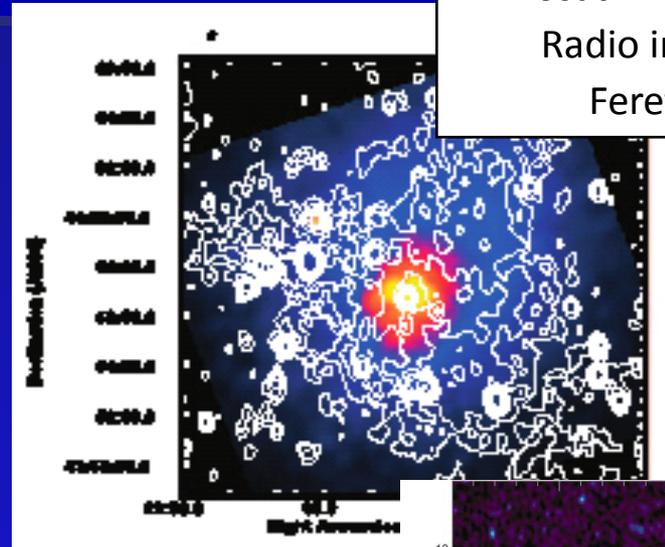
Non-thermal radio emission from merging clusters of galaxies

synchrotron radio

$\gamma \sim 10^4$ electrons + 0.1-10 μG B



Hard X-ray will be emitted through Inverse Compton with CMB



Abell 2319 with Radio Halo

Rosat X-ray image (colors)

Radio image (contours)

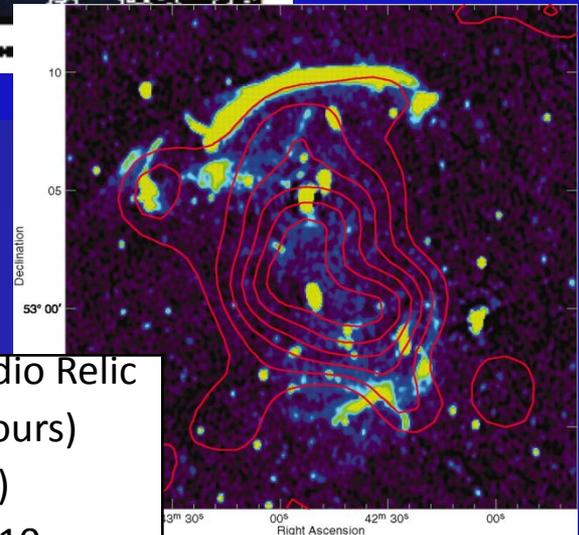
Feretti et al. 1997

CIZA J2242.8+5301 with Radio Relic

Rosat X-ray image (contours)

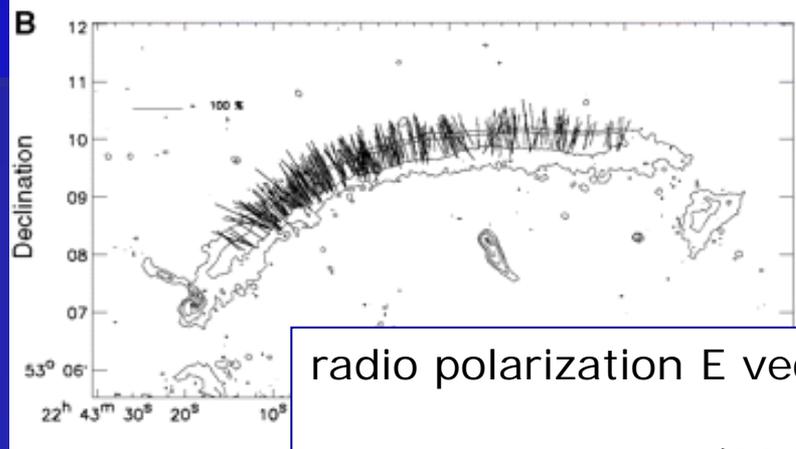
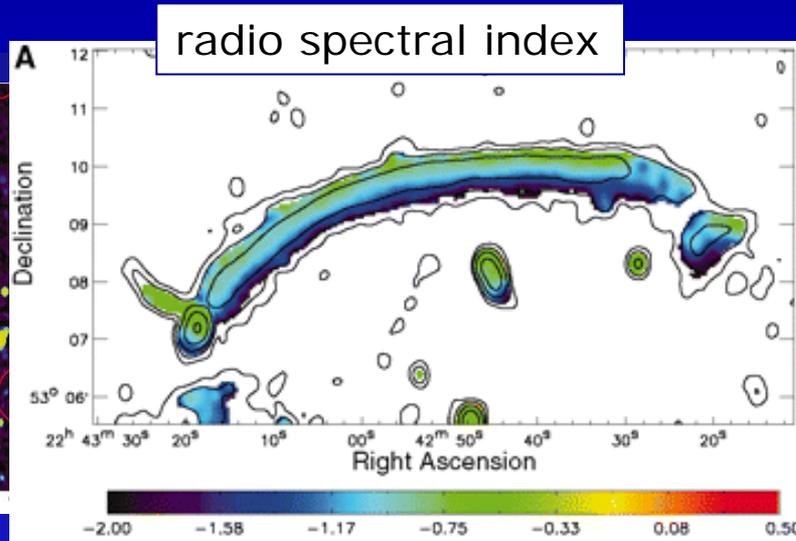
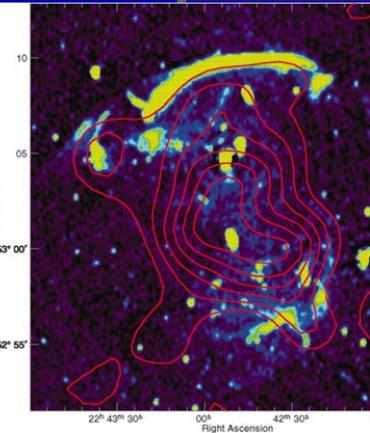
Radio image (colors)

Van Weeren et al. 2010

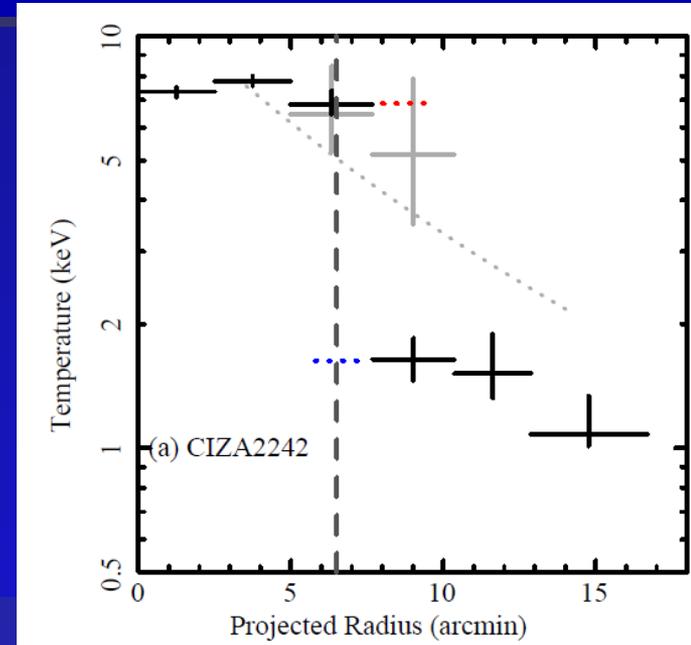


Radio relic in CIZA J2242.8+5301

aligned magnetic fields parallel to a shock front ?



radio polarization E vector
van Weeren et al. (2010)



kT profile across the relic
with Suzaku

Akamatsu & Kawahara
(2011)

磁場決定方法: Faraday Rotation(1)

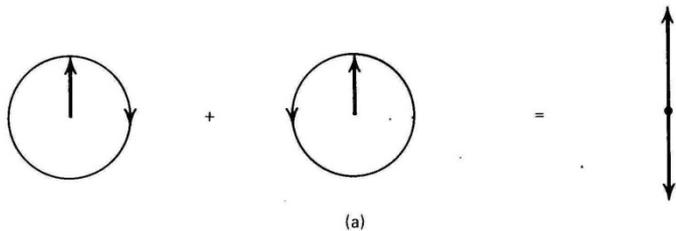


Figure 8.1a Decomposition of linear polarization into components of right and left circular polarization.

直線偏光した電磁波



磁化した
プラズマ
 B, n



偏光面が回転

$$\Delta\theta = \frac{2\pi e^3}{m^2 c^2 \omega^2} \int_0^d n B_{\parallel} ds.$$

波長(振動数)依存あり
多波長観測で nB_{\parallel} がわかる

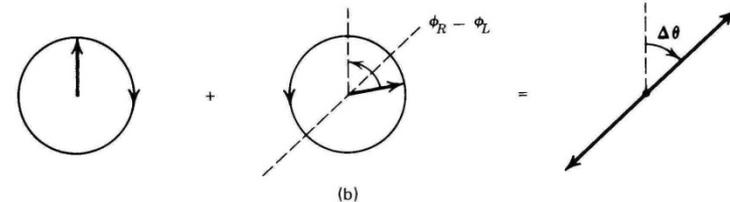


Figure 8.1b Faraday rotation of the plane of polarization.

磁場決定方法: Faraday Rotation(2)

偏光源



天体での偏光

磁化したプラズマ
 B, n
磁場はランダム
 B_{\parallel} は+になったり
-になったり、



観測される偏光

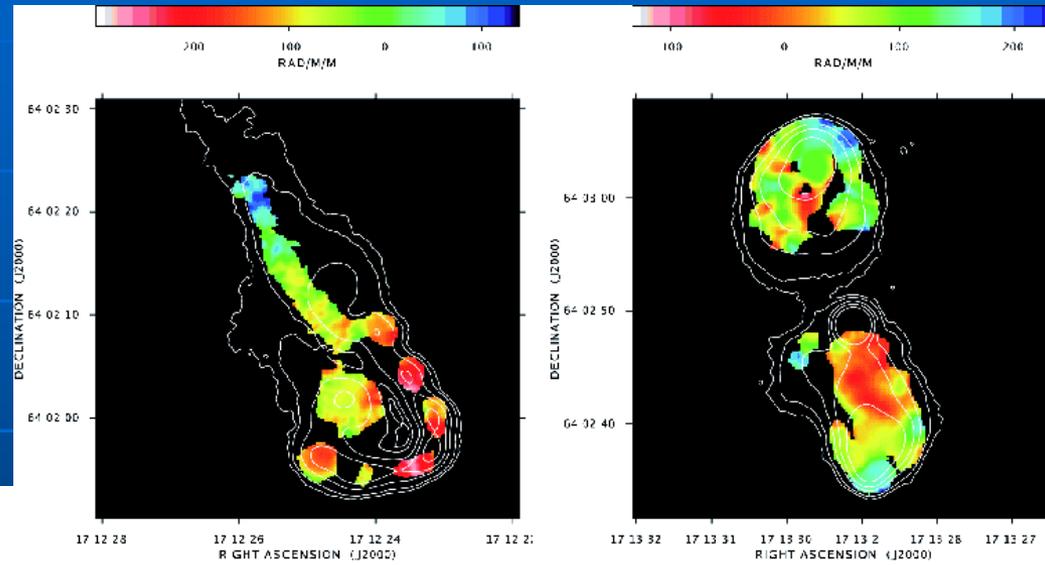
$$\Delta\theta = \frac{2\pi e^3}{m^2 c^2 \omega^2} \int_0^d n B_{\parallel} ds.$$

Observational Evidence of Intracluster Magnetic Field (2): Faraday Rotation

- Polarized plains of linear polarized radio wave rotate when propagating through the magnetized plasma.

$$\Delta\theta = \frac{2\pi e^3}{m^2 c^2 \omega^2} \int_0^d n B_{\parallel} ds.$$

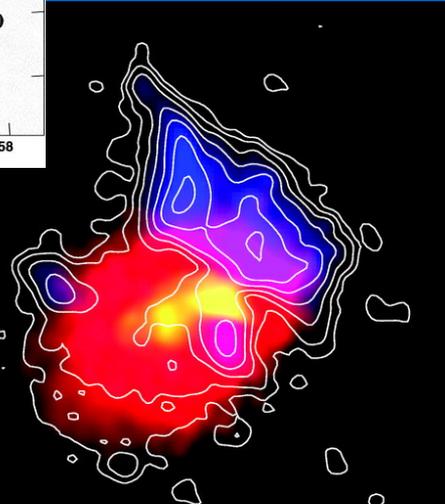
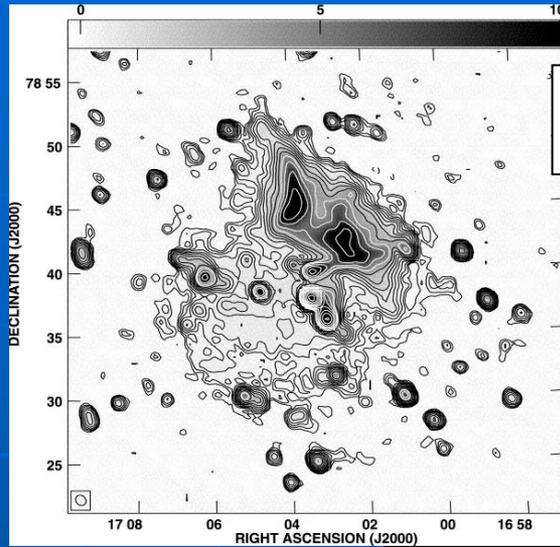
- Polarized radio sources observations in and behind clusters suggest random magnetic field structures.



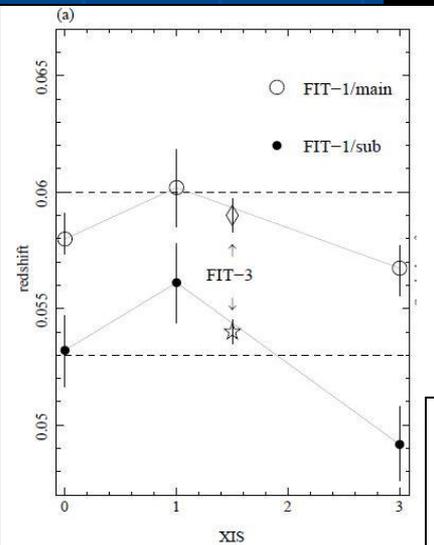
Faraday rotation measure map of the radio sources in Abell 2255
Color: FRM
Contour: radio
Govoni et al. 2006

Abell 2256

- 近傍 ($z=0.0581$) にある非常に有名な衝突銀河団
- 銀河の視線速度で二成分 (Berrington et al. 2002)
- X線で明確な二つのピーク (Briel et al. 1991 など)
- 銀河団でのガスの内部運動 ($\sim 1500\text{km/s}$) が直接検出された唯一例 (Tamura et al. 2011)
- 電波ハロー & レリックが存在 (Clarke & Ensslin 2006 など)



X-ray (red&yellow)
1369MHz (blue&contours)
(Clarke&Ensslin 2006)



Observations

Table 1. Details of the VLA & JVLA observations of Abell 2256.

Frequency*	Bandwidth*	Config.*	Date	Time*	Project*
(MHz)	(MHz)			(h)	
1369/1417	25/25	D	1999-Apr-28	5.9, 5.9	AC0522
1513/1703	12.5/25	D	1999-Apr-29	3.5, 5.5	
1369/1417	25/25	C	2000-May-29	2.5, 2.5	AC0545
1513/1703	12.5/12.5	C	2000-May-29	3.6, 3.6	
1369/1417	25/25	C	2000-Jun-18	2.5, 2.5	
1513/1703	12.5/25	C	2000-Jun-18	4.1, 3.5	
16 windows [†]	128	C	2013-Aug-25	1.2	13A-131
S-band			2013-Aug-26	1.2	
			2013-Aug-29	1.2	
16 windows [‡]	128	C	2013-Aug-18	1.3	13A-131
X-band			2013-Aug-19	1.3	

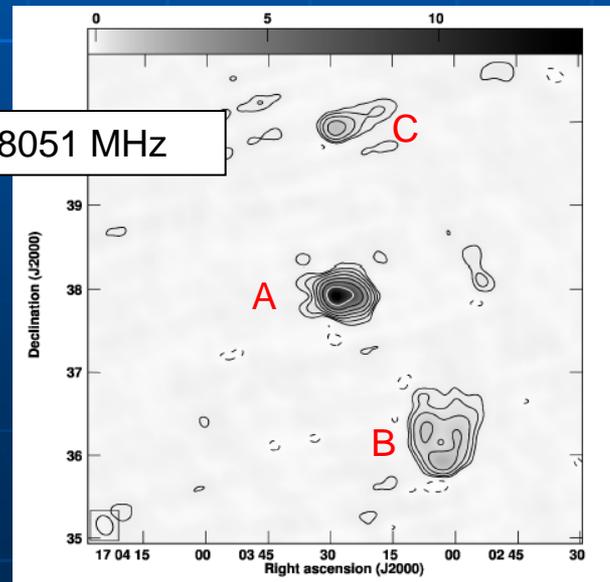
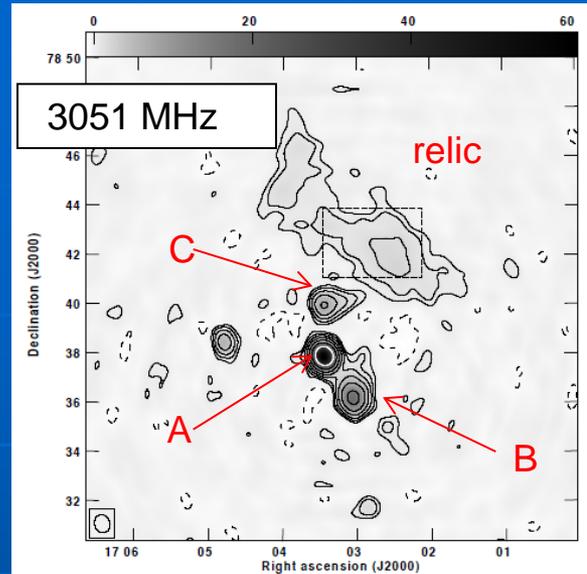
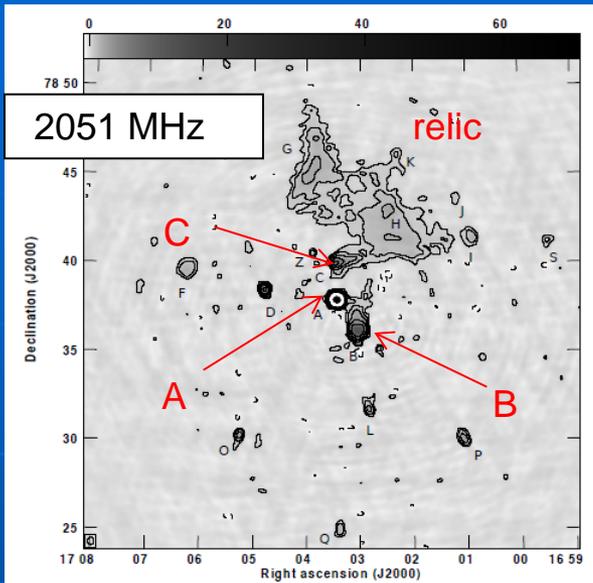
* Column 1: observing frequency; Column 2: observing bandwidth; Column 3: array configuration; Column 4: dates of observation; Column 5: time on source; Column 6: NRAO project code.

[†] 2051/2179/2307/2435/2563/2691/2819/2947/3051/3179/3307/3435/3563/3691/3819/3947.

[‡] 8051/8179/8307/8435/8563/8691/8819/8947/9051/9179/9307/9435/9563/9691/9819/9947.

- 主目的: 多波長偏光観測でローテーションメジャーなどを測定して磁場を探る。
- S-band (2051-3947MHz)
- X-band (8051-9947MHz)
2013年8月にJVLAで観測 (PI: 赤堀)
- L-band (1369-1703MHz) のVLA時代のアーカイブデータも使用

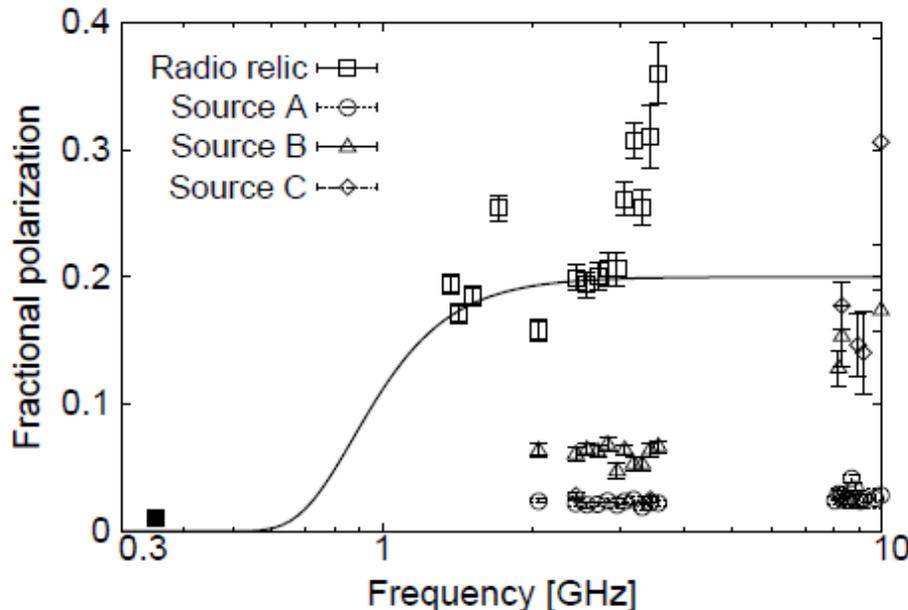
Radio images



- relic, source A--Z (電波銀河などの点源、明るい順にラベルされている)
- S-bandではrelic, A, Bから偏光成分が受かる
- X-bandではAからのみ偏光成分が受かる(relicは視野外)。

偏光度の周波数依存性

$$\text{FPOL} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}$$



偏光度の周波数依存性、四角がレリック
 実線は $\text{FPOL} = p \exp(-S)$, (Burn(1996)のEFD)
 p : intrinsic FPOL, $S = 2\sigma_{\text{RM}}^2 \lambda^4$

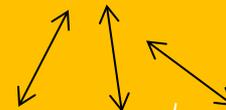
- レリックの偏光度が二段 (~0.8GHz, ~3GHz)の階段状の波長依存性を持つ？
- 乱れた磁場のため偏波解消が起きている??
- 単純なExternal Faraday dispersion (EFD)では再現できない。
- 視線方向に偏波解消成分が二つ以上???

単純なEFD

偏光源
(電波レリック)



乱れた磁場を持った
プラズマ(ICM)



Rotation Measure

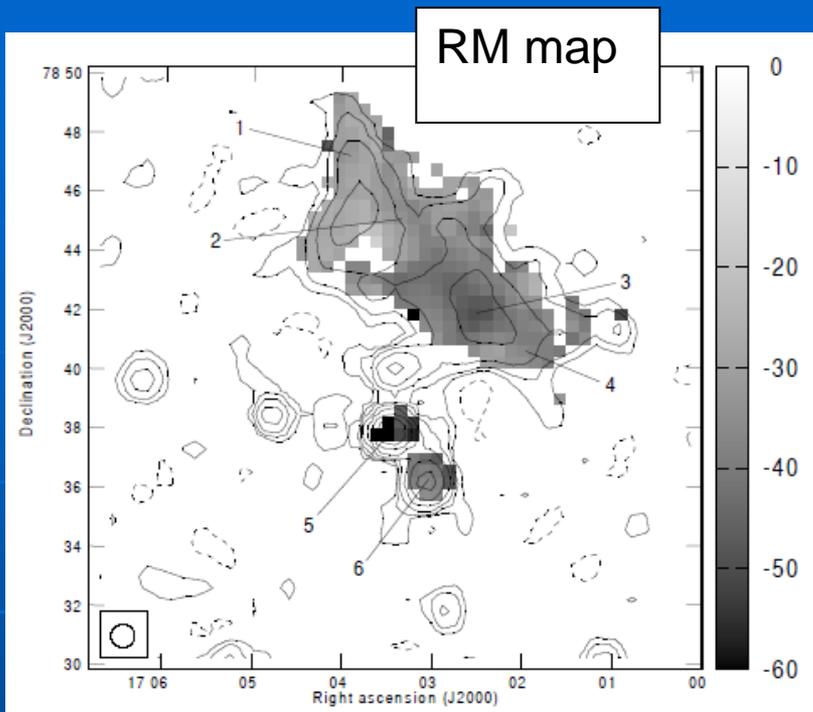
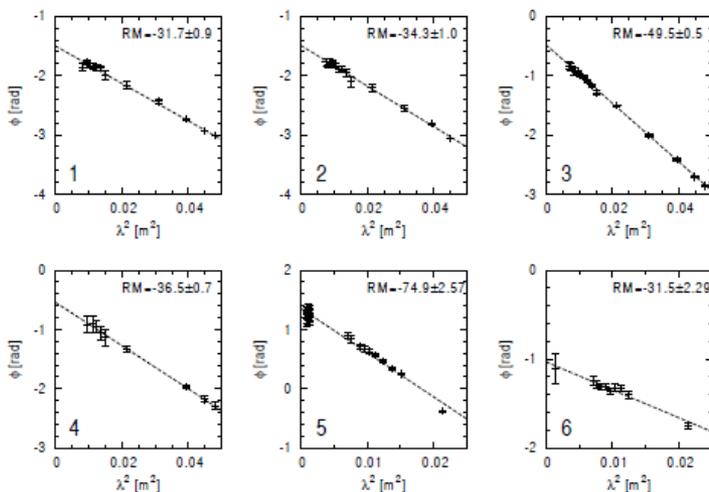


Table 3. The average and standard deviation of RM.

Target	$\langle \text{RM} \rangle^*$ rad m ⁻²	σ_{RM}^* rad m ⁻²	reference
Relic	-44	7	Clarke & Ensslin (2006)
Relic	-34.5	6.2	this work
Source A	-24.9	65.5	this work
Source B	-34.1	10.5	this work

* $\langle \text{RM} \rangle$ and σ_{RM} are the average and standard deviation of RM, respectively.

代表的な点での ϕ vs λ^2



- $\langle \text{RM} \rangle \sim -30 \text{ rad/m}^2$
Galacticな寄与と考えて矛盾なし。
- Relicの σ_{RM} が妙に小さい。手前側にある??

Depolarization toward the Radio Relic

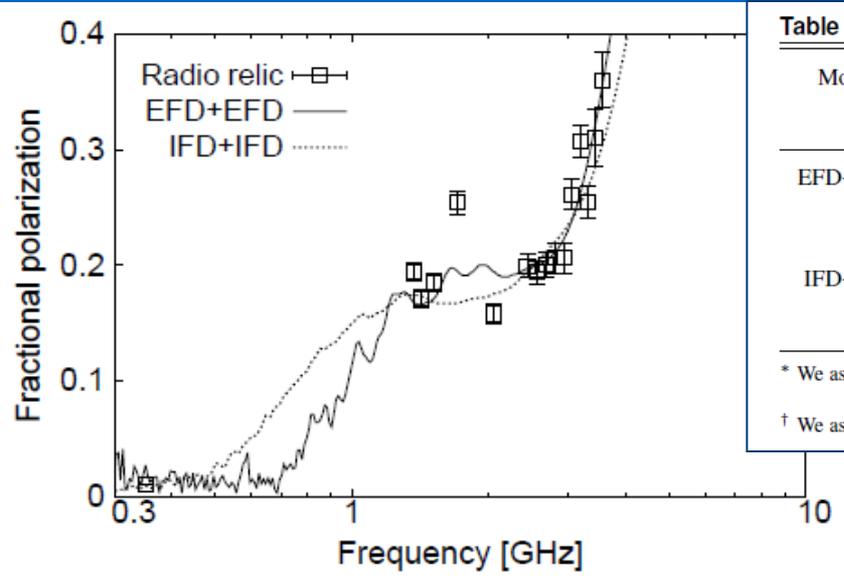


Table 4. Parameters for the Depolarization Models.

Model	Component	B [μG]	n_e [10^{-3} cm^{-3}]	Δl [kpc]	$N_X \times N_Y$ [kpc \times kpc]	N_Z [kpc]	Intensity	σ_{RM} [rad m^{-2}]
EFD+EFD	foreside	0.3	3.0	1*	50×50 *	500	1	6.3
	backside	5	10.0			25^\dagger	5	128.5
IFD+IFD	foreside	0.5	1.0	1*	50×50 *	500	1	5.2
	backside	10	10.0			25^\dagger	4.5	228.3

* We assume 50×50 kpc since the beam size of $47''$ corresponds to ~ 52 kpc.

† We assume that the thickness of the radio relic is 25 kpc (Owen et al. 2014).

EFD+EFD

偏光源
(レリック内部)

偏波解消成分
(レリック内部)

偏光源
(レリック内
部???)

偏波解消成分
(ICM or
Galactic???)



IFD+IFD

偏光源かつ
偏波解消成分
(レリック)

偏光源かつ
偏波解消成分
(ICM or Galactic???)



Faraday Tomography

レリックの
QU-fit

黒線は二成分モデル
グレーは一成分モデル

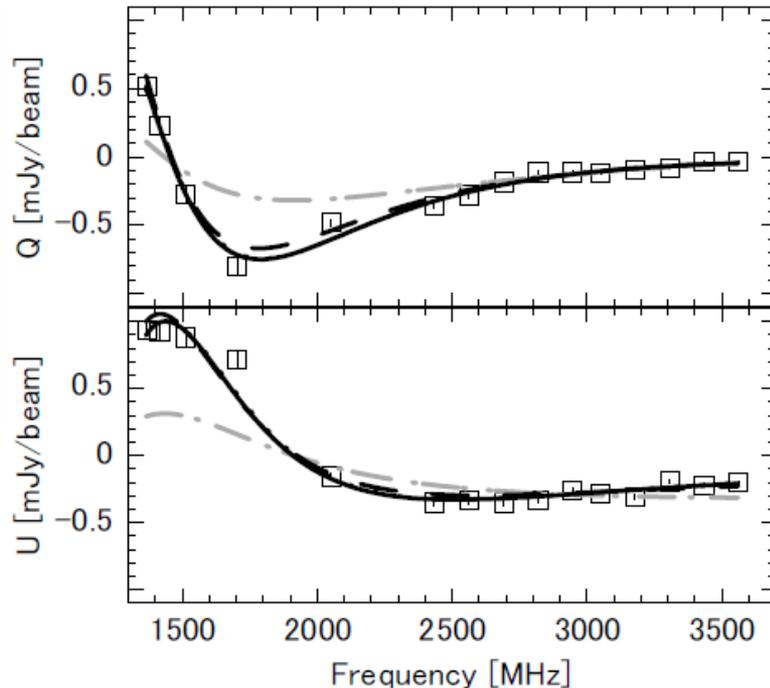


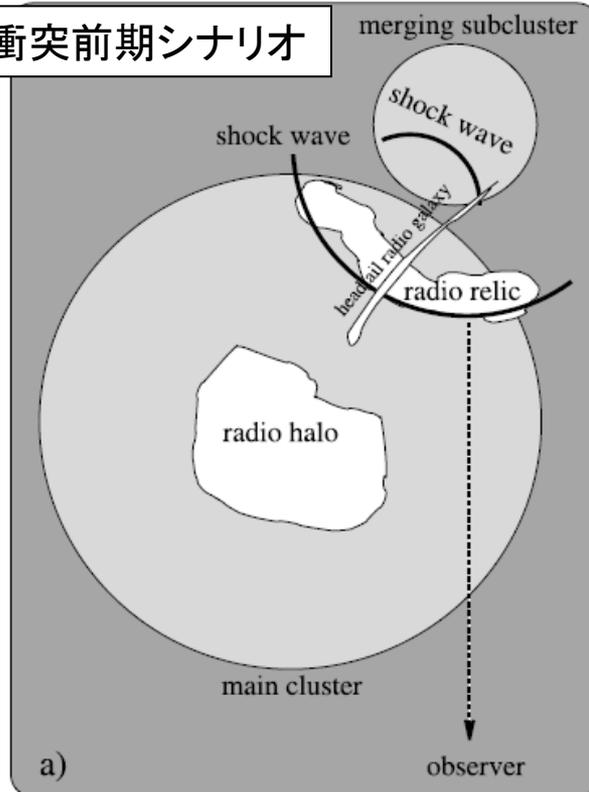
Table 5. The reduced chi-square (RCS), the Bayesian information criterion (BIC), and best-fit values and $1-\sigma$ confidence regions for model parameters in the QU-fit.

Model	RCS	BIC	ϕ	Amp.	χ_0	Width
Delta function	38.8	1173.1	$-41.29^{0.713}_{-0.688}$	$0.32^{0.005}_{-0.005}$	$-0.56^{0.009}_{-0.009}$	
Gaussian	38.8	1176.5	$-41.28^{0.704}_{-0.710}$	$0.32^{0.005}_{-0.005}$	$-0.56^{0.009}_{-0.009}$	$0.00^{0.675}_{0.008}$
two Deltas	5.0	170.0	$-46.71^{0.972}_{-0.971}$	$3.86^{0.207}_{-0.049}$	$0.35^{0.051}_{-0.040}$	
			$-43.74^{0.914}_{-1.111}$	$3.92^{0.107}_{-0.054}$	$-1.22^{0.050}_{-0.039}$	
two Gaussians	3.8	142.0	$-40.87^{3.446}_{-0.722}$	$6.14^{0.106}_{-0.231}$	$0.37^{0.009}_{-0.066}$	$11.99^{3.078}_{-0.959}$
			$-38.25^{3.326}_{-0.805}$	$6.20^{0.090}_{-0.242}$	$-1.20^{0.008}_{-0.064}$	$10.43^{1.851}_{-1.034}$
Delta + Gaussian	3.9	139.6	$-57.53^{1.945}_{-0.528}$	$0.70^{0.357}_{-0.233}$	$0.33^{0.020}_{-0.087}$	
			$-34.43^{3.937}_{-7.701}$	$0.74^{0.343}_{-0.236}$	$-1.26^{0.041}_{-0.154}$	$10.01^{6.586}_{-1.297}$

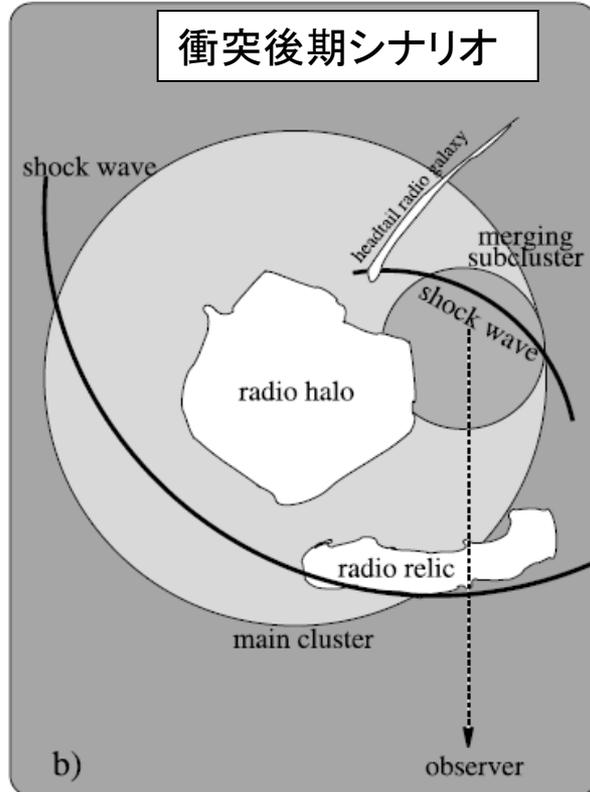
- トモグラフィー (QU-fit, Ideguchi et al. 2014) もやってみた。
- やっぱ Faraday depth の異なる二成分の偏光源が必要。
- (注) QU-fit は偏光角の情報も使っているが、Faraday depth 上の情報しか得られない。

系の幾何形状とrelicの形成シナリオ

衝突前期シナリオ



衝突後期シナリオ



レリックの σ_{RM} が小さいことを考慮すると衝突後期シナリオの方が良さそう。

Clarke&Ensslin(2006)より

Source A,B方向の磁場

磁場は長さごとに向きが変わる
 l: 磁場の反転長

天体の長さ L



磁化した
 プラズマ
 B, n
 磁場はランダム

偏光面の回転角 $\Delta\theta$ はrandom walkすると考えて、
 $\Delta\theta \sim \lambda^2 n B_{\parallel} (lL)^{0.5}$

$$\sigma_{\text{RM}} = \frac{K B n_0 r_c^{1/2} \Lambda_B^{1/2}}{(1 + r^2/r_c^2)^{(6\beta-1)/4}} \sqrt{\frac{\Gamma(3\beta - 0.5)}{\Gamma(3\beta)}}$$

Table 6. Parameters for magnetic field strengths.

Source	X-ray morphology	K	σ_{RM} [rad m ⁻²]	n_0^{\ddagger} [10 ⁻³ cm ⁻³]	r^{**} [kpc]	r_c^{\ddagger} [kpc]	β^{\ddagger}	Λ_B [kpc]	B [μ G]
Abell 2256 A	Irregular	441	65.5	2.6	7.2	587	0.914	20-5	0.63-1.26
Abell 2256 B	Irregular	441	10.5	2.6	133.7	587	0.914	20-5	0.11-0.21

Summary

- 電波レリックスを持った近傍の衝突銀河団Abell 2256をJVLAでS-bandおよびX-bandの多波長偏波観測を行った。
- 電波レリックス方向の偏光度の波長依存性に特徴的な構造が見えた。これは視線方向に偏波解消成分が二つ重なっているとうまく説明できる。
- RMの観測から、電波レリックスは手前側にあると示唆される。この場合、衝突後期のシナリオのほうがもっともらしい。
- 比較的簡単な磁場構造モデルを仮定してSource A,B方向の磁場強度を求めた。
- Ozawa,,,Takizawa,Takahashi,,et al.としてPASJに投稿予定。