

電波銀河NGC3862の 偏波解析による 銀河団Abell1367の磁場推定

高橋育美、瀧沢元和 (山形大)

小澤武揚、赤堀卓也、中西裕之、安楽健太 (鹿児島大)

小野寺幸子、津田裕也 (明星大学)

祖父江義明 (東京大)

2015年9月17日

日本SKAサイエンス会議「宇宙磁場」2015

@鹿児島大

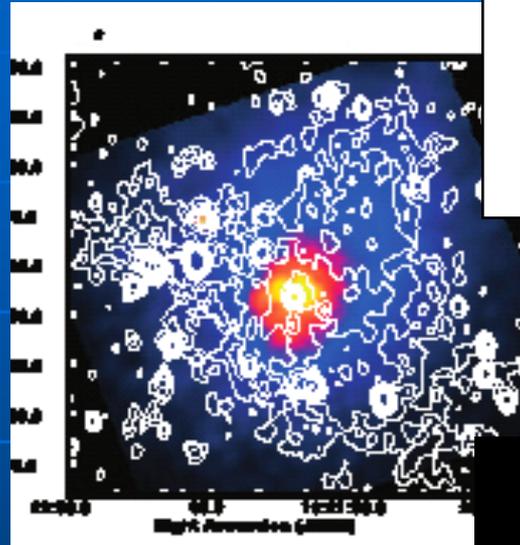
Observational Evidence of Intracluster Magnetic Field (1): Radio Halos / Relics

Non-thermal radio emission from merging clusters of galaxies

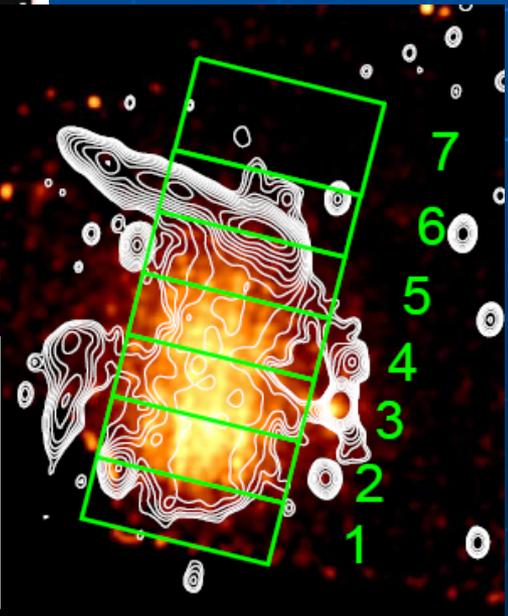
synchrotron radio

$\gamma \sim 10^4$ 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)



1RXS J0603.3+4214 with "Toothbrush" Radio Relic
Suzaku X-ray image (colors)
Radio image (contours)
Itahana et al. PASJ in press (arXiv:1508.05845)

磁場決定方法: Faraday Rotation(1)

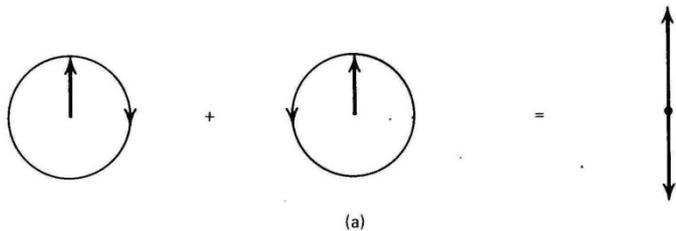


Figure 8.1a Decomposition of linear polarization into components of right and left circular polarization.

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

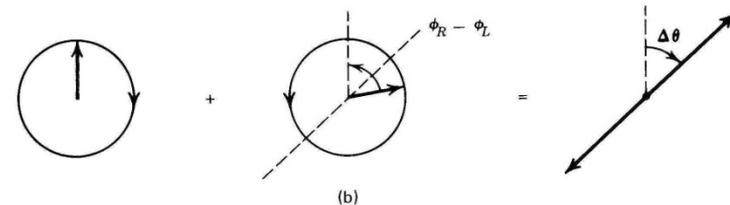


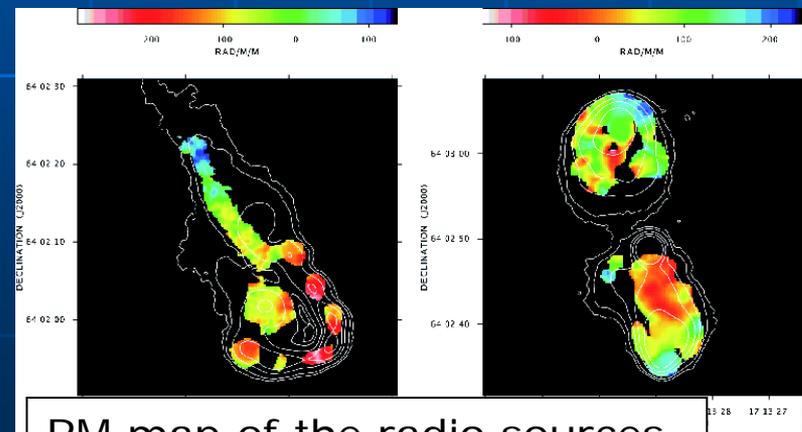
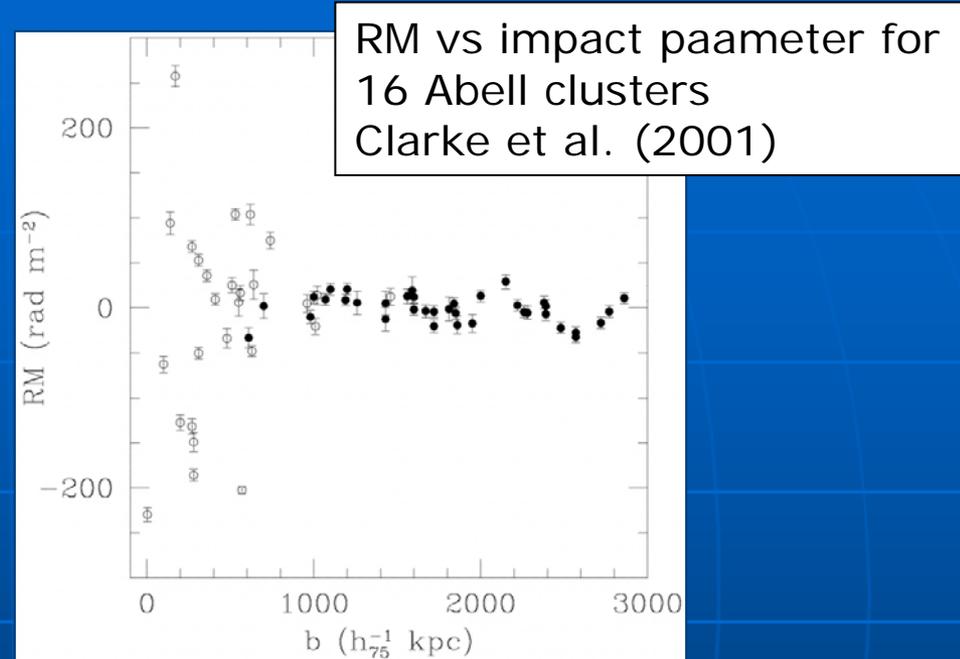
Figure 8.1b Faraday rotation of the plane of polarization.

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

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

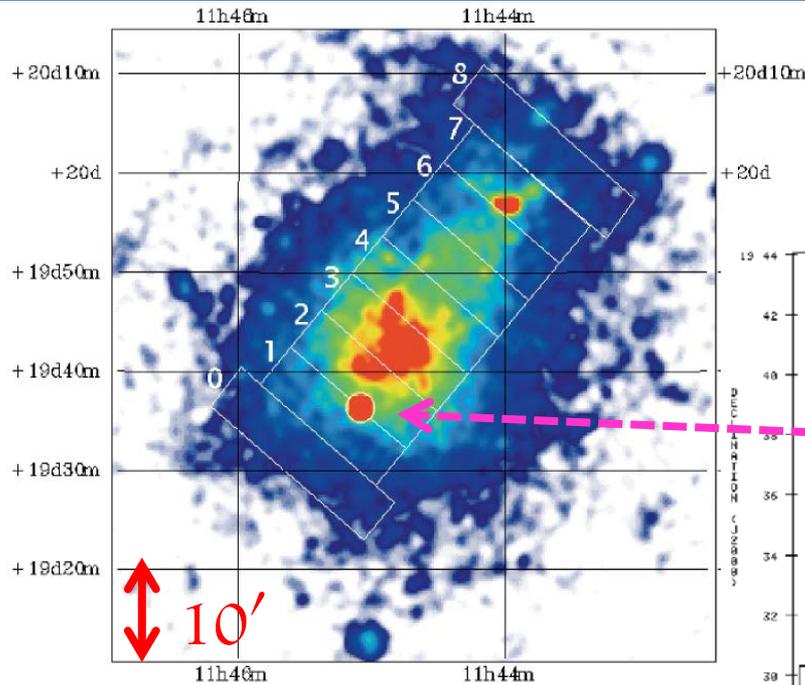
$$\Delta\theta = \frac{2\pi e^3}{m^2 c^2 \omega^2} \int_0^d n B_{\parallel} ds.$$

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

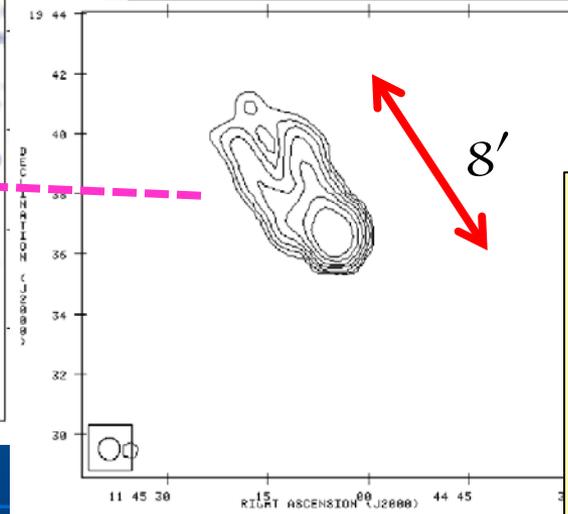


RM map of the radio sources in Abell 2255
Govoni et al. (2006)

Abell 1367と電波源 NGC3862



※銀河団中心(X-ray観測での中心)
と偏光した電波源の間の距離 r
 $r \sim 197 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$



電波源 NGC3862
VLA Radio contour
(1.46GHz)
Redshift=0.02171
RA..11:45:05.62
Dc..+19:36:18.70

銀河団Abell 1367
ROSAT X-ray image
(Donnelly et al. 1998)

Redshift= 0.022
RA...11:44.8
Dc...+19:42



observer



観測・解析概要

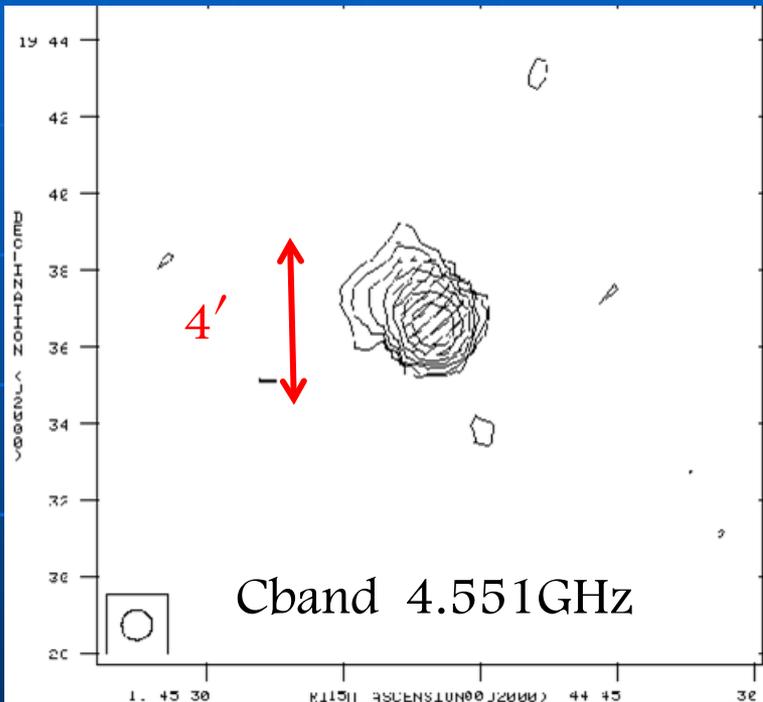
使用した干渉計	JVLA(Jansky Very Large Array) (P.I:赤堀)
アレイ配置	Cアレイ
観測周波数帯	Cband(4.552~6.448GHz) Xband(8.052~9.948GHz)
観測日時	2013.8. 20(xband),24(cband)
観測時間	0.25h
IF	16
Band width	128MHz



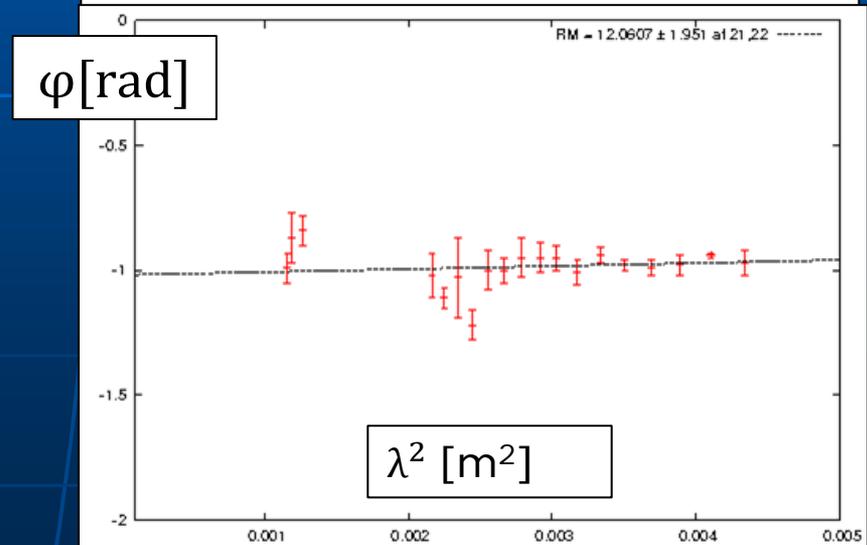
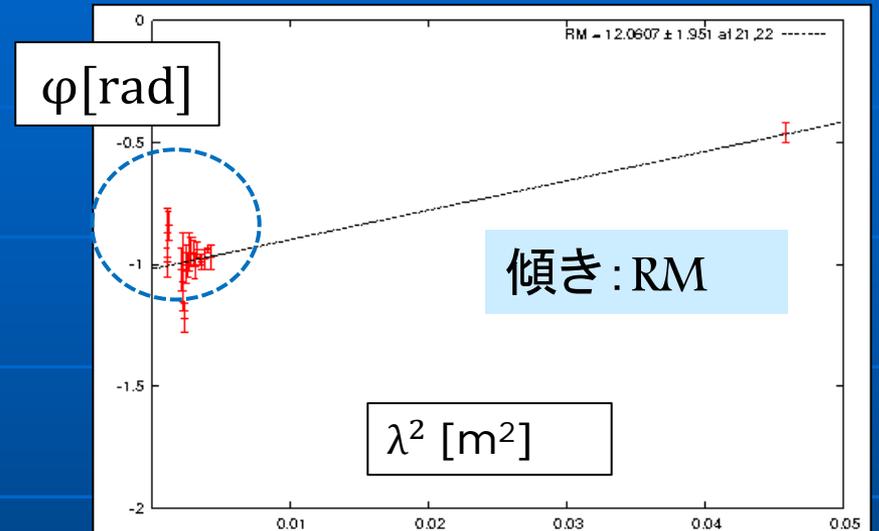
- 本解析では C , X帯 のIF1~16に加えてVLAのarchiveデータ 1.46GHz(L帯)を使用し全部で33周波数分のデータを解析。
- beamsizeは48" に固定
(一番低い分解能である Lbandの分解能に合わせた)

Intensity + 偏波ベクトルマップ & RMplot

電波強度(contour) & 偏光方向(vector)マップ



ある点の各周波数での偏波角のプロット



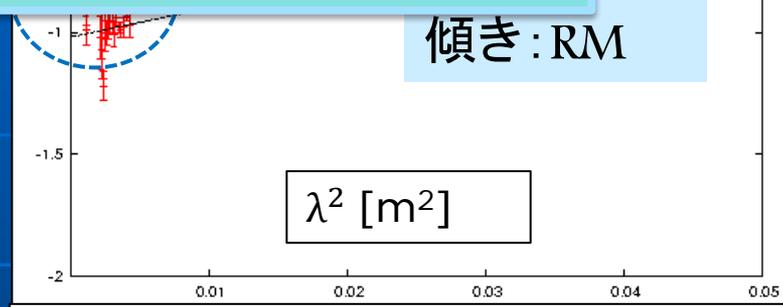
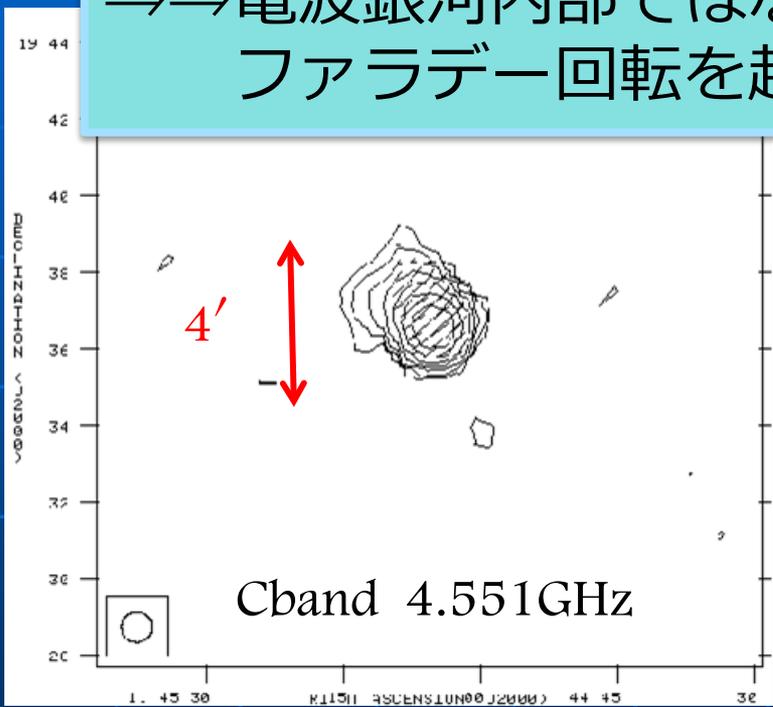
全周波数分作成
⇒各ピクセルで波長の二乗と偏波角の関係をプロット

解析結果

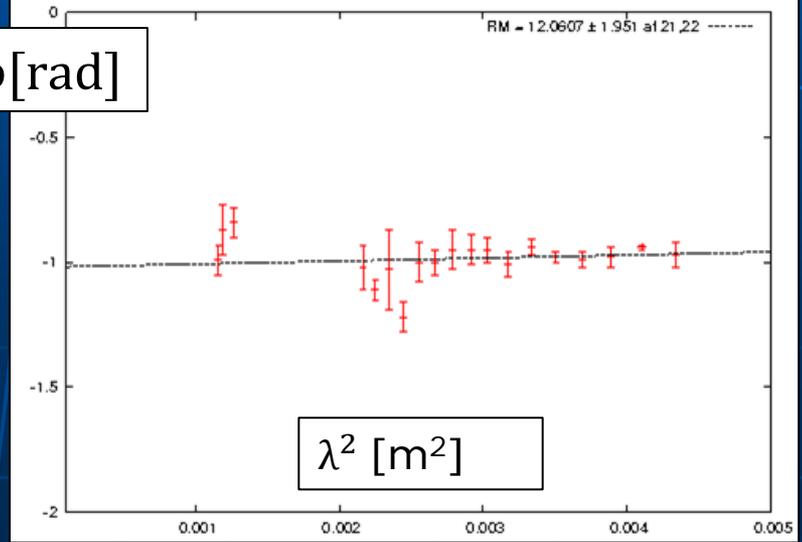
Intensity & 偏波ベクトルマップ & RMplot

偏波角と波長の二乗の関係は直線になっている
⇒電波源から偏波が出た後にファラデー回転の影響を受けている。(両者は空間的に分かれている)
⇒⇒電波銀河内部ではなく、銀河間空間の磁場がファラデー回転を起こしている。

プロット



ϕ [rad]

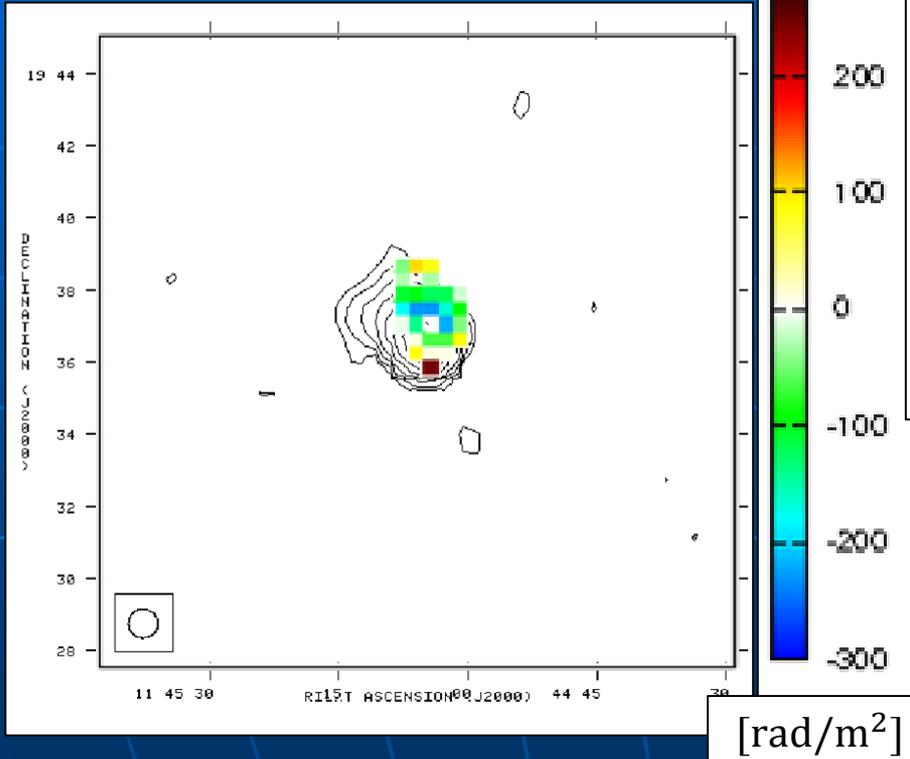


全周波数分作成
⇒各ピクセルで波長の二乗と偏波角の関係をプロット

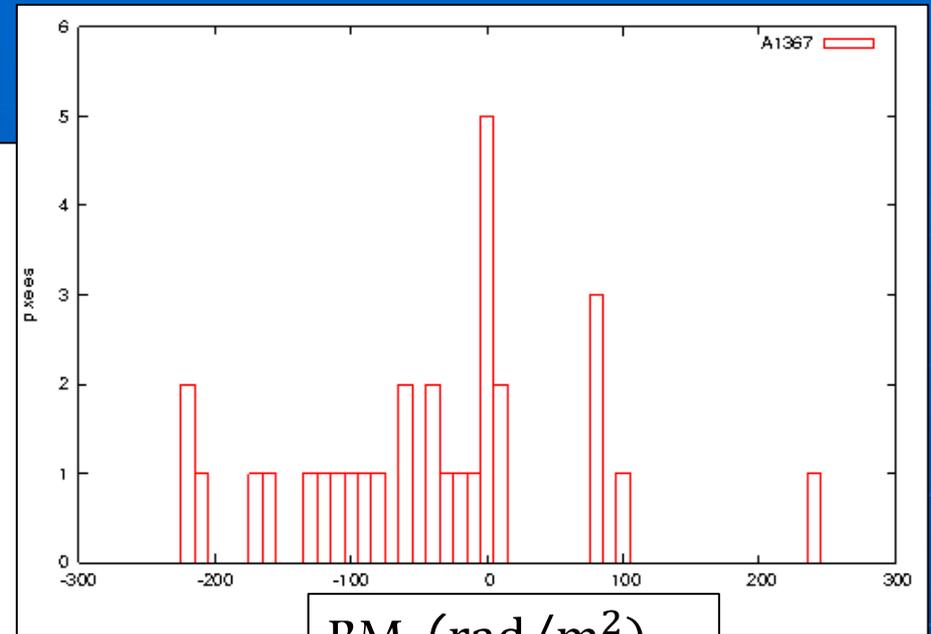
解析結果

RM map & RM histogram

◆電波強度マップに
RMマップを重ねたイメージ



RM histogram



$$\langle \overline{RM} \rangle \sim -45.047 \text{ rad/m}^2$$

$$\sigma_{RM} \sim 107.14 \text{ rad/m}^2$$

Color Image : RMmap

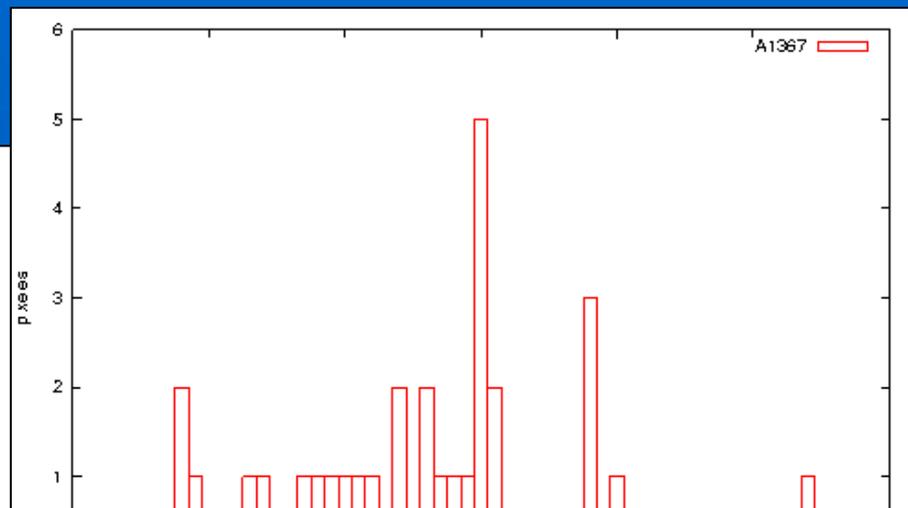
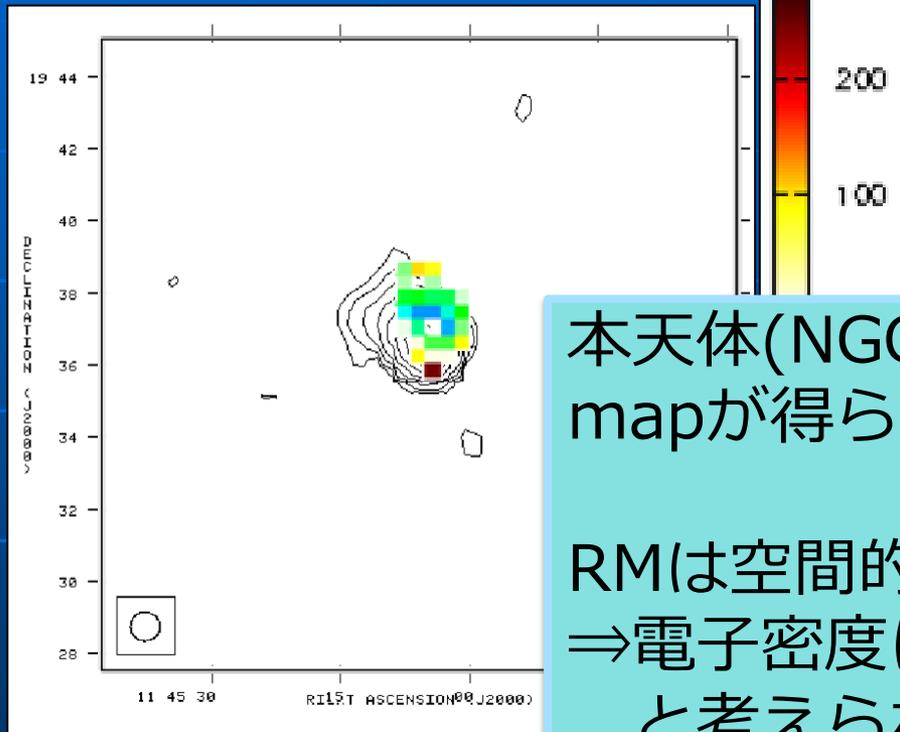
Contour: 4.552GHzの電波強度

解析結果

RM map & RM histogram

RM histogram

◆電波強度マップに
RMマップを重ねたイメージ



本天体(NGC3862)で空間分解されたRM mapが得られたのは初めて。

RMは空間的に変動している。

⇒電子密度は滑らかに変化している

と考えられるためRMの変動には

磁場の空間ゆらぎが反映されているはず

Color Image : RMmap

Contour: 4.552GHzの電波強度

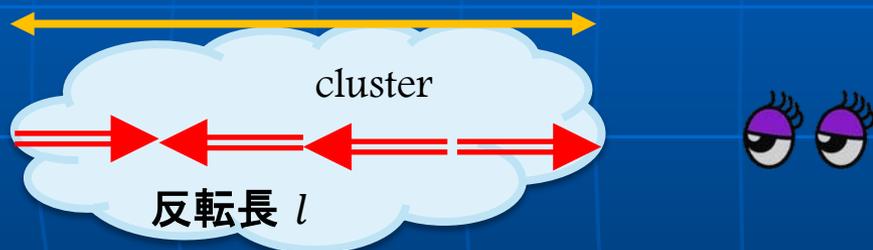
RMから磁場を導出

観測して得られたRMの標準偏差から、磁場強度を求める。

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda^2 e^3}{8\pi^2 m_e^2 c^3 \epsilon_0} \int_0^d n_e B_{\parallel} ds$$

RMから磁場強度を求めるためには、電子密度分布と磁場のモデルが必要

◆ 磁場モデル



磁場が、同じスケール(l)
同じ強度($|B_0|$)、確率1/2で
ランダムに反転するモデル。

◆ 電子密度...βモデル

$$n(r) = n_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-\frac{3\beta}{2}}$$

r_c : コア半径

$$\beta = 0.61, \quad r_c = 0.257 h_{70}^{-1} \text{Mpc}$$

$$n_0 = 1.48 h_{70}^{\frac{1}{2}} \times 10^{-3} (\text{cm}^{-3})$$

(Mohr et al. 1999)

磁場の推定

磁場の構造モデルと β モデル電子密度分布を考慮して σ_{RM} を計算すると

$$\sigma_{RM}(r) = \frac{KBn_0r_0^{\frac{1}{2}}l^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{\frac{6\beta-1}{4}}} \sqrt{\frac{\Gamma(3\beta - 0.5)}{\Gamma(3\beta)}}$$

(Govoni et al.2010)

※磁場は等方的であると仮定 ($\sqrt{3}B_{\parallel} = B$)

観測値とパラメータの値

σ_{RM}	107 [rad/m ²]
β	0.61
r_c	0.257h ₇₀ ⁻¹ Mpc
n_0	1.48 × 10 ⁻³ [cm ⁻³]
r	197h ₇₀ ⁻¹ [kpc]

K	定数(411)
n_0	銀河団のX線中心での電子密度
r_c	コア半径
r	銀河団中心から電波源までの距離
l	ランダム磁場のスケール
β	β モデルのパラメータ

磁場強度を見積もると

$$B \sim 4.51 \left(\frac{l}{10 \text{ kpc}} \right)^{\frac{1}{2}} [\mu\text{G}]$$

※本天体 (Abell 1367) で磁場の情報が得られたのは初めて
小規模な銀河団として貴重なサンプル

エネルギー密度

- ROSATで得たベータモデルより、電波源付近の電子密度は $n_e = 8.8 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$
- ASCAの結果から $kT \approx 3.2 \text{ keV}$ (Donnelly et al. 1998)
--> $U_{\text{th}} = 1.1 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-3}$
- 得られた磁場強度より
--> $U_B = 8.1 \times 10^{-13} \text{ (l/10kpc) erg cm}^{-3}$
- $U_B/U_{\text{th}} = \text{(l/10kpc) } 0.072$ 、なんか磁場が強くない？
- ただ問題はいろいろ(偏光成分に対する感度不足でサンプルが少ない、磁場構造モデルが単純すぎる、本当に電波銀河からの寄与はないのか、電波銀河の位置の不定性等)

まとめ

- 電波銀河NGC3862の空間分解されたRM mapを初めて得た。その結果を使って銀河団A1367の磁場についての情報を初めて得た。小規模な銀河団として貴重なサンプルである。
- 解析した周波数はC帯(4.552-6.448GHz) , X帯(8.052-9.948GHz)と VLAの archiveデータ1.46GHzの合わせて33周波数。
- 解析の結果、得られたRMの平均値、標準偏差はそれぞれ $\langle \overline{RM} \rangle \sim -45.047$ [rad/m²]、 $\sigma_{RM} \sim 107.14$ [rad/m²]となった。
- 得られたRMの値から簡単な磁場の構造モデルを仮定し X線観測から得られる電子密度分布を考慮して
A1367の磁場強度を推定した結果、 $4.51 \left(\frac{l}{10\text{kpc}} \right)^{\frac{1}{2}}$ [μG]
程度になった。
- 上記の結果を文字通り受け取ると磁気エネルギー密度は熱エネルギー密度の7%程度と高めの値を示唆する。
- ただ問題はいろいろある。