

長波長電波観測に基づく銀河や 銀河団磁場の構造と性質



日本SKAコンソーシアム「宇宙磁場」科学検討班
偏波解析班

小澤武揚, 中西裕之, 赤堀卓也, 安楽健太(鹿大),
滝沢元和, 高橋育美, 高橋律裕(山形大),
小野寺幸子, 津田裕也(明星大), 祖父江義明(東大)

SKA-Japanワークショップ2015

2015/03/04

渦巻銀河M51 銀河団Abell 2256

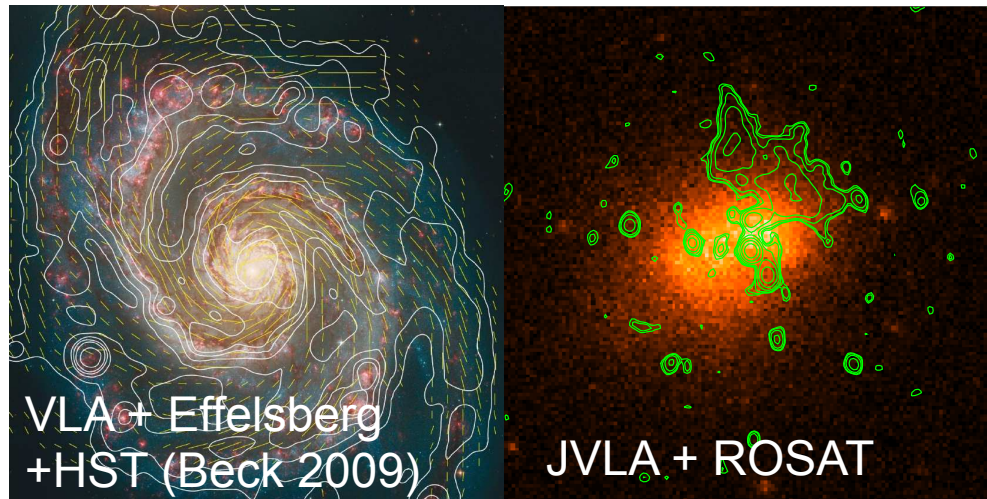
❖ 銀河・銀河団磁場の測定

- ファラデー回転
- ビーム偏波解消

❖ 偏波解析班の研究報告

1. 銀河磁場構造の形態分類
2. X線形態と銀河団磁場
 - Abell 1367の解析結果
 - Abell 2256の解析結果

❖ まとめ

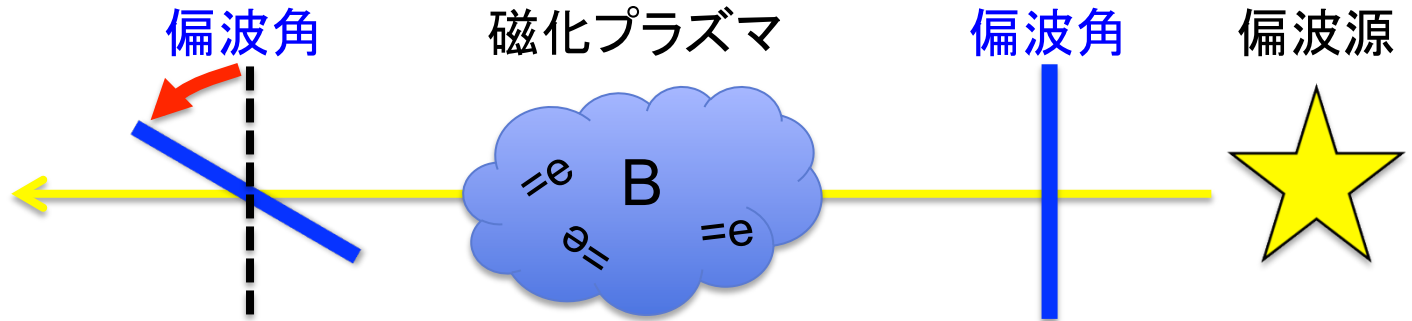


- 数-数十 μG
- 渦状腕に沿う磁場
- 0.1 - 1 μG 程度
- 乱流磁場

銀河・銀河団磁場の測定方法

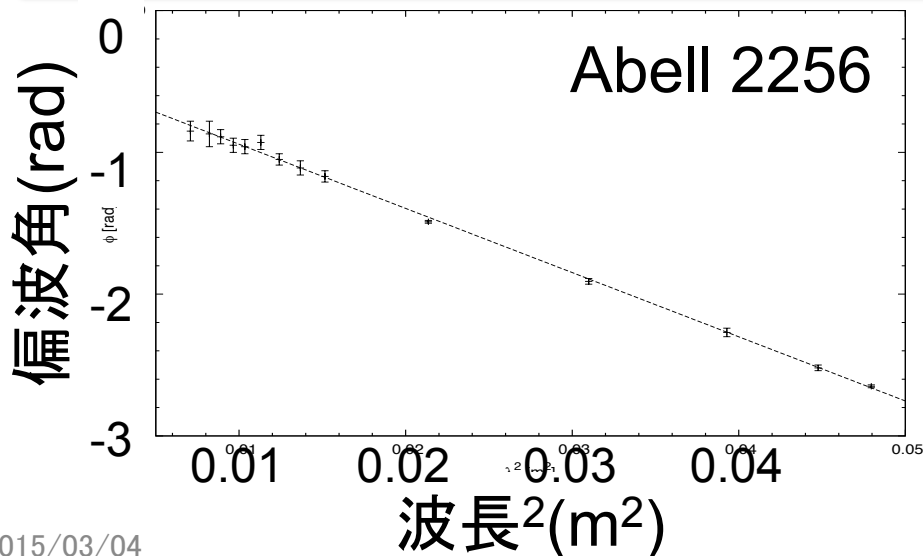
cm波・m波帯で **ファラデー回転** の観測
偏波解消

ファラデー回転



ファラデー回転 = $RM \cdot \text{波長}^2$

- ❖ **RMが正: 手前向き**の磁場が卓越
- ❖ **RMが負: 奥向き**の磁場が卓越

$$RM = 0.81 \int n_e B_{\parallel} dl$$


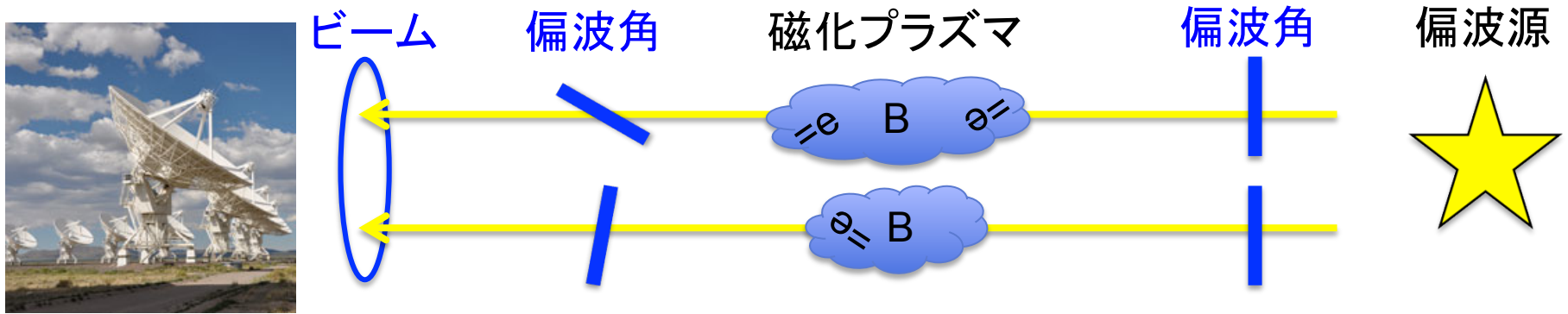
RM=50[rad/m²]の時の回転量



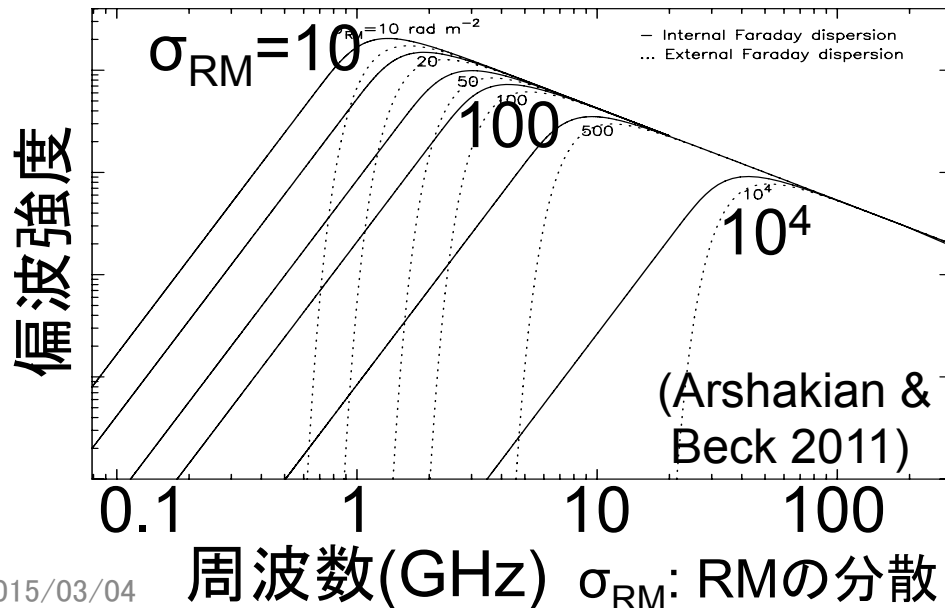
cm波(1-10GHz)が最適!

ビーム偏波解消

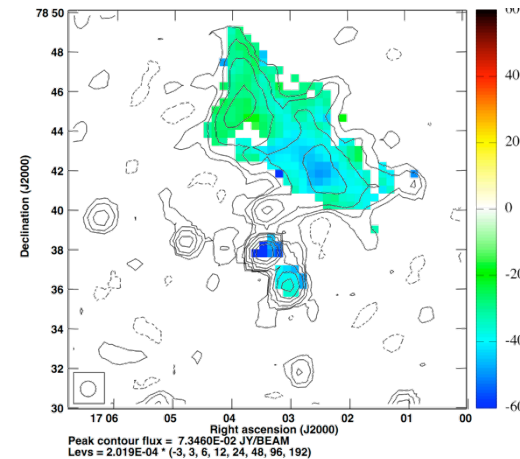
偏波解消: 天体固有の偏波よりも弱まった偏波を観測する現象



ビーム偏波解消のBurn則



Abell 2256 RM分布図



cm・m波 (0.1-10GHz) が最適!

目次

❖ 銀河・銀河団磁場の測定

- ファラデー回転
- ビーム偏波解消

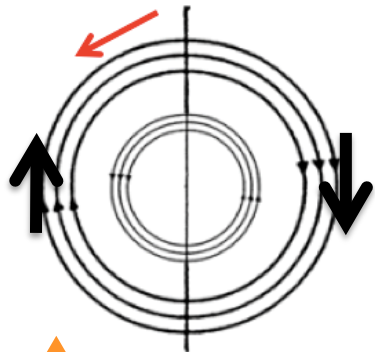
❖ 偏波解析班の研究報告

1. 銀河磁場構造の形態分類
2. X線形態と銀河団磁場
 - Abell 1367の解析結果
 - Abell 2256の解析結果

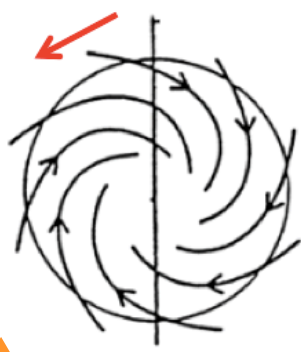
❖ まとめ

RMによる銀河磁場構造の形態分類

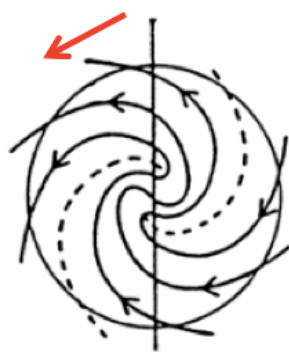
θ Ring



θ ASS

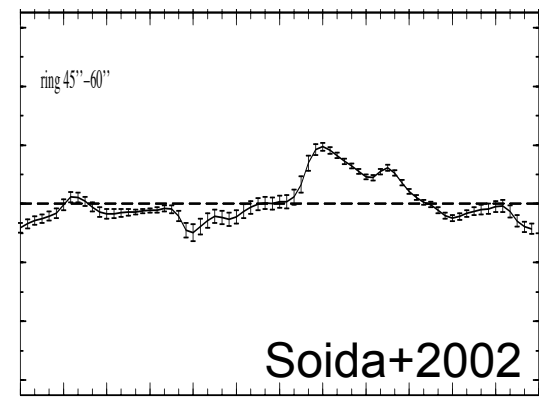
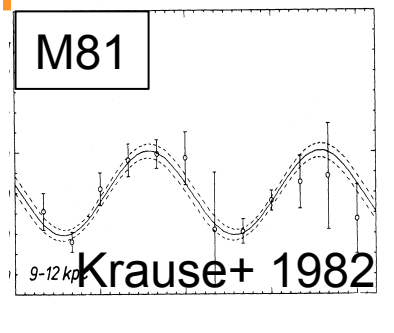
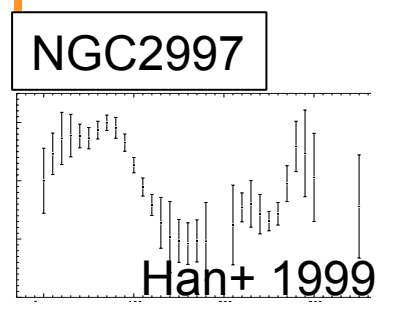
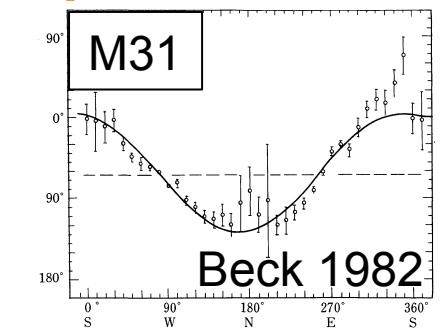
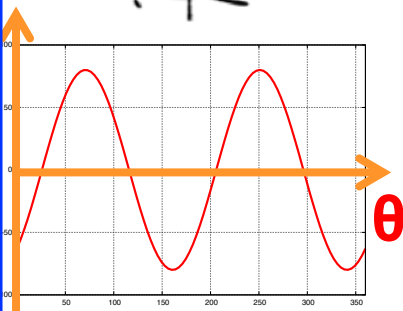
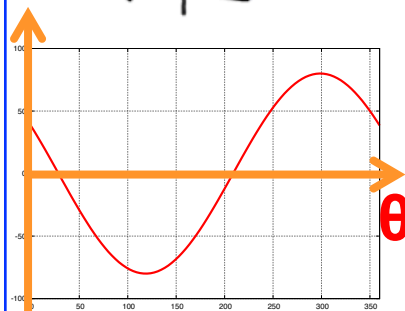
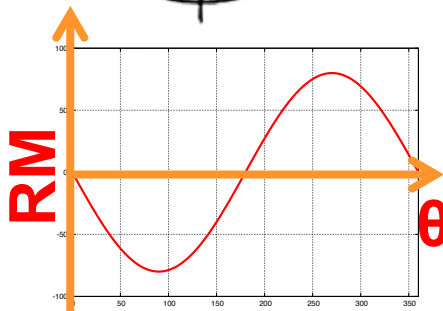
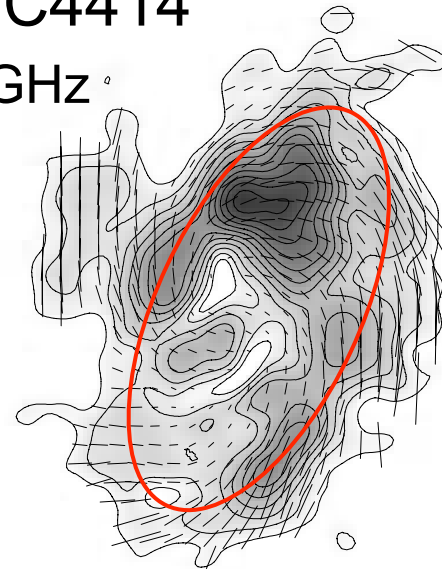


θ BSS



NGC4414

8.4GHz



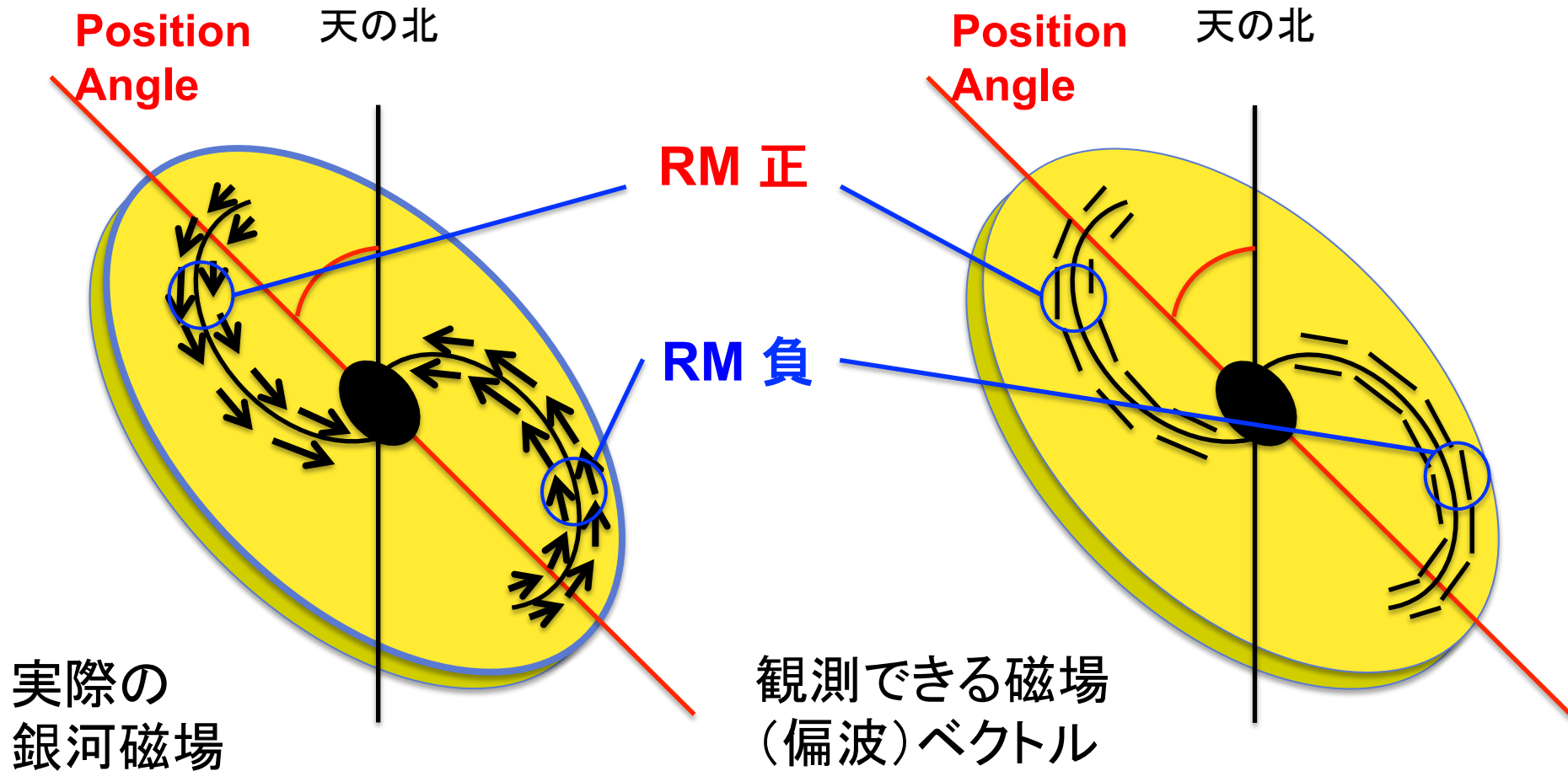
※ASS: Axi-Symmetric Spiral, BSS: Bi-Symmetric Spiral

ASS? BSS?

新しい手法 - 磁場構造の視覚化

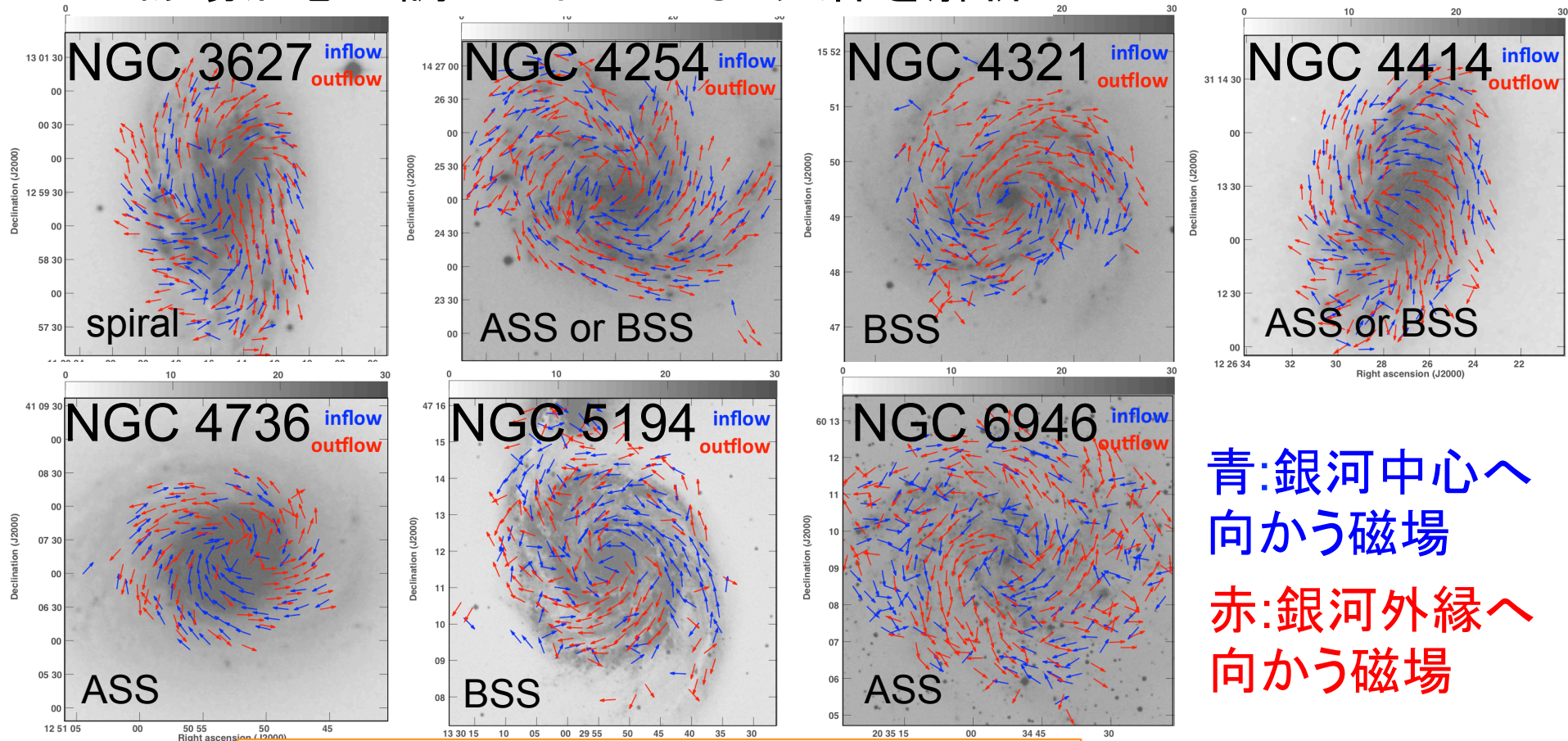
安楽健太 (鹿児島大学)

❖ 観測した磁場ベクトルにRMの正負から向きを与える



VLAアーカイブデータの解析結果

❖ 磁場形態が調べられている7天体を解析



❖ 解析した7天体は全てBSSである
❖ ハローの分離が必要

目次

❖ 銀河・銀河団磁場の測定

- ファラデー回転
- ビーム偏波解消

❖ 偏波解析班の研究報告

1. 銀河磁場構造の形態分類
2. X線形態と銀河団磁場
 - Abell 1367の解析結果
 - Abell 2256の解析結果

❖ まとめ

銀河団磁場の増幅

銀河団磁場増幅仮説

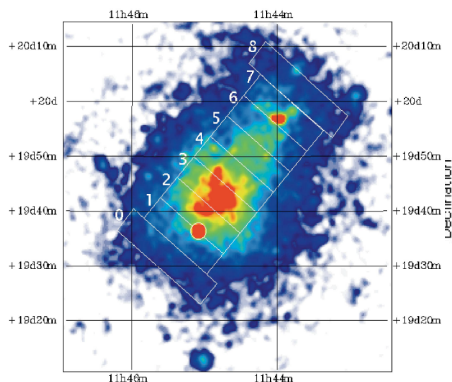
1. 銀河団衝突・衝撃波の発生
2. 銀河団内ガスの加熱・乱流の発生
3. 乱流による磁場の増幅



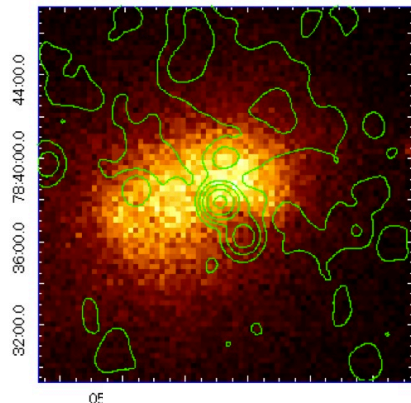
乱流による磁場増幅の証拠として
X線形態による磁場の性質の違い
が見られる？



JVLAで6銀河団を偏波観測(PI赤堀)

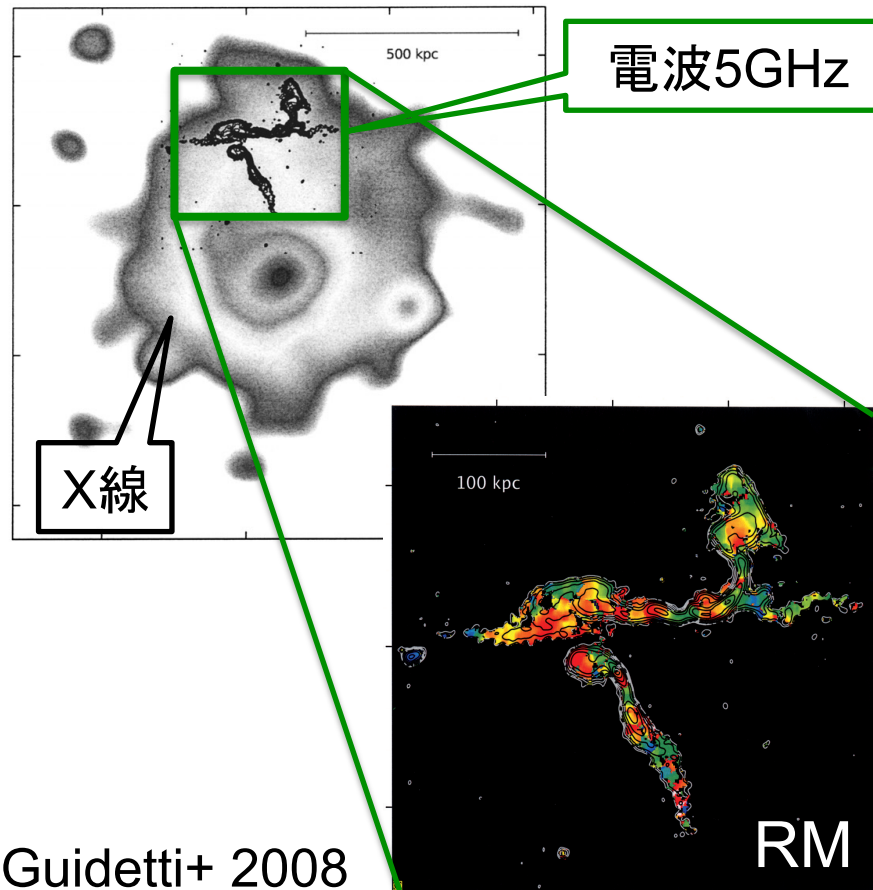


Abell 1367



Abell 2256

観測例：Abell 2382

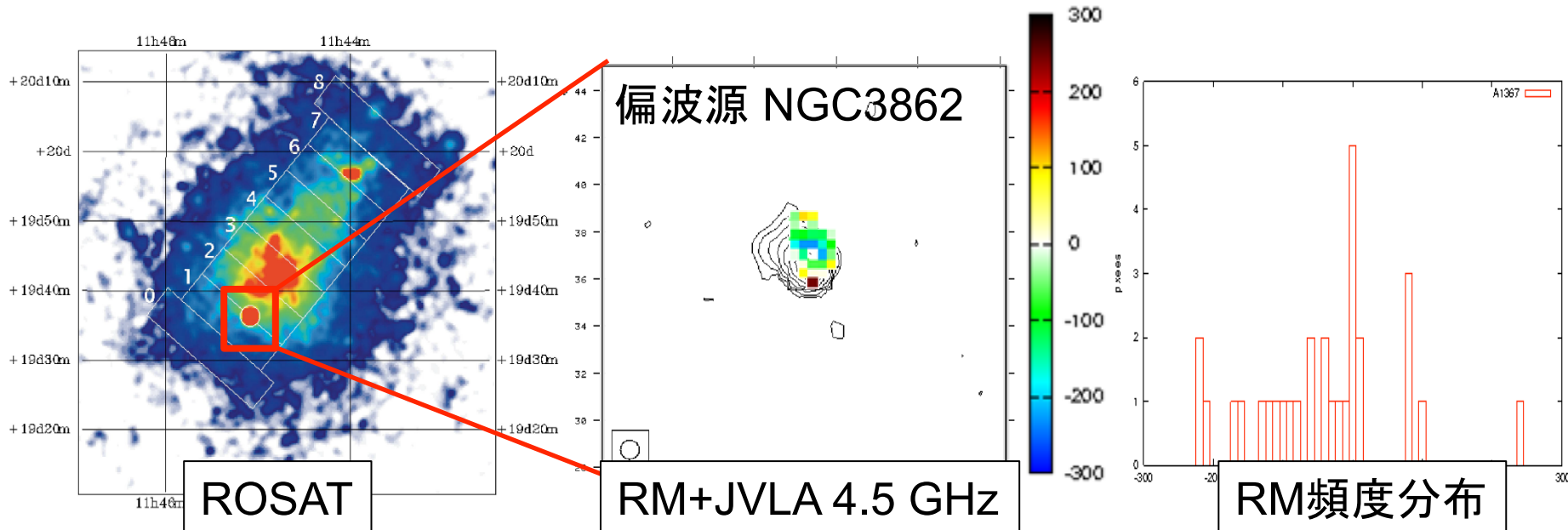


Guidetti+ 2008

銀河団内偏波源の銀河団磁場によるファラデー回転を観測

Abell 1367

解析: 高橋育美 (山形大学)



JVLA 観測概要

アレイ配置	Cアレイ
観測周波数帯	C帯(4.5-6.5 GHz) X帯(8-10 GHz)
IF	16
帯域幅	128 MHz

- ❖ 衝突後の緩和期に分類
 - ❖ NVSSのデータを加えた33周波数を解析
 - ❖ RM分布図を作成
- ➡ RMの分散から磁場を求める

Abell 1367の偏波源方向の磁場強度

- ❖ 強度が一定・単一の相関長 Λ_B ・向きがランダムな磁場

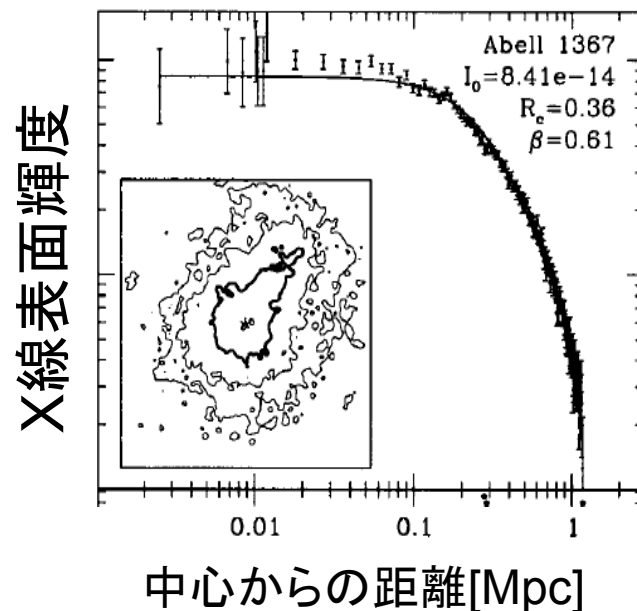


観測されるRMの分散は正規分布

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

σ_{RM}	RMの分散	107 [rad/m ²]
n_0	X線中心での電子密度	1.48×10^{-3} [cm ⁻³]
r_0	コア半径	0.257 [Mpc]
β	β のパラメータ	0.61
Λ_B	磁場の相関長	10 [kpc]

- ❖ $B \sim 4.5$ [μG]

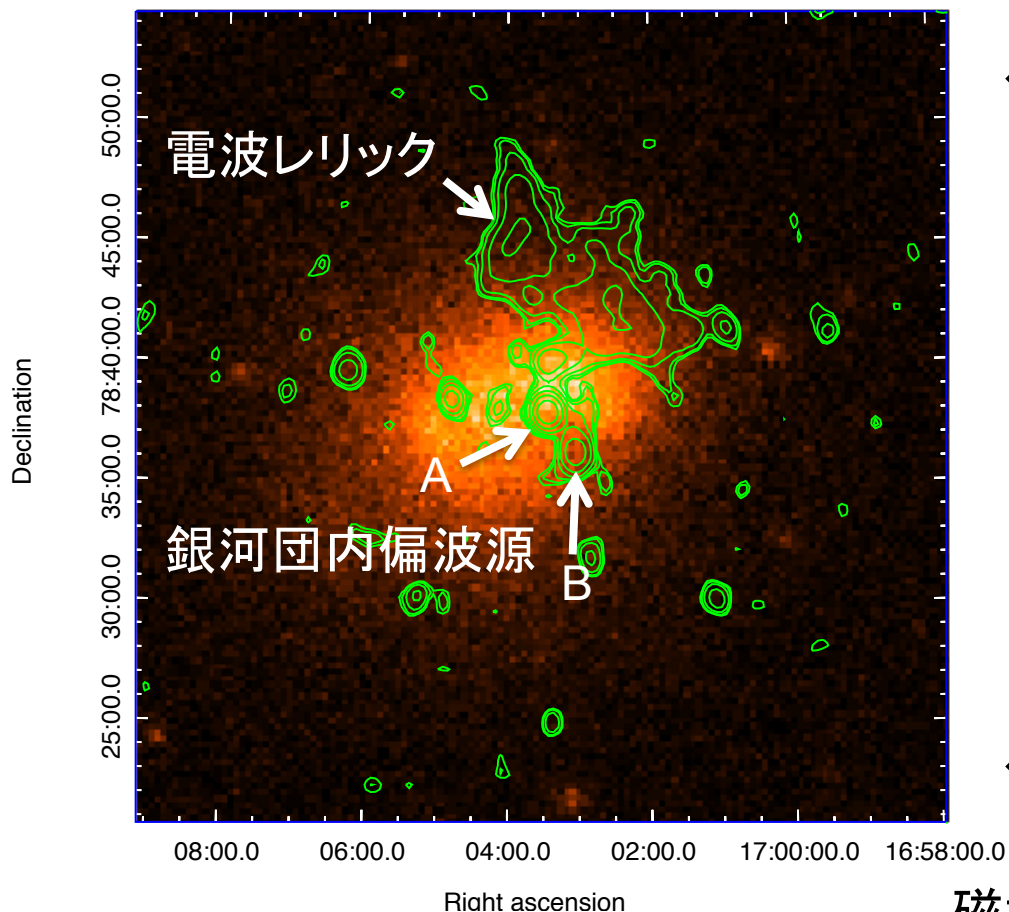


Abell 2256

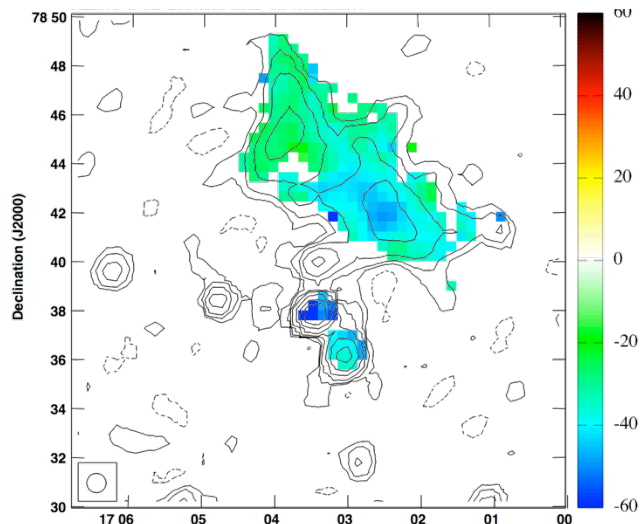
RA, DEC (X線) = 17h04m2.3s + 78°37'55.2''
l,b = 110.996, 31.754
z = 0.0581: 66.96kpc/arcmin

❖ 衝突銀河団

❖ JVL A 2-3.5, 8-10 GHz



Abell 2256 JVL A 2GHz + X線



RM分布図

❖ **B ~ 0.1-1.15 [μG]**

磁場強度

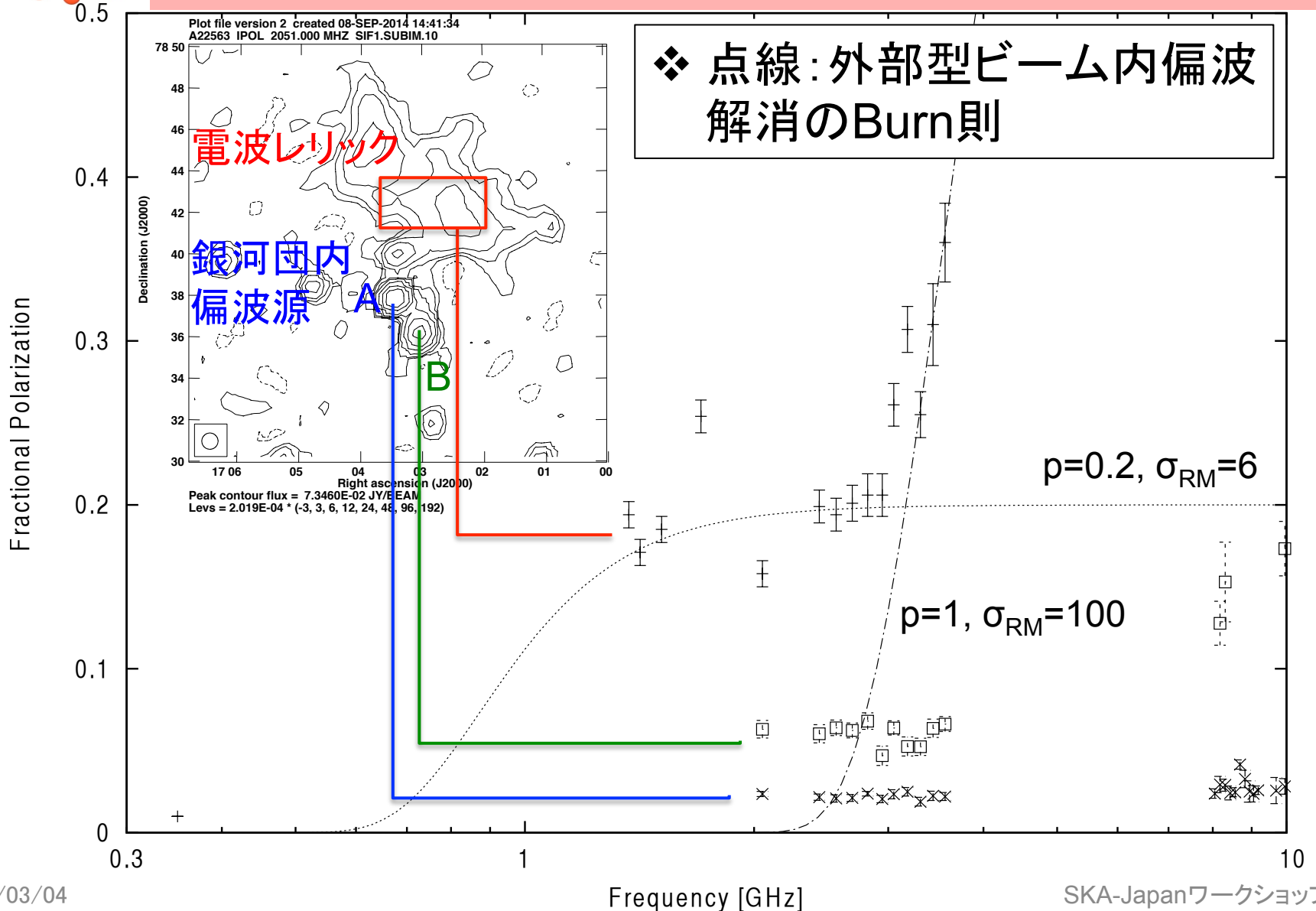
衝突合体期
Abell 2256

<

緩和期
Abell 1367

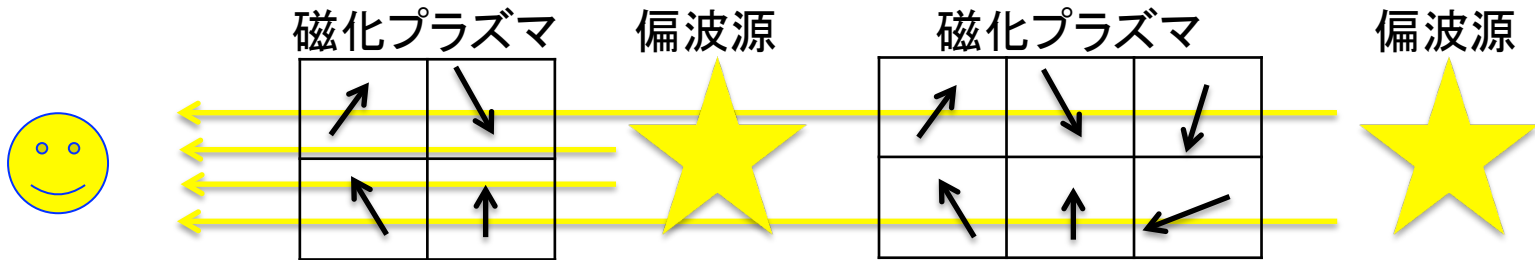
乱流で増幅?

電波レリックスと銀河団内偏波源の偏波率

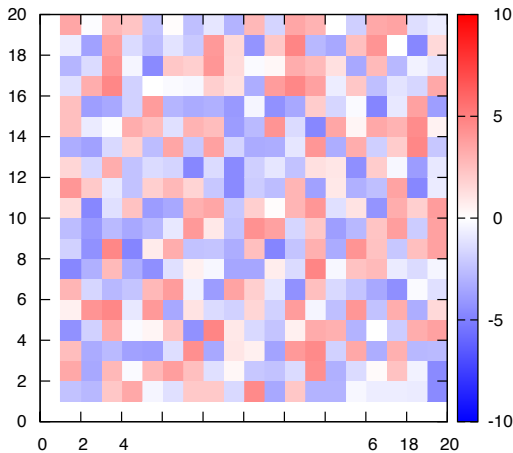
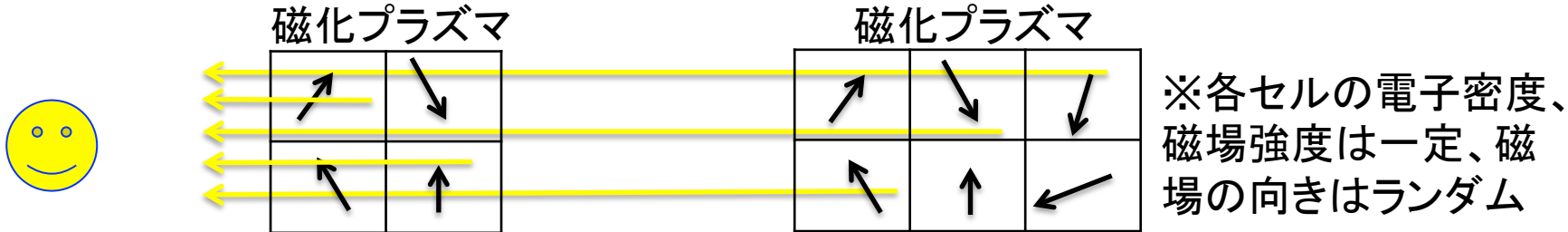


ビーム偏波解消モデル

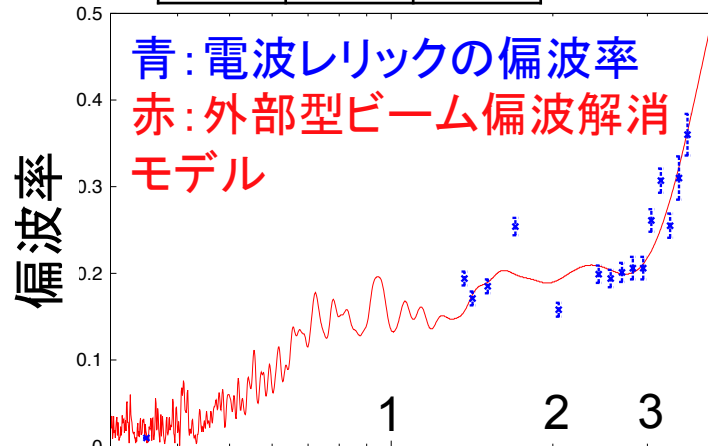
1. 外部型ビーム偏波解消モデル



2. 内部型ビーム偏波解消モデル(各セルが放射)



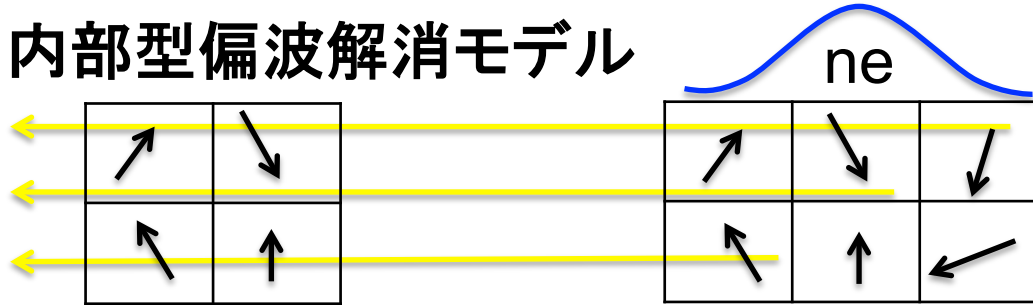
RM分布



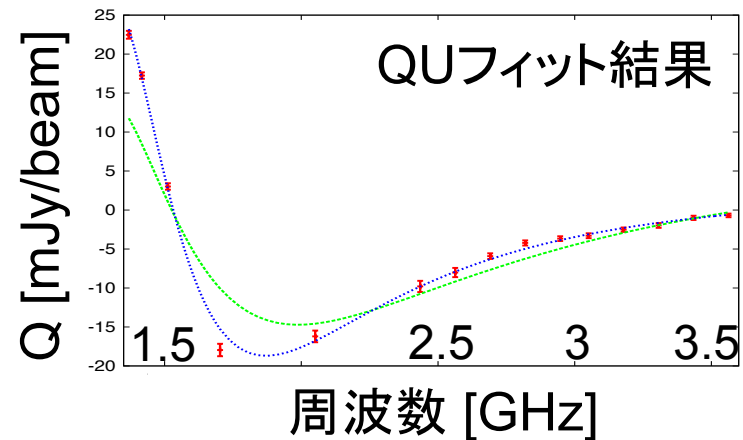
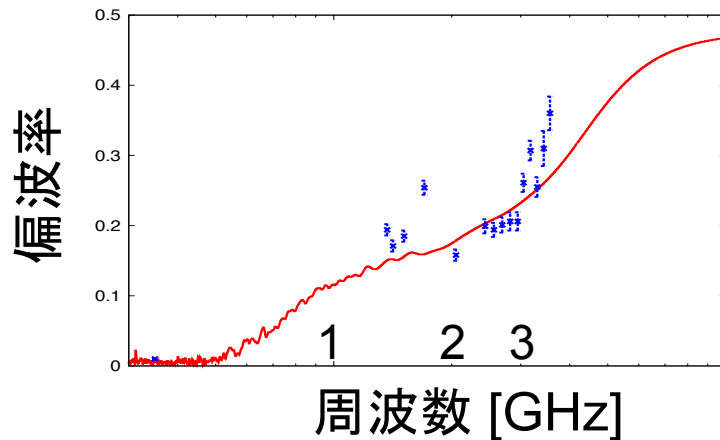
周波数 [GHz]

ビーム偏波解消モデル

3. 外部型 + 内部型偏波解消モデル



※各セルの磁場強度は一定、磁場の向きはランダム



❖ 階段状の偏波解消を再現できる3モデルの共通点

- 2つ以上の偏波源と2成分の磁化プラズマが必要
- 観測者側の磁化プラズマの σ_{RM} がその奥側の磁化プラズマの σ_{RM} よりも小さい

❖ 電波レリック方向に2成分の磁化プラズマ！

❖ 偏波解消はトモグラフィーと相補的である

❖ 銀河磁場

- 磁場構造を視覚化する新しい銀河磁場分類法を提示
 - 解析した全ての渦巻銀河でBSS構造が見られた

❖ 銀河団磁場

- JVLA で規則銀河団Abell 1367と不規則銀河団Abell 2256を観測、解析
 - 不規則銀河団Abell 2256の磁場強度 < 規則銀河団Abell1367
- Abell 2256では電波レリックスで階段状の偏波率の変化
 - ビーム内偏波解消の数値計算モデルを作成
 - 階段状の偏波率の変化は手前側の磁化プラズマの σ_{RM} が奥側の磁化プラズマの σ_{RM} より小さい時に見られた

❖ 偏波解消はトモグラフィーと相補的

2/9(月)

修士論文発表会 15:00～15:20

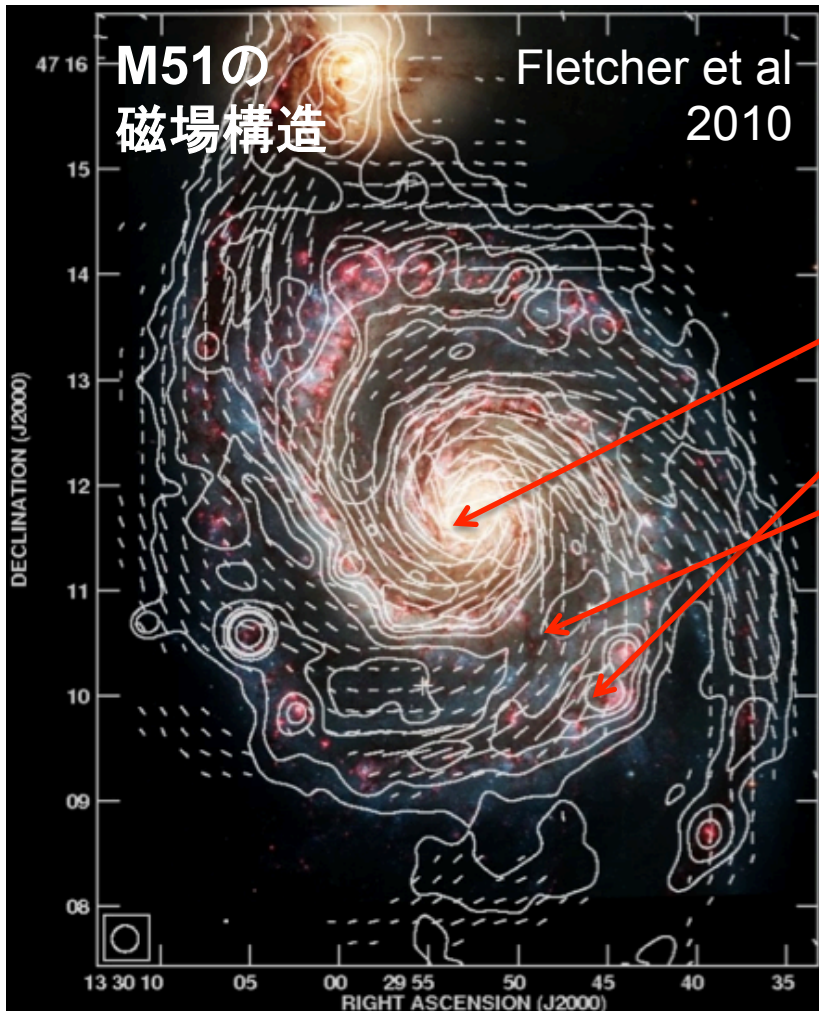
近傍銀河の橢波観測学院-東西研究室
銀河磁場構造の形態翁健太

Square Kilometre Array
Japanese Consortium

修士論文
発表

Introduction

「銀河磁場とは」



一般的に、
数~数十^{マイクロガウス} μG 程度
Center : 30^{マイクロガウス} μG
Arm : 20~25^{マイクロガウス} μG
Inter arm : 15~20^{マイクロガウス} μG

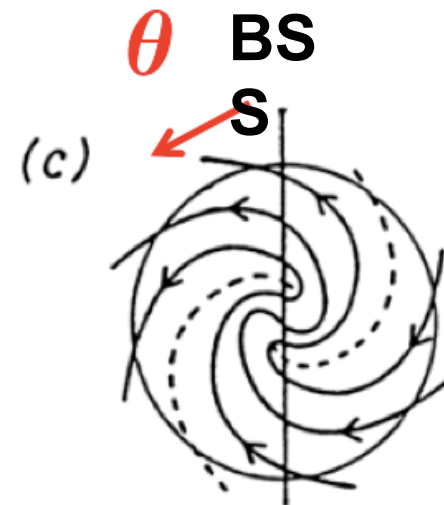
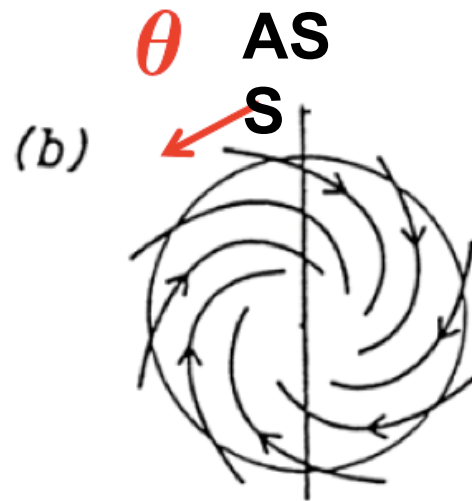
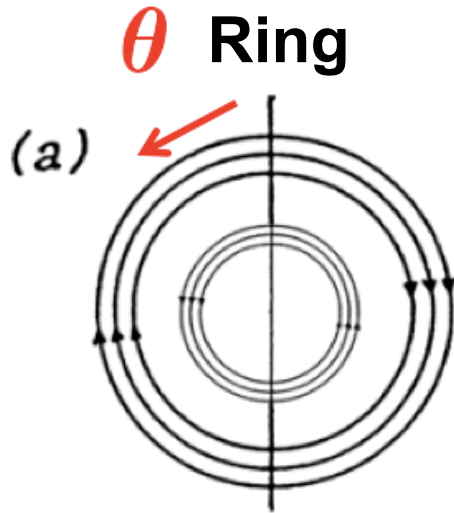
Point

可視光で見える腕と
磁場の腕のピッチ角は
ほぼ一致している

(偏波ベクトルを90度回転させたもの)

Introduction

「銀河磁場構造の種類」



J. L. Han et al 2003

(a) Ring 構造

(b) ASS 構造

(c) BSS 構造

[Axis-Symmetric Spiral]

[Bi-Symmetric Spiral]

銀河面の磁場構造は3種類ある。
(Sofue 1987)

INTRODUCTION

「銀河磁場の起源1：ダイナモ理論」

スタートは小さな種磁場

パーカー不安定生

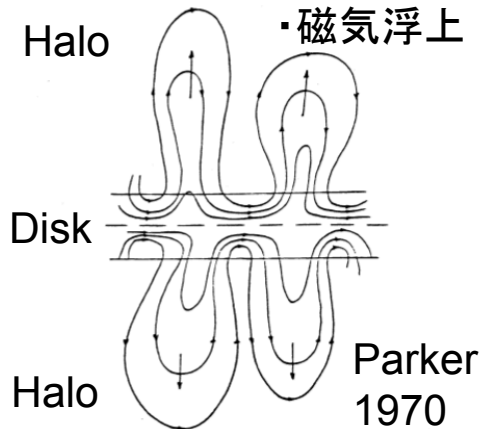


FIG. 2.—Schematic of the extended magnetic lobes inflated outward from both faces of the gaseous disk of the galaxy.

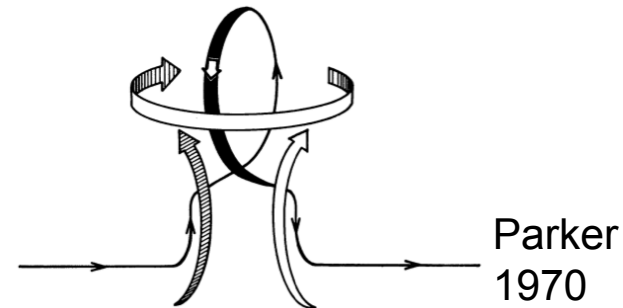
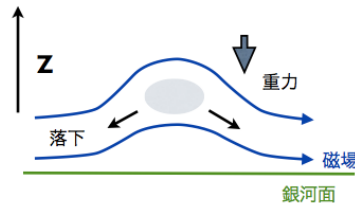


FIG. 1.—Schematic drawing showing how a cyclonic convective cell raises and twists the azimuthal fields B_ϕ into a loop with nonvanishing projection in the meridional plane. Coalescence of many such loops leads to a general meridional field B_m . Solid line represents a magnetic line of force; ribbon arrows represent the cyclonic fluid motions.

$\alpha\Omega$ ダイナモ

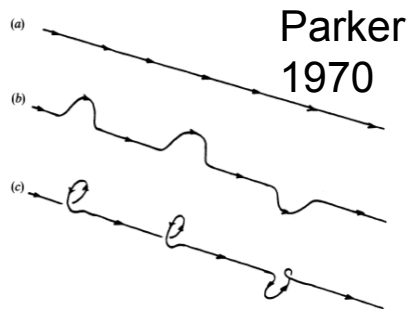
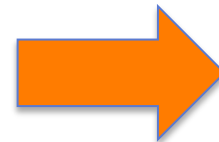


FIG. 1.—Schematic of the α -effect, (a) starting with a uniform field, (b) which the turbulence deforms into Ω -shaped loops, (c) which are rotated by the cyclonic velocity ω of the individual eddies.

α : 乱流やコリオリ力によるねじり

Ω : 差動回転によるねじり



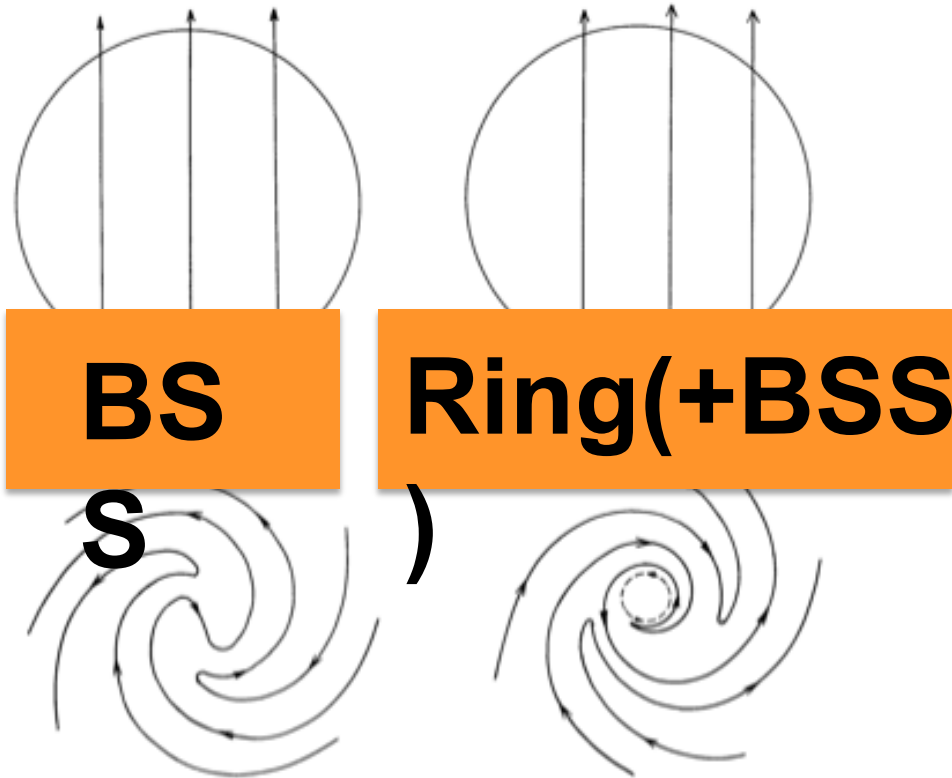
磁場増幅!

AS

BS

INTRODUCTION

「磁場の起源2：原始磁場理論」



← 銀河面に対して
 平行な成分を持つ
 原始磁場があった
 場合

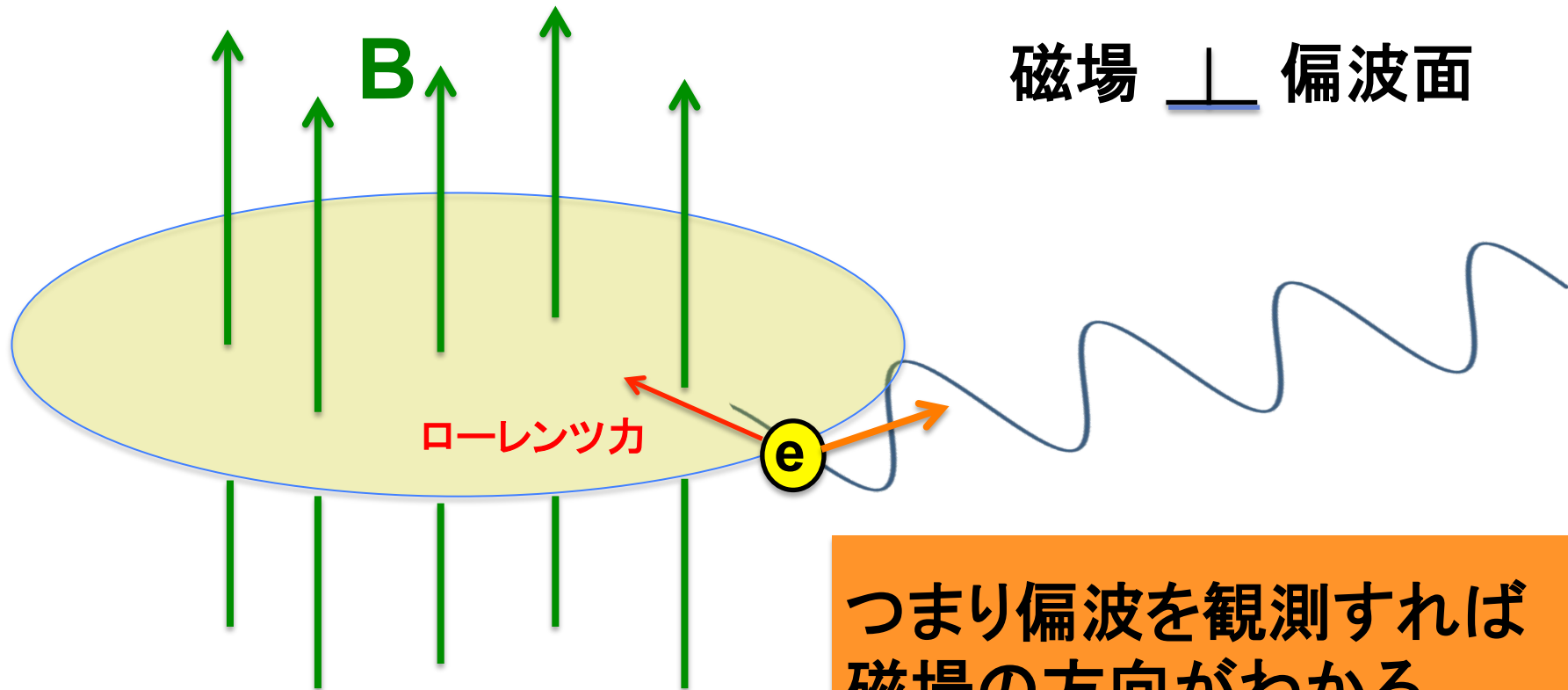
← 銀河回転により、
 磁場を巻き込むこと
 で渦状の磁場構造
 を形成する。

(a) Uniform primordial field creates a BSS field. (b) Asymmetric primordial field creates an inner Ring + outer BSS field.

Figure 10 (a) Uniform intergalactic magnetic field is twisted by differential rotation to create a BSS field. (b) Nonuniform or asymmetric intergalactic magnetic field is twisted to create a circular field in the inner region and a BSS field in the outer region of the disk.

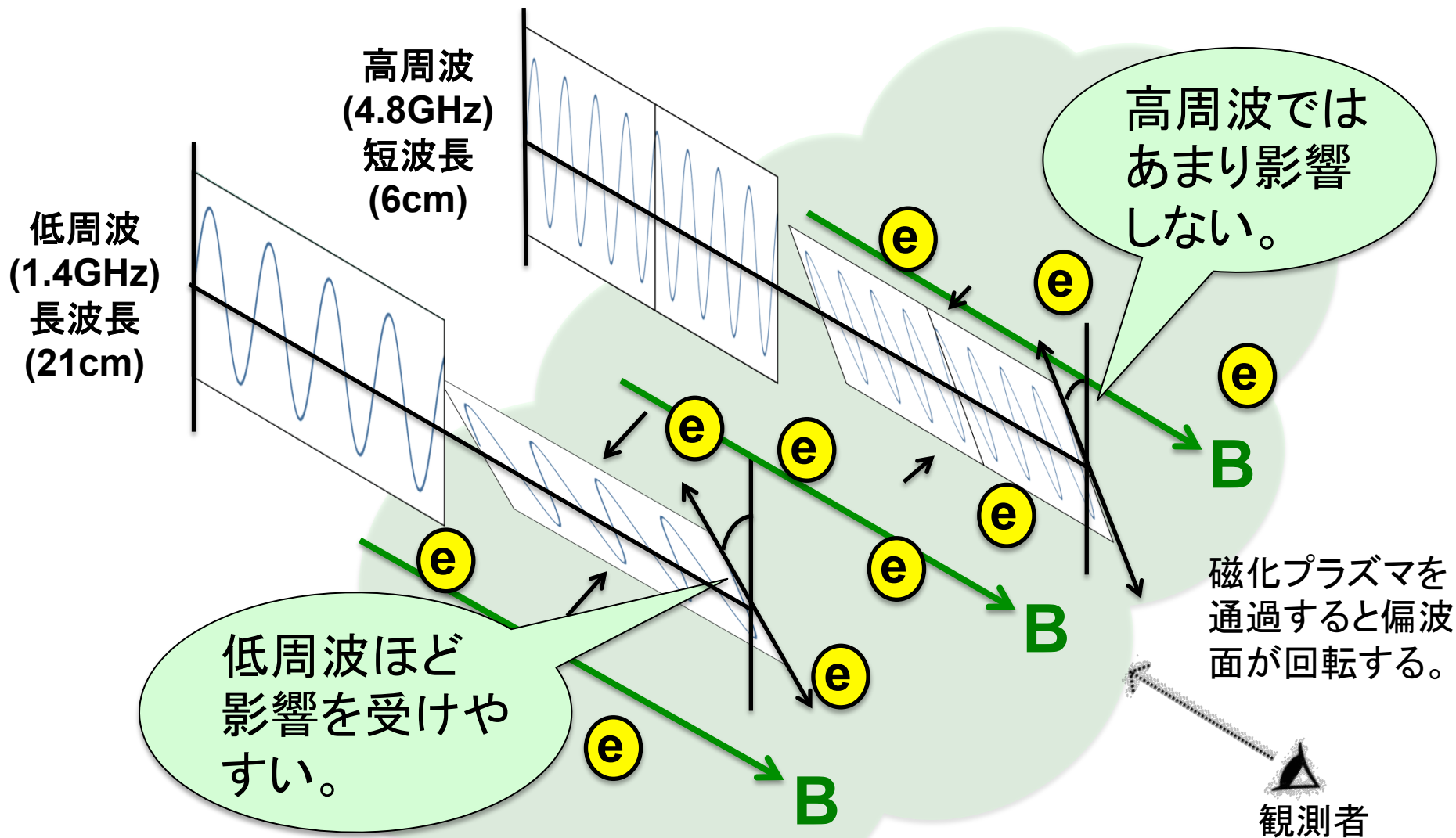
Introduction 「磁場の観測」

シンクロトロン放射



つまり偏波を観測すれば
磁場の方向がわかる

Introduction 「Faraday Rotation (ファラデーローテーション)」



INTRODUCTION

「ROTATION MEASURE (ローテーションメジャー)」

横軸：波長の2乗
 縦軸：偏波角
 直線の傾き：RM

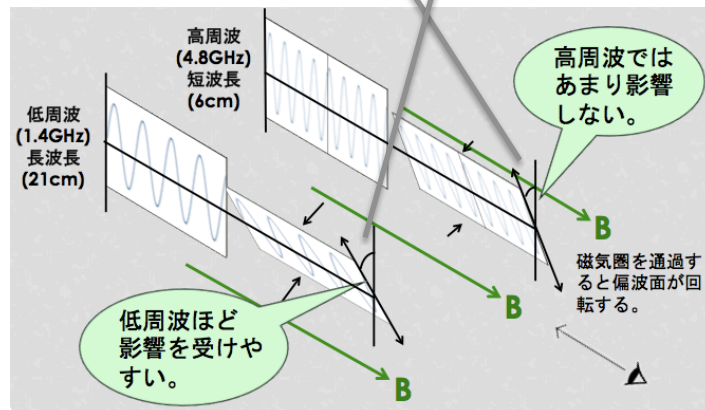
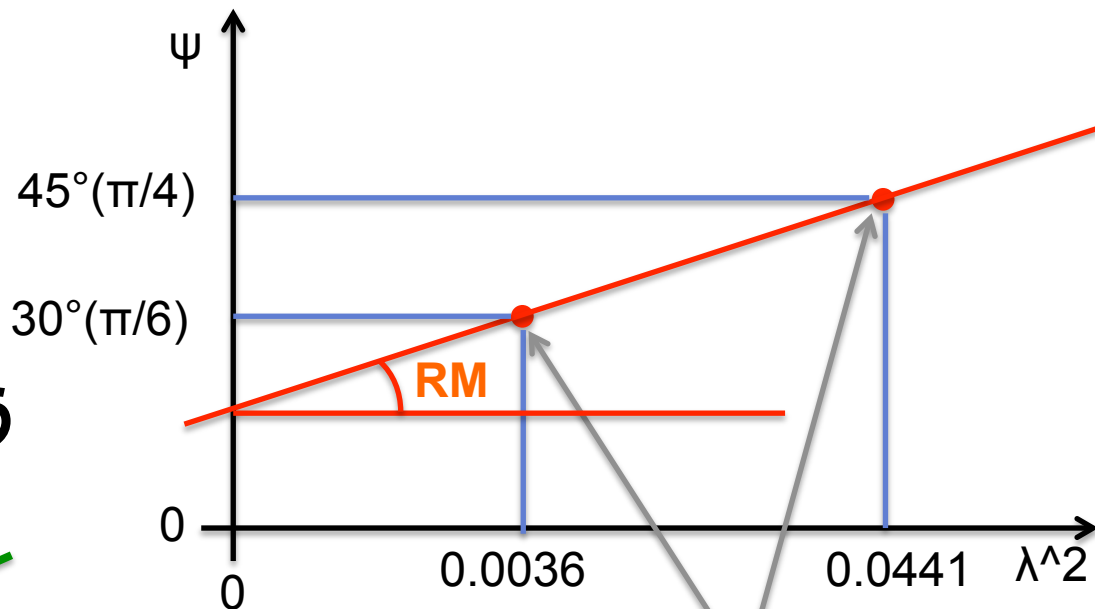
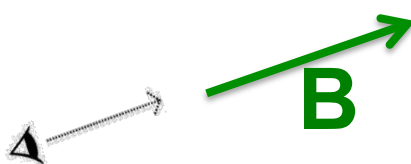
磁場が観測者に向かう
 向き(偏波面が東回り)

RM > 0



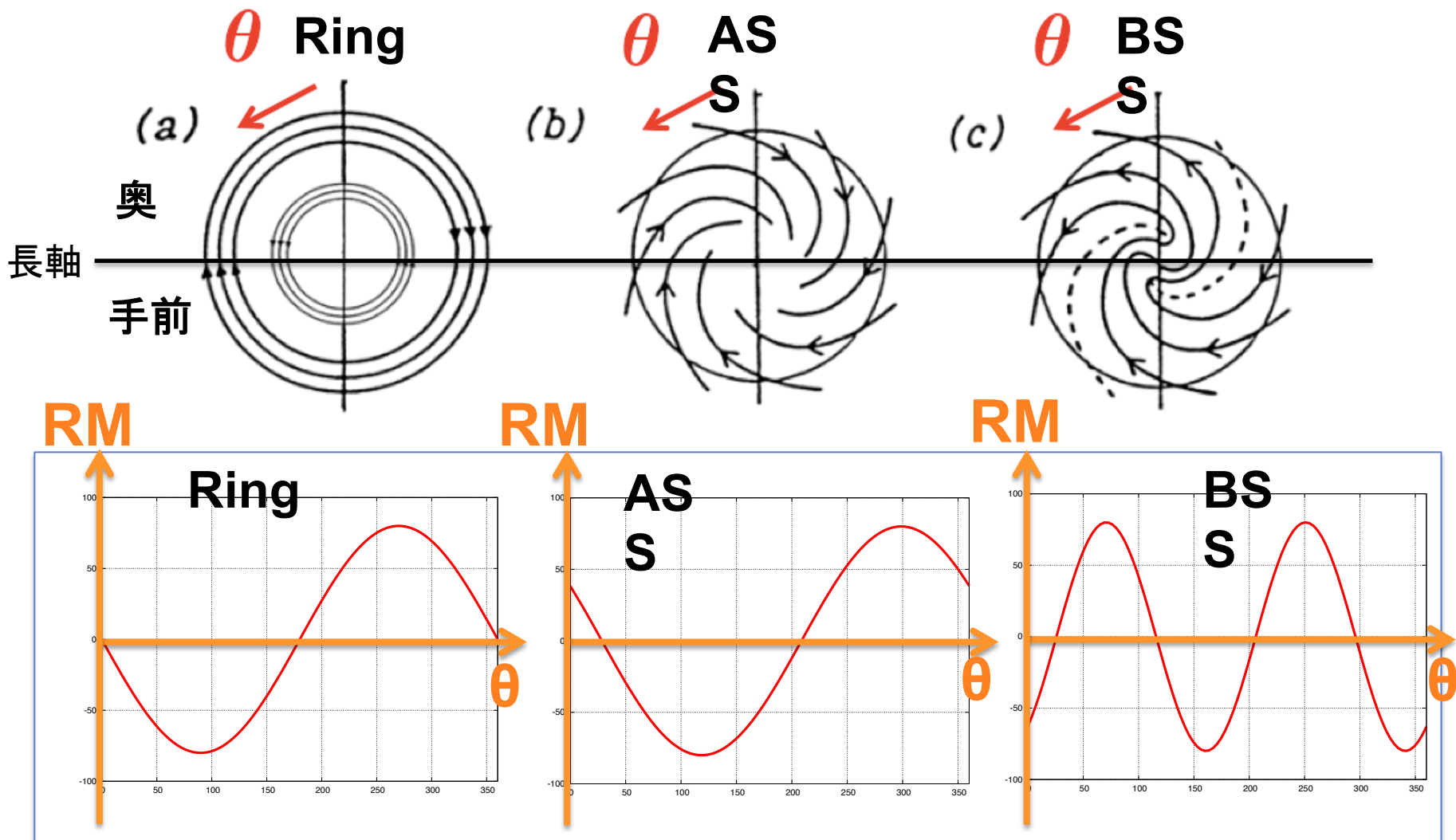
磁場が観測者から遠ざかる向き(偏波面が西回り)

RM < 0



INTRODUCTION

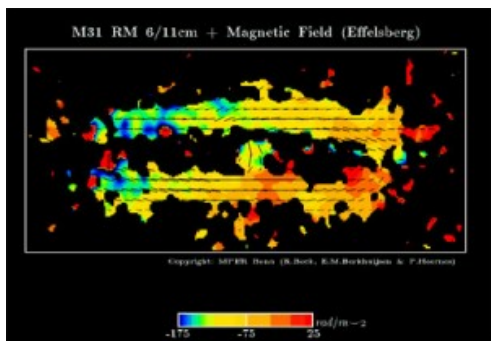
「従来の分類方法」



INTRODUCTION

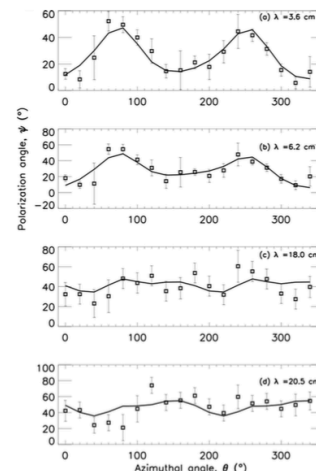
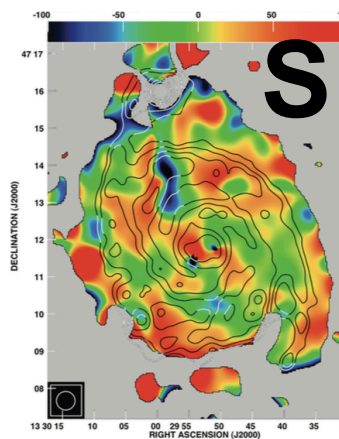
「先行研究: M31 & M51」

【M31】 Ring+ASS 【M51】 BS

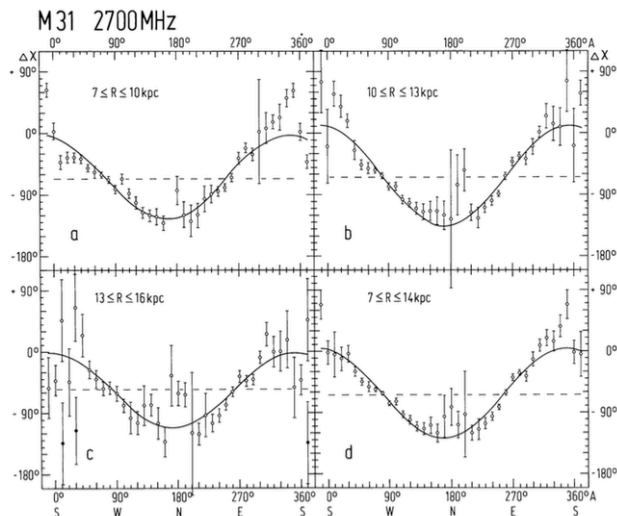


Beck 1982

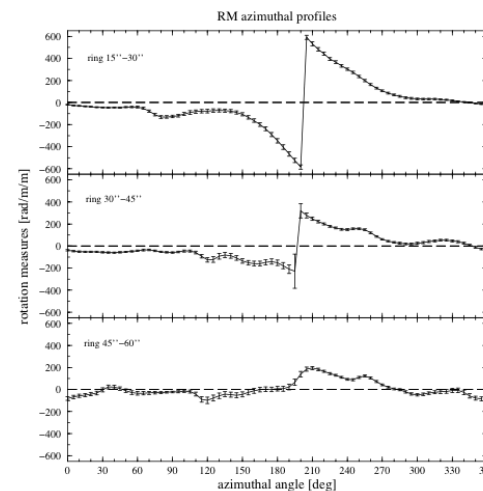
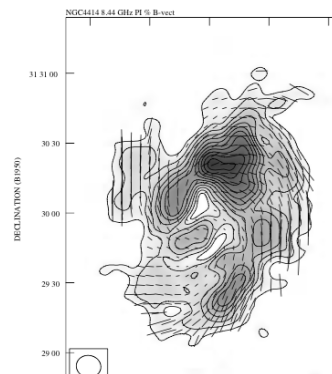
R. Beck, E. M. Berkhuisen P. Hoernes



Fletcher et al. 2010



【NGC4414】 ?



偏波マップのベクトルはきれいに揃っているものの、
Rotation Measureを考えるとうまく判断できない。

ASS+BSS (どちらか判別されていない)

NGC1097	NGC1365
NGC4254	NGC4414

AIM

「本研究の目的」

- ❖ Rotation Measureの正負を調べることで、磁場の向きを決定する。
- ❖ それを高周波側の偏波マップに適用することで磁場の流れを明確にする。
- ❖ 磁場構造を視覚化することで、マップベースで磁場構造分類を行う。

Object

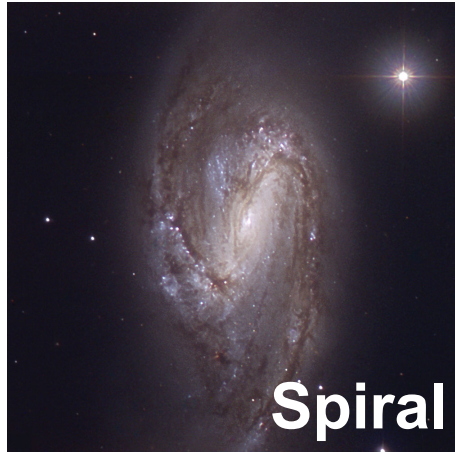
計7天体の銀河

- 1、Hubble typeにおいて **Spiral** であること
- 2、**4~18Mpc** 以内の近傍の銀河
- 3、銀河面の傾き (inclination) が **70度未満**
- 4、B等級が **11等級より明るい**

VLAより
 データを
 入手

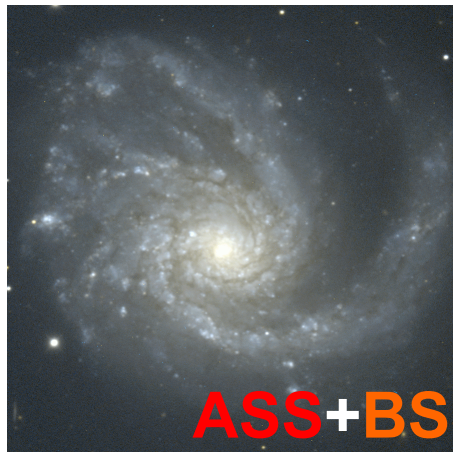
Tully 1988より選定

【NGC3627】



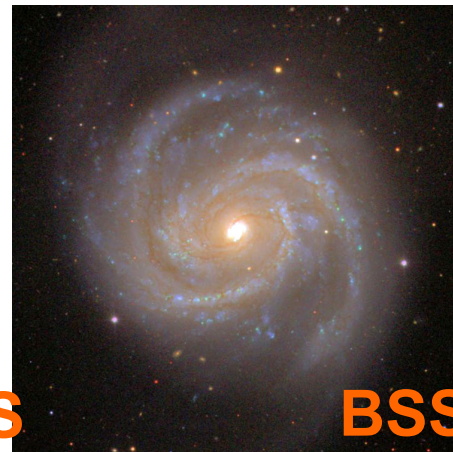
Spiral

【NGC4254】



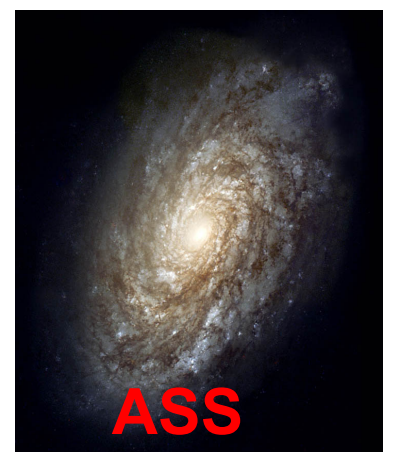
ASS+BSS

【NGC4321】



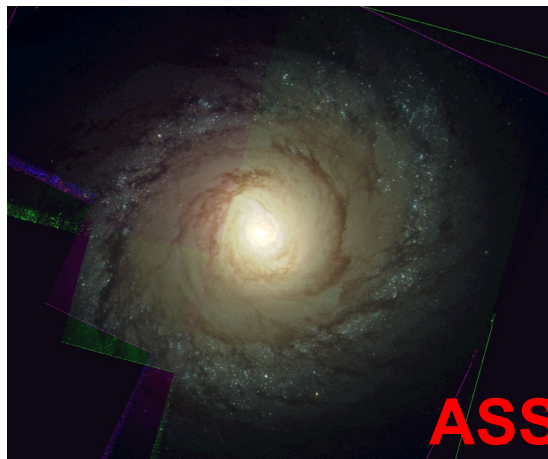
BSS

【NGC4414】



ASS

【NGC4736】



ASS

【NGC5194】



BSS

【NGC6946】



ASS

先行研究で分類が
 試みられており

ASS ... 2

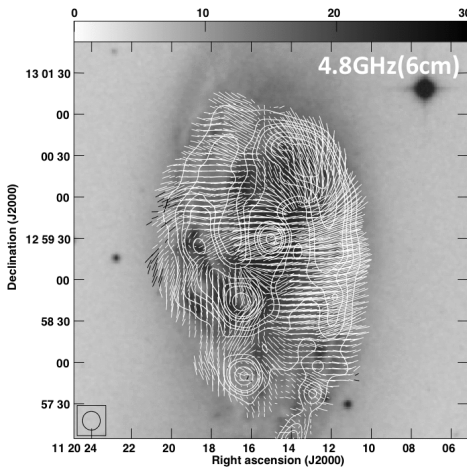
BSS ... 2

Unknown ... 3

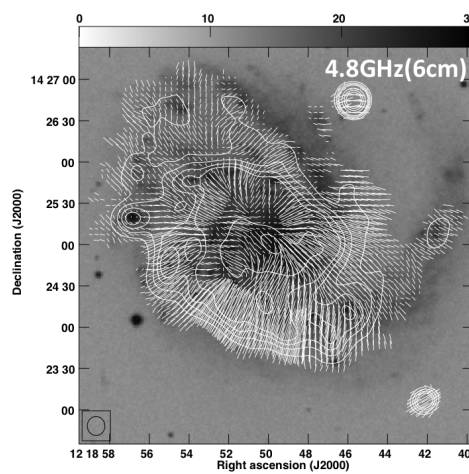
を選択

DATA reduction 「2周波の偏波マップ」

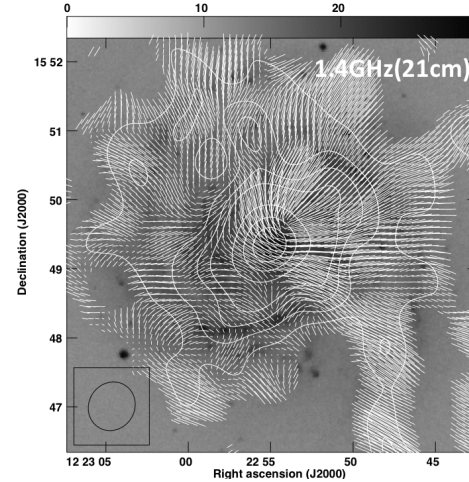
【NGC3627】



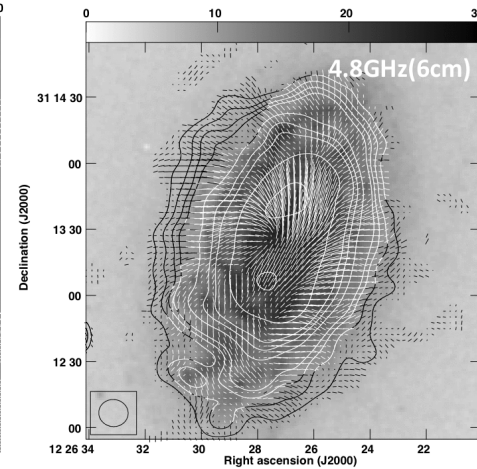
【NGC4254】



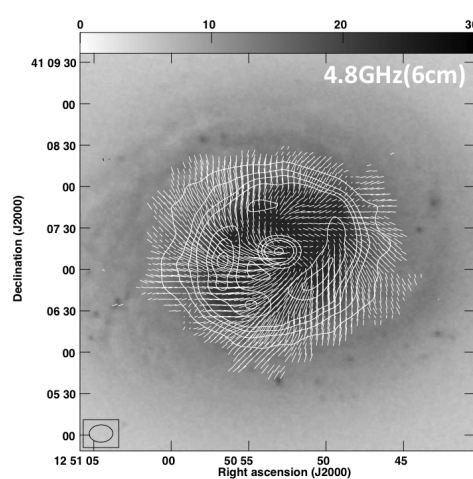
【NGC4321】



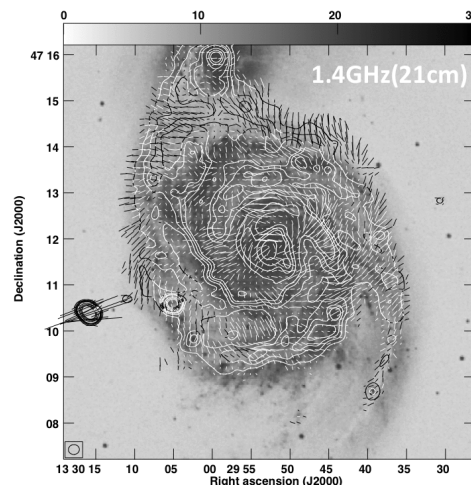
【NGC4414】



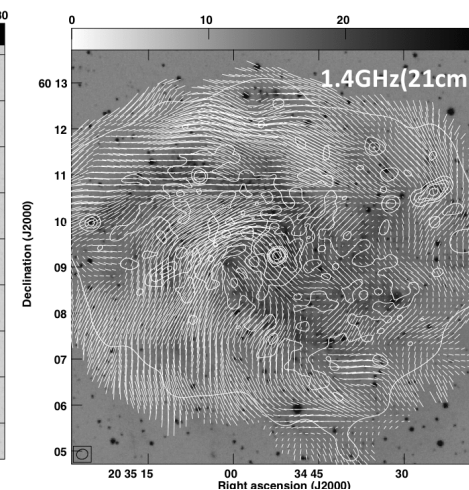
【NGC4736】



【NGC5194】



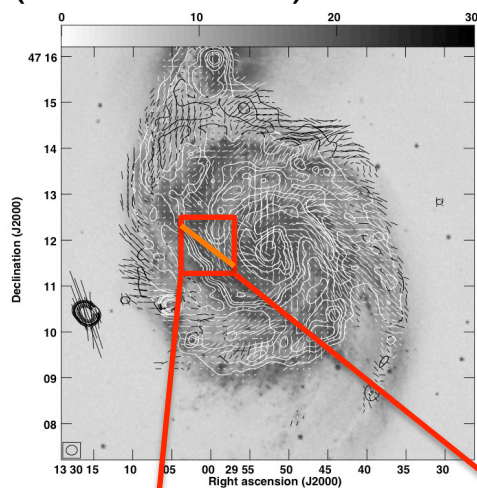
【NGC6946】



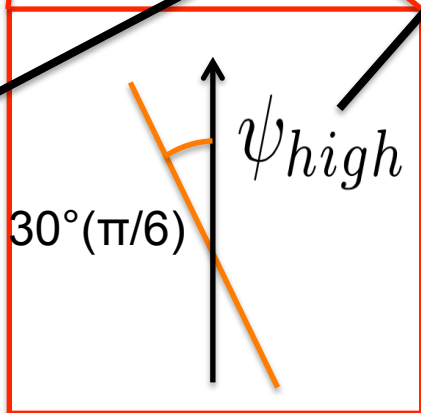
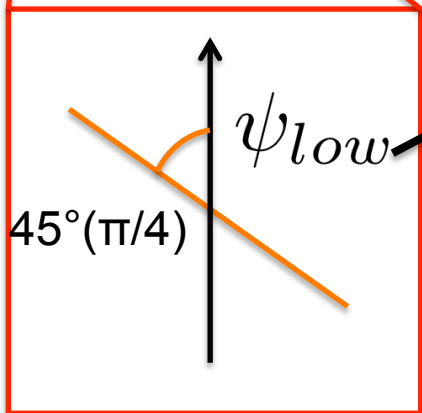
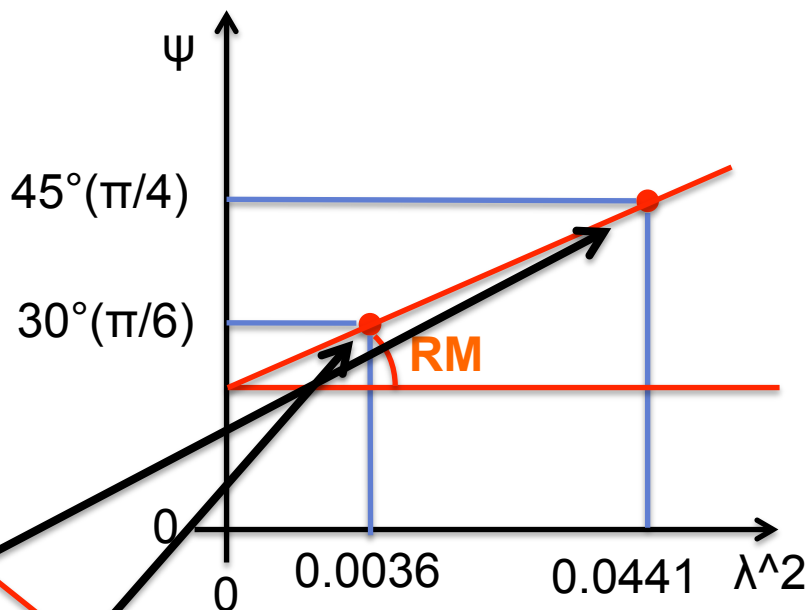
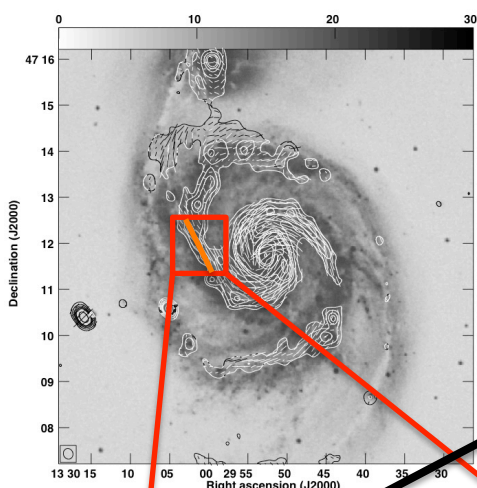
METHOD

「偏波角の差」

周波数: 1.4GHz
 (波長: 21cm)



周波数: 4.8GHz
 (波長: 6cm)



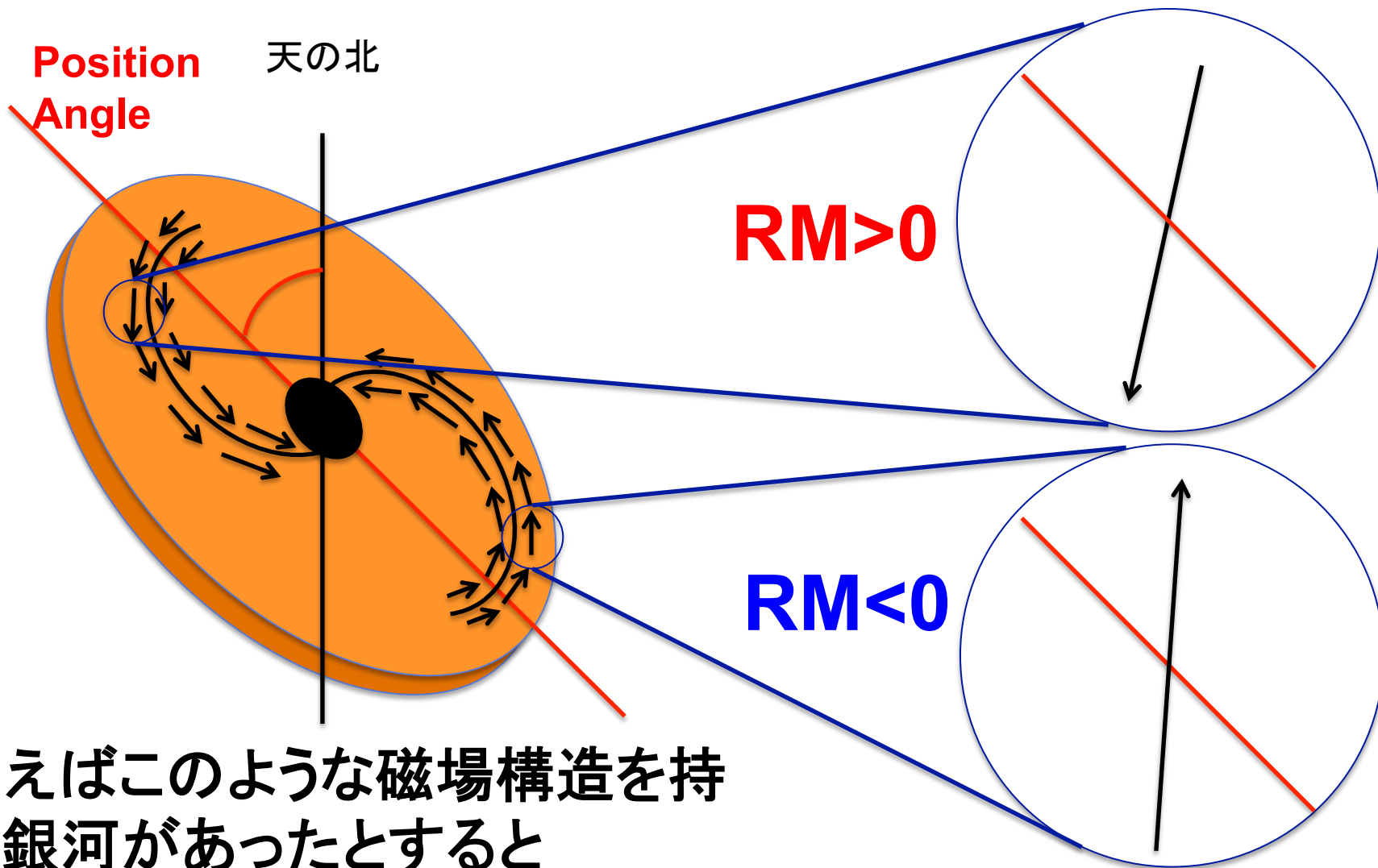
$$\Delta\psi = \psi_{low} - \psi_{high}$$

$$\Delta\psi > 0 \rightarrow RM > 0$$

$$\Delta\psi < 0 \rightarrow RM < 0$$

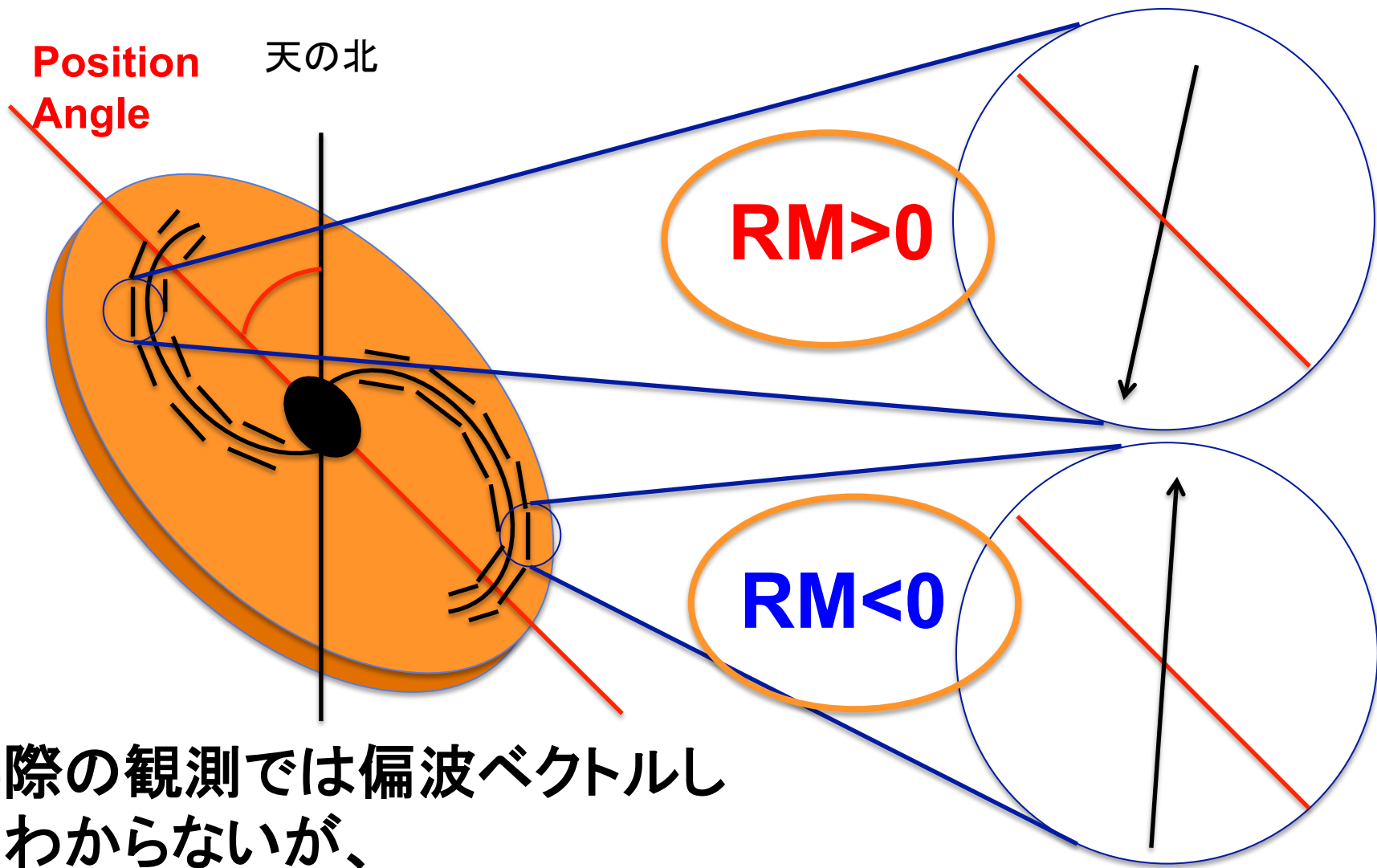
METHOAD

「銀河面における磁場ベクトルの向き」



METHOAD

「銀河面における磁場ベクトルの向き」



METHOD

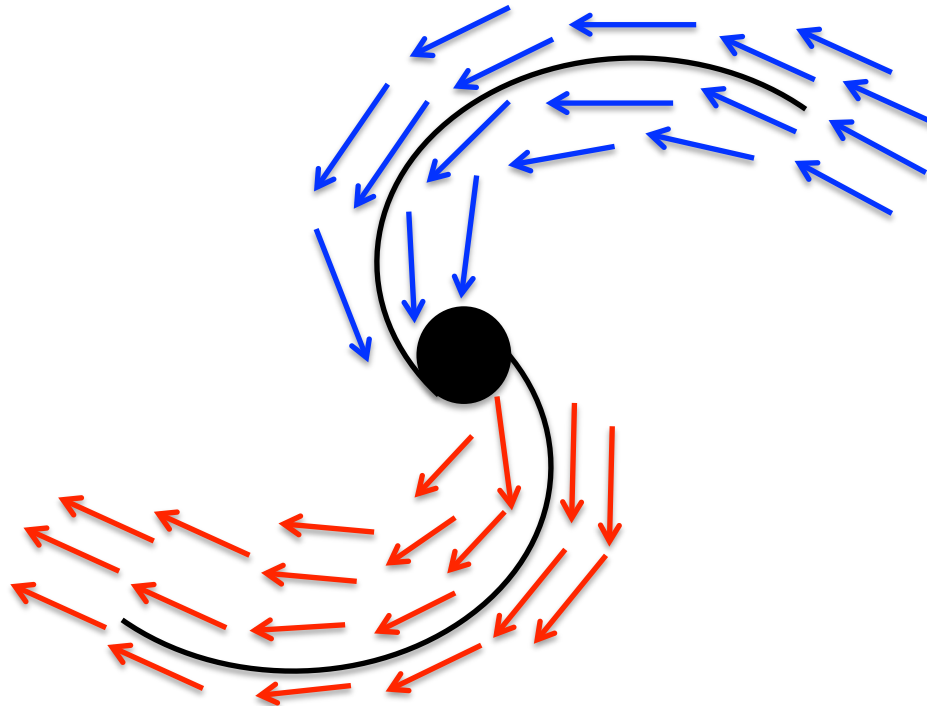
「磁場のinflowとoutflowの色わけ」

Inflow (青)

・・・腕と比較して、外側から銀河中心に入り込む磁場

Outflow (赤)

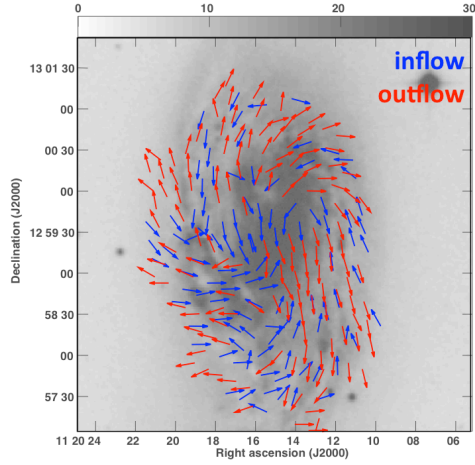
・・・腕と比較して、内側から銀河外縁部に出て行く磁場



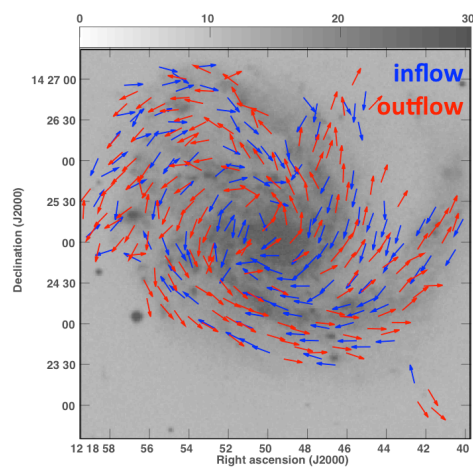
RESULT

「7銀河の磁場ベクトルマップ」

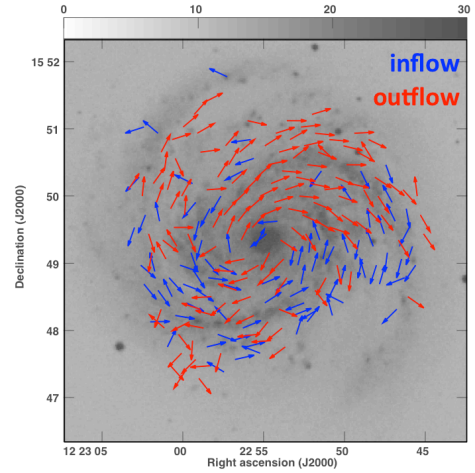
【NGC3627】



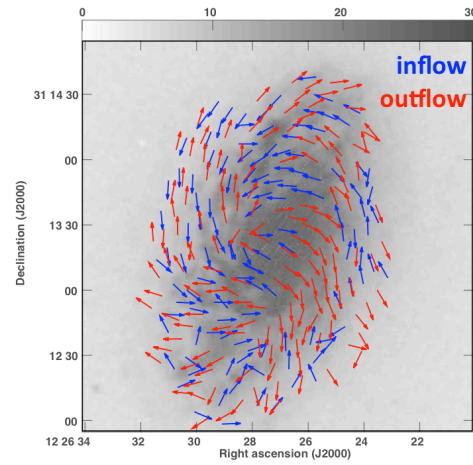
【NGC4254】



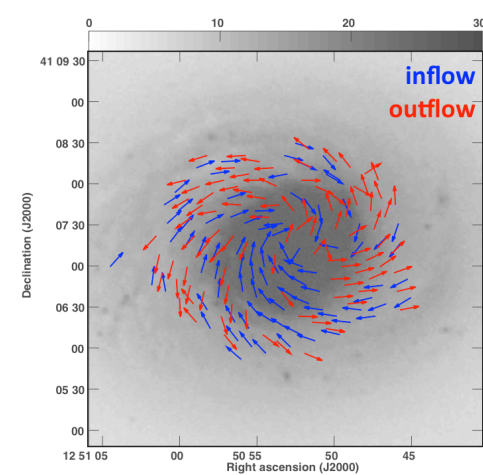
【NGC4321】



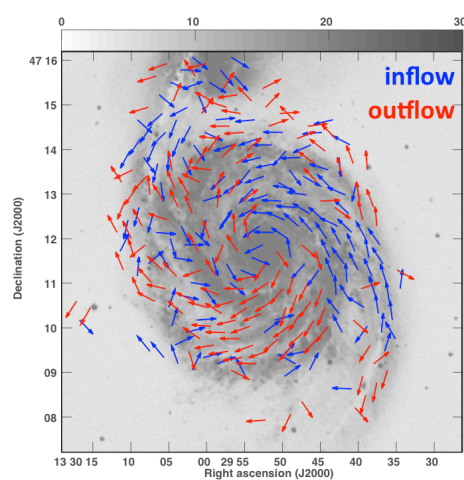
【NGC4414】



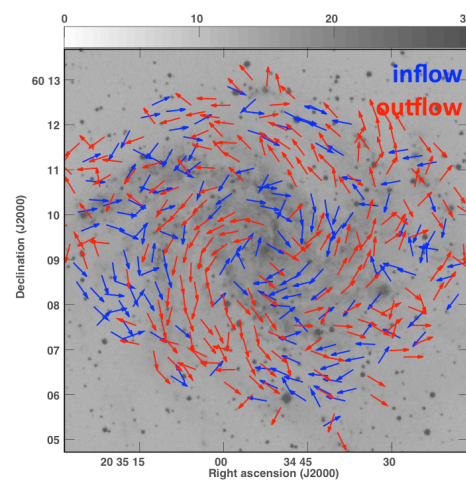
【NGC4736】



【NGC5194】



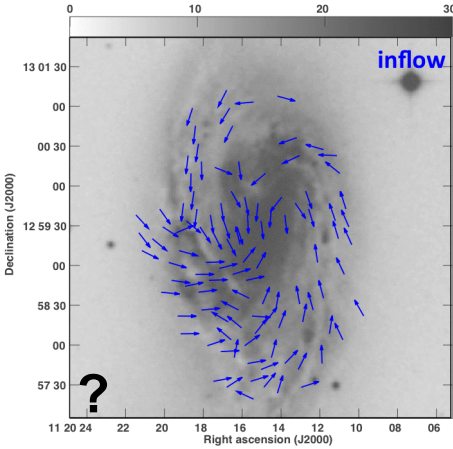
【NGC6946】



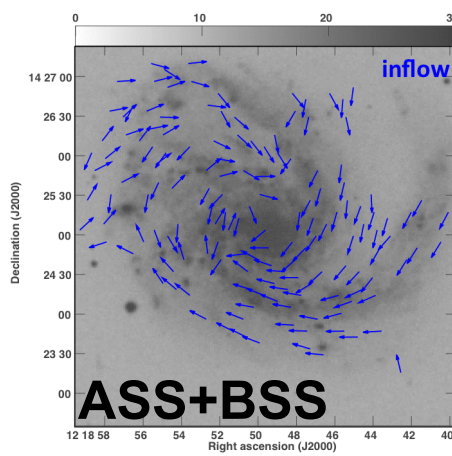
Discussion 1

全ての銀河はBSS磁場構造を持つのではないか

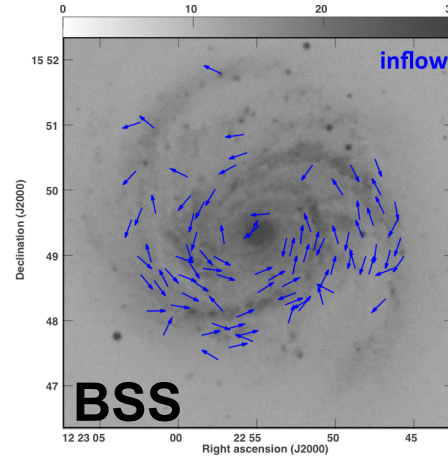
【NGC3627】



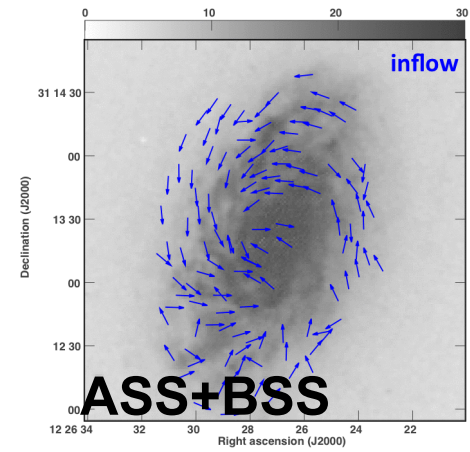
【NGC4254】



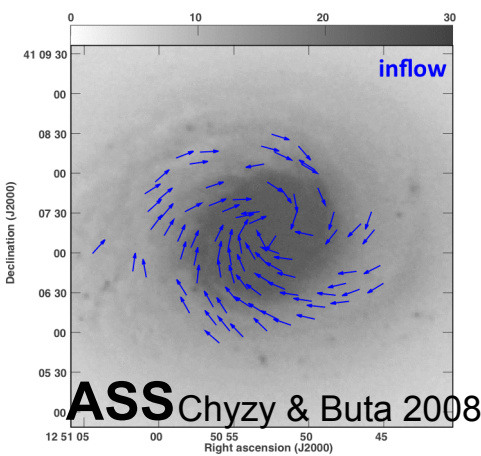
【NGC4321】



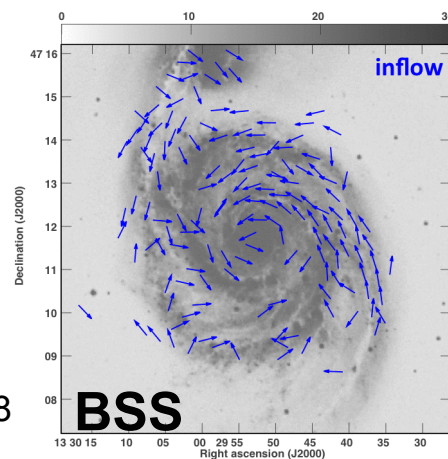
【NGC4414】



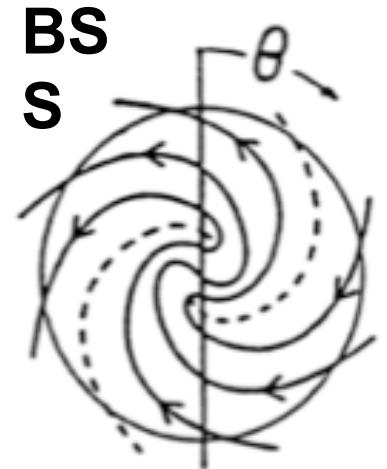
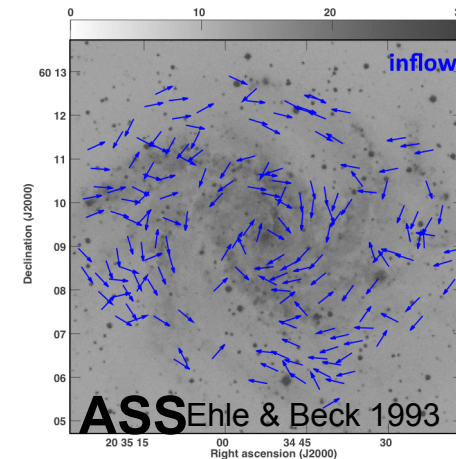
【NGC4736】



【NGC5194】

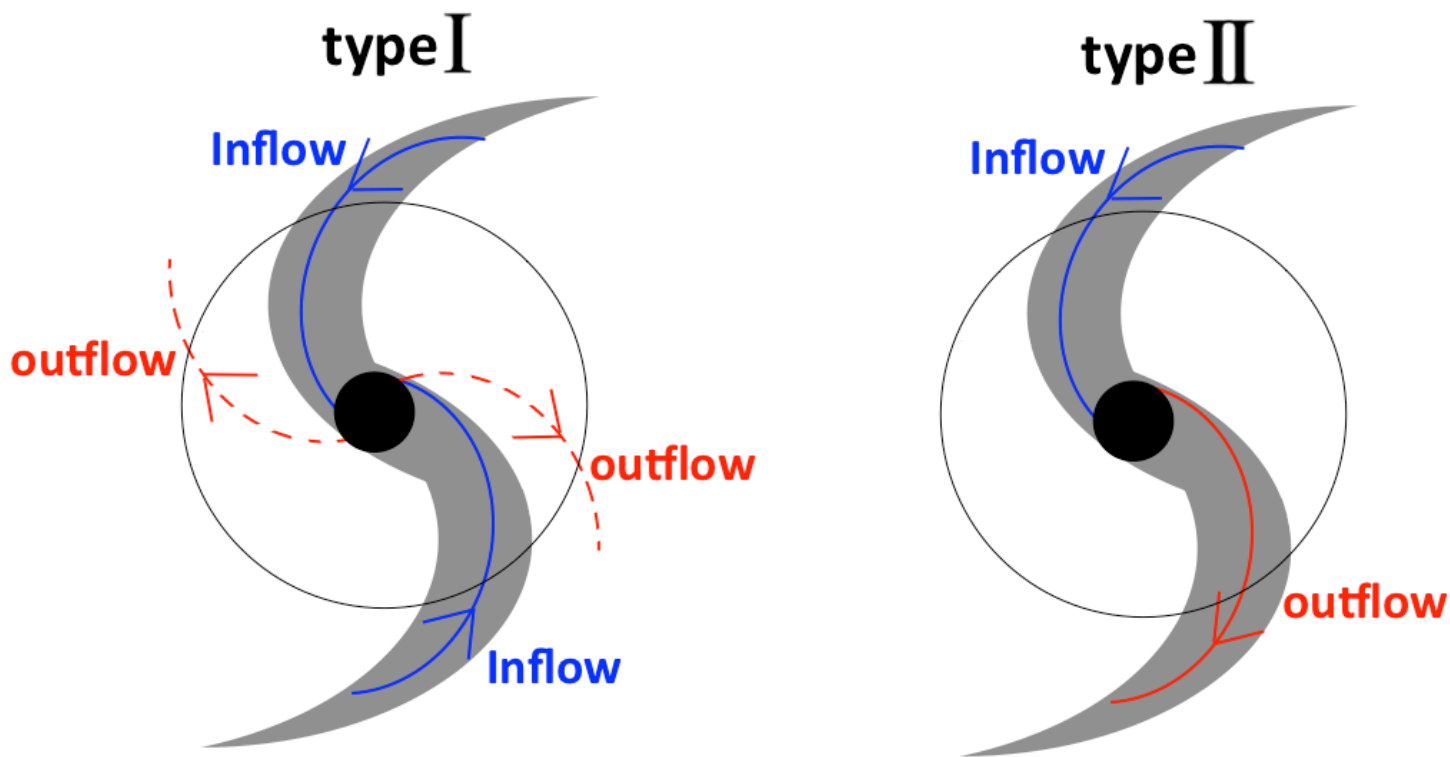


【NGC6946】



Discussion 2

2種類のBSS構造がある可能性が考えられる



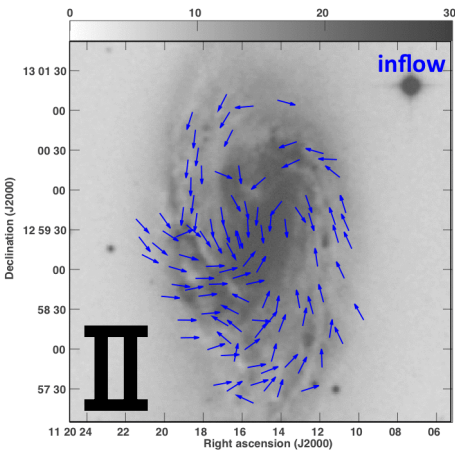
腕 ... 磁場の流入 (inflow)
腕の間 ... 磁場の流出 (outflow)

ある腕 ... 磁場の流入 (inflow)
他の腕 ... 磁場の流出 (outflow)

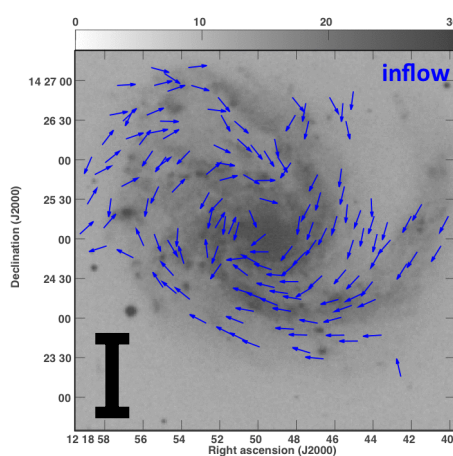
DISCUSSION 2

2種類のBSS構造がある可能性が考えられる

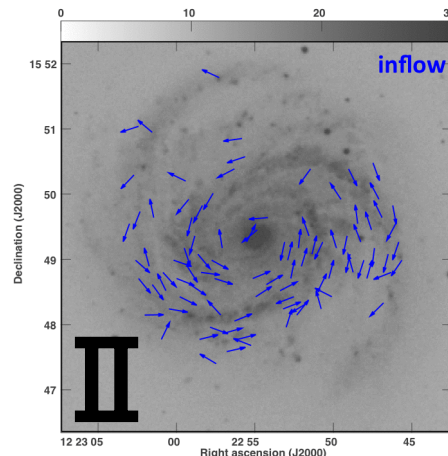
【NGC3627】



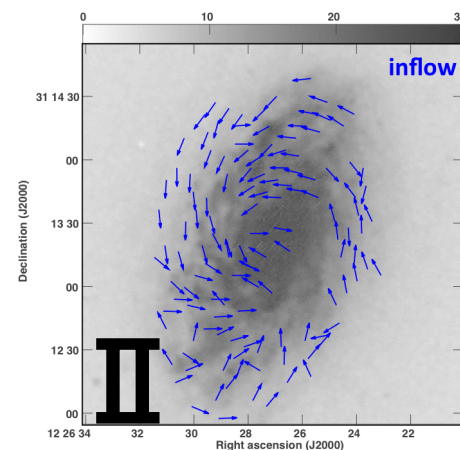
【NGC4254】



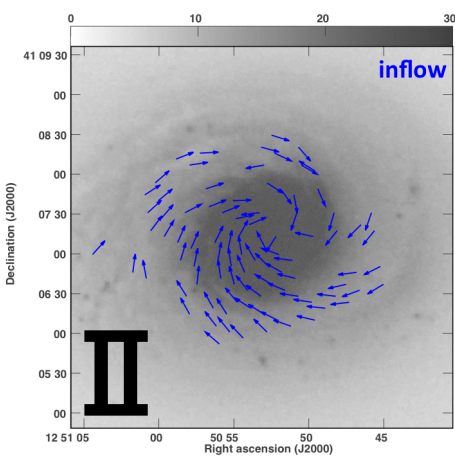
【NGC4321】



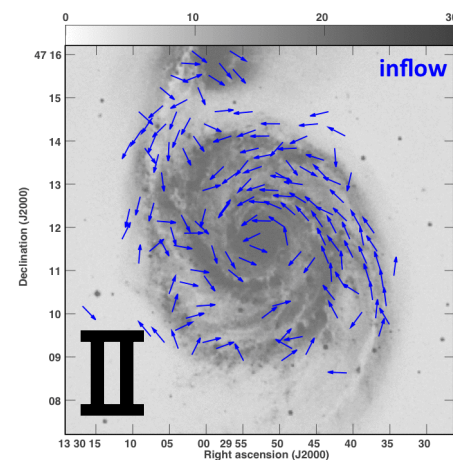
【NGC4414】



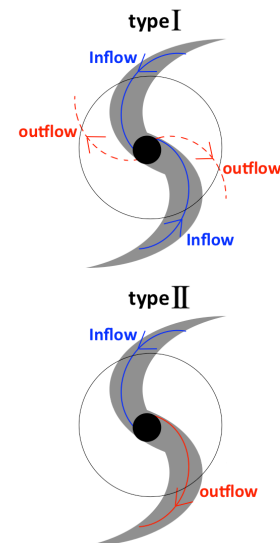
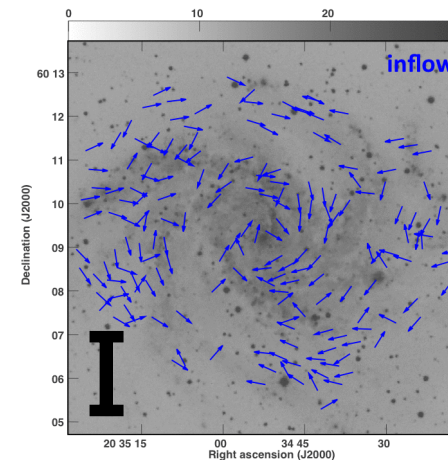
【NGC4736】



【NGC5194】



【NGC6946】



Summary

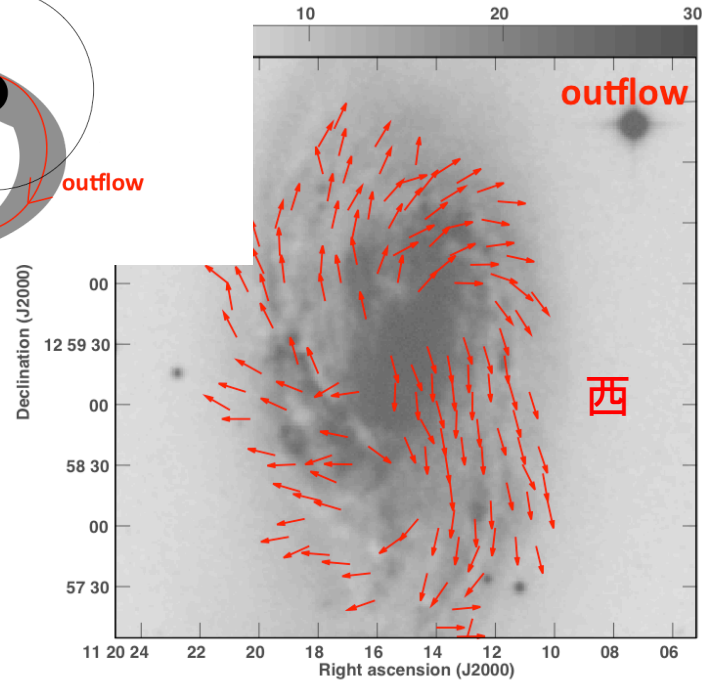
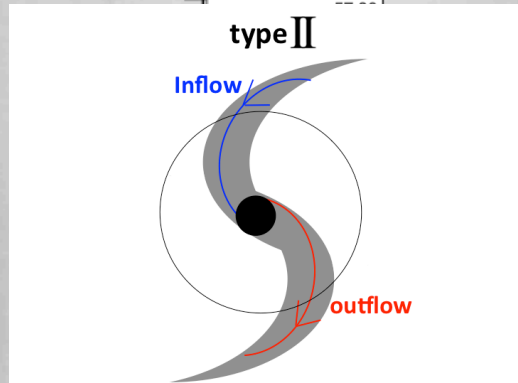
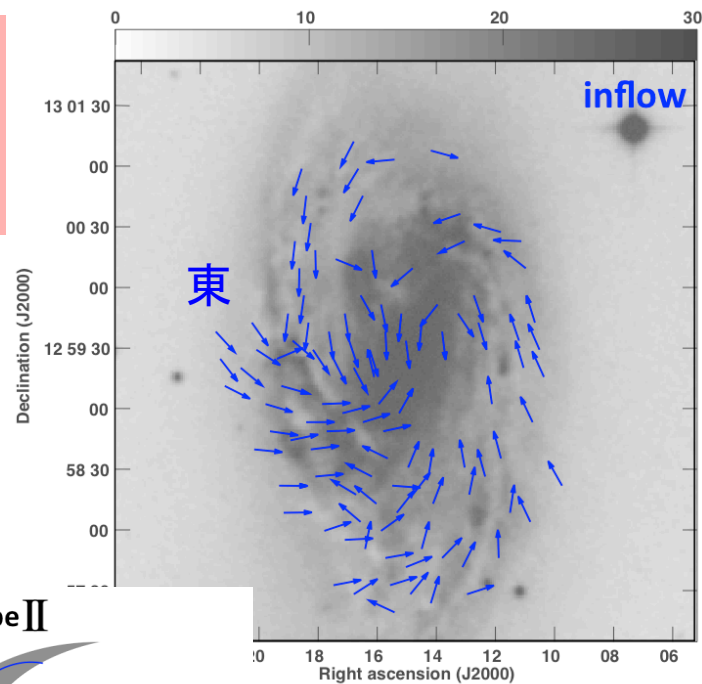
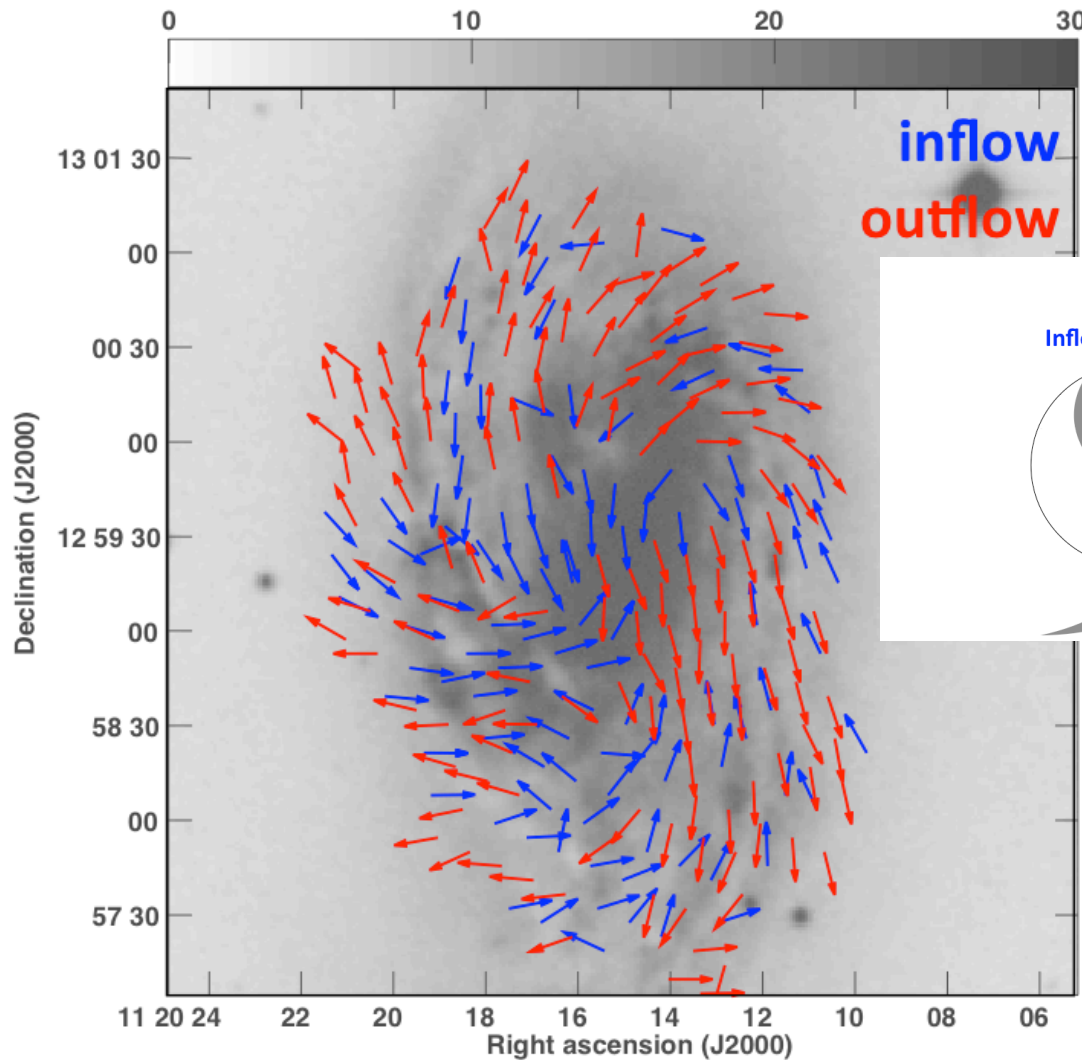
「まとめ」

- 新しい銀河磁場構造の分類法を提示
→ 簡易的な方法であり視覚的に判断できる
- 今回解析した渦巻き銀河全てに、
BSS磁場構造の傾向が見られた。
- 2種類のBSS磁場構造の可能性が考えられる。

ご静聴ありがとうございました。

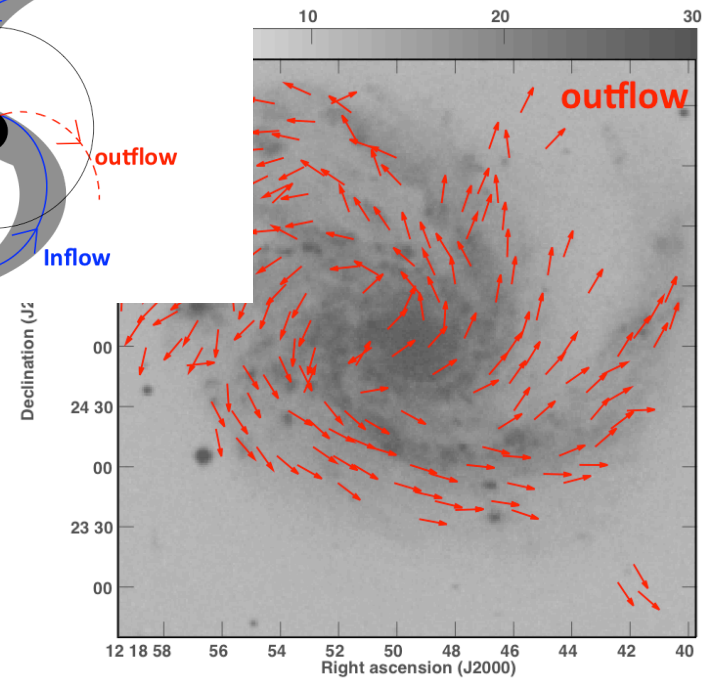
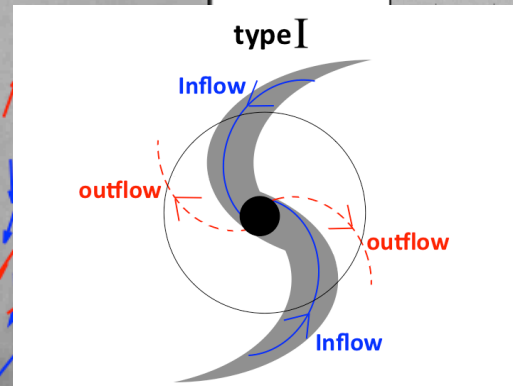
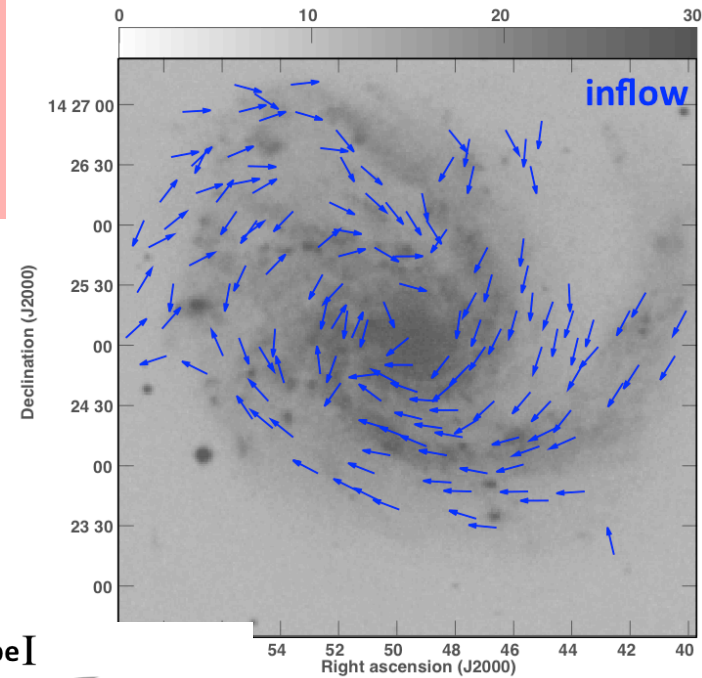
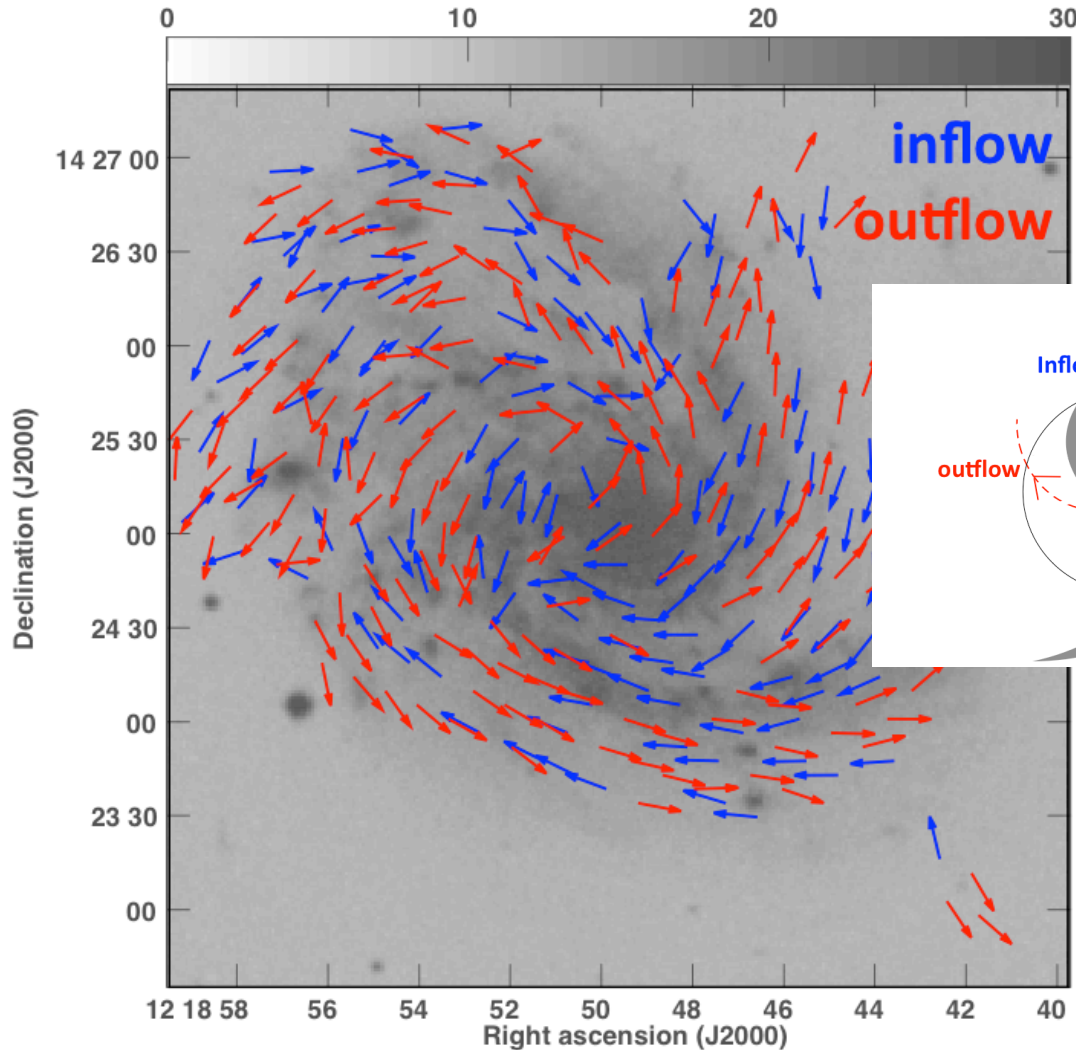
NGC3627

Hubble type : Sc
Distance : 9.9Mpc
inclination : 36°
Position angle : 173°
Frequency : 4.8GHz & 8.3GHz

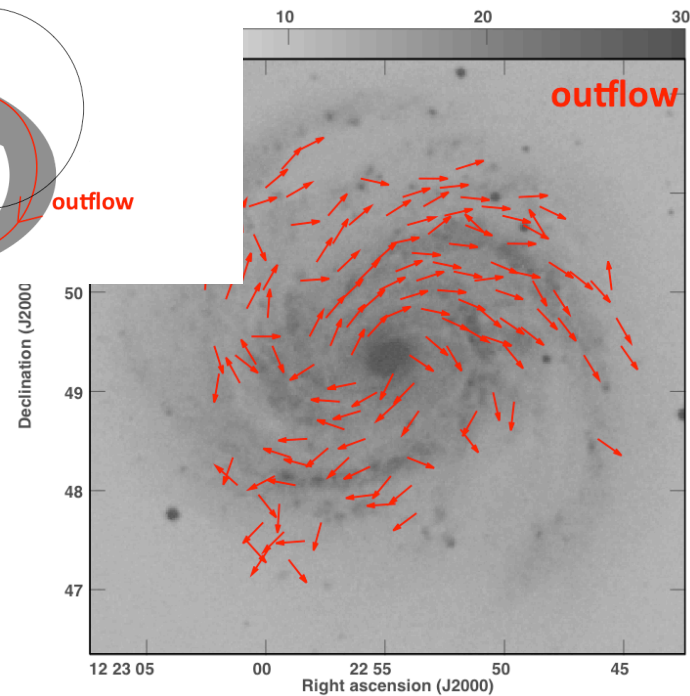
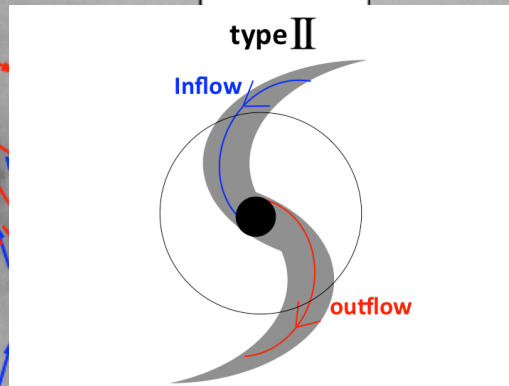
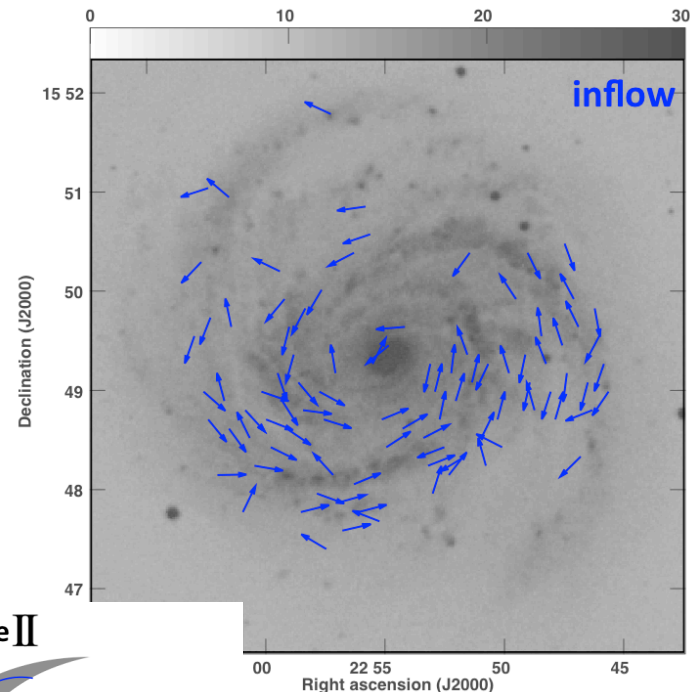
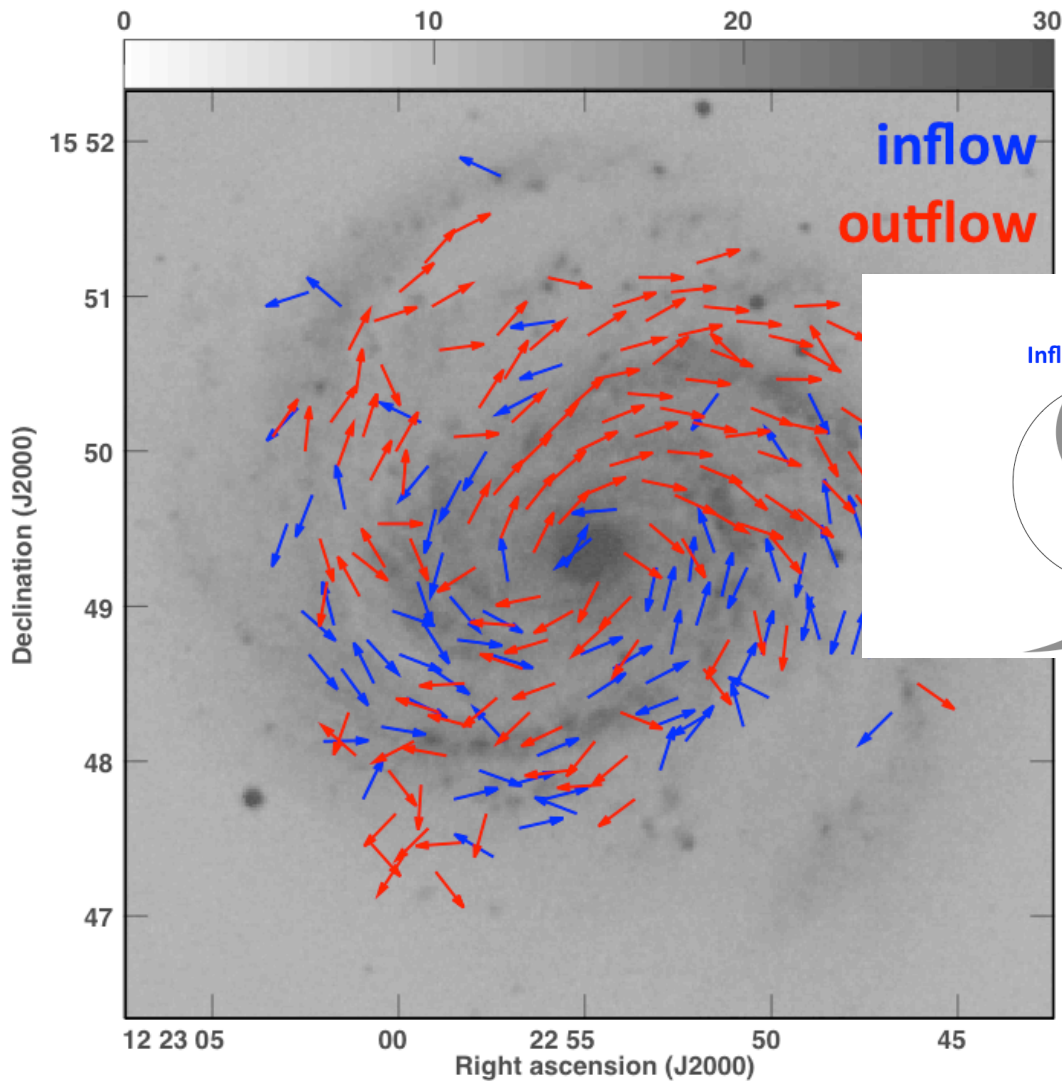


NGC4254

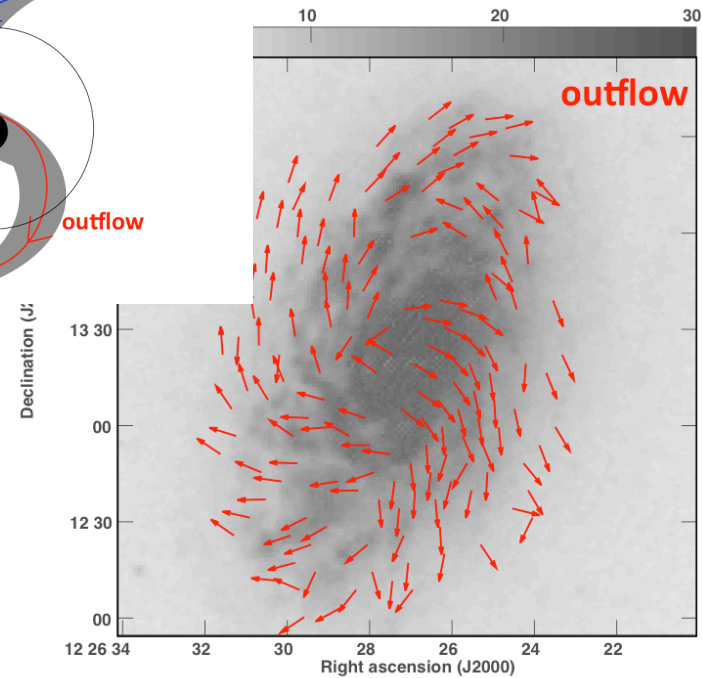
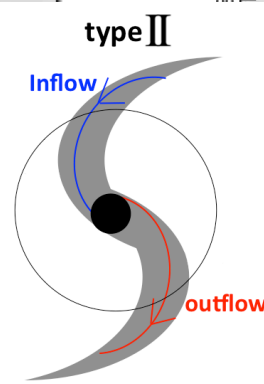
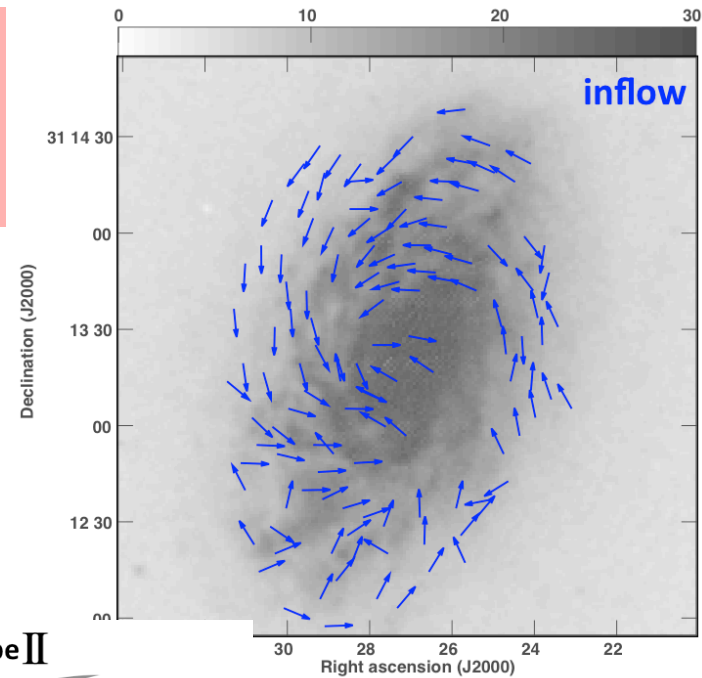
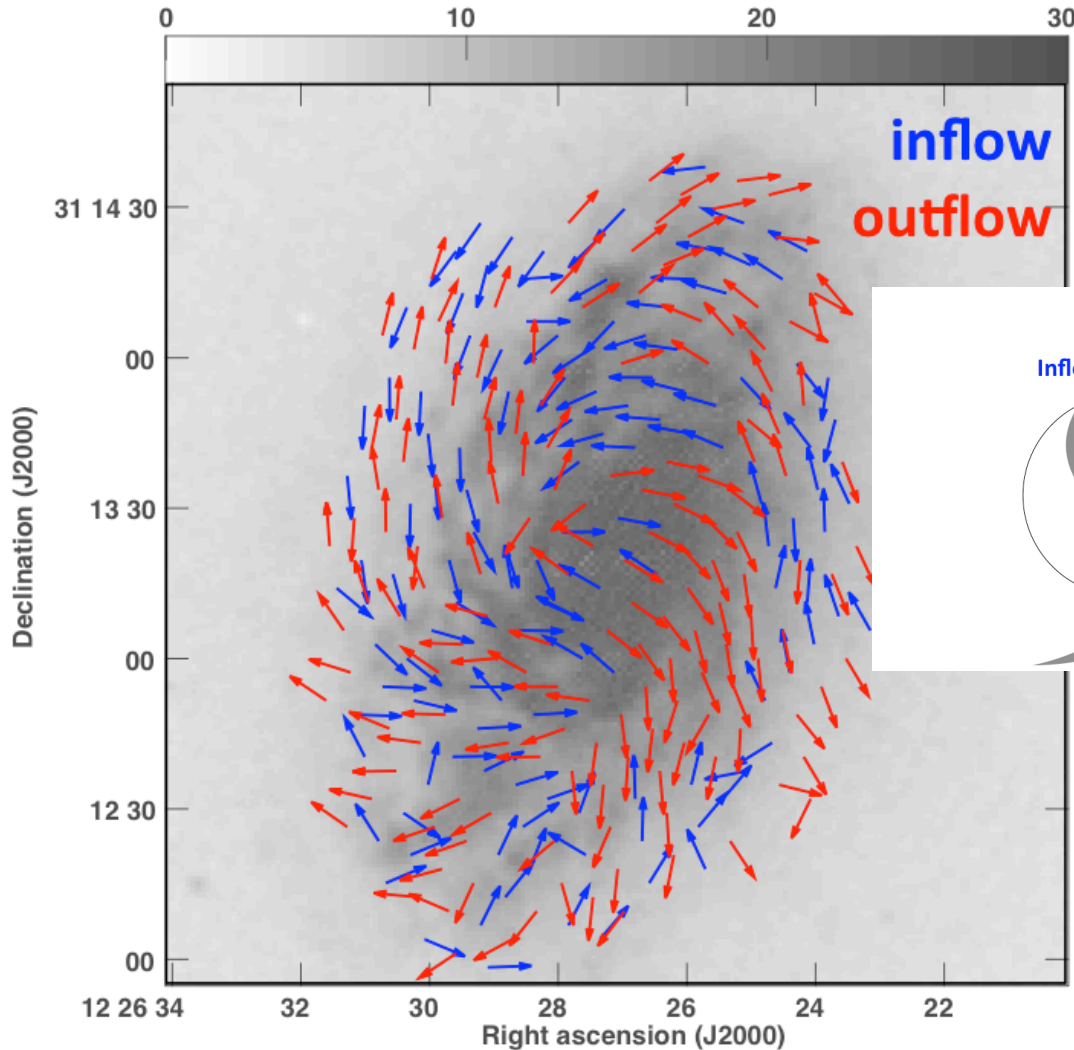
Hubble type : Sc
Distance : 15.4Mpc
inclination : 42°
Position angle : 68°
Frequency : 4.8GHz & 8.3GHz



Hubble type : Sbc
Distance : 16.8Mpc
inclination : 37°
Position angle : 30°
Frequency : 1.4GHz & 4.8GHz

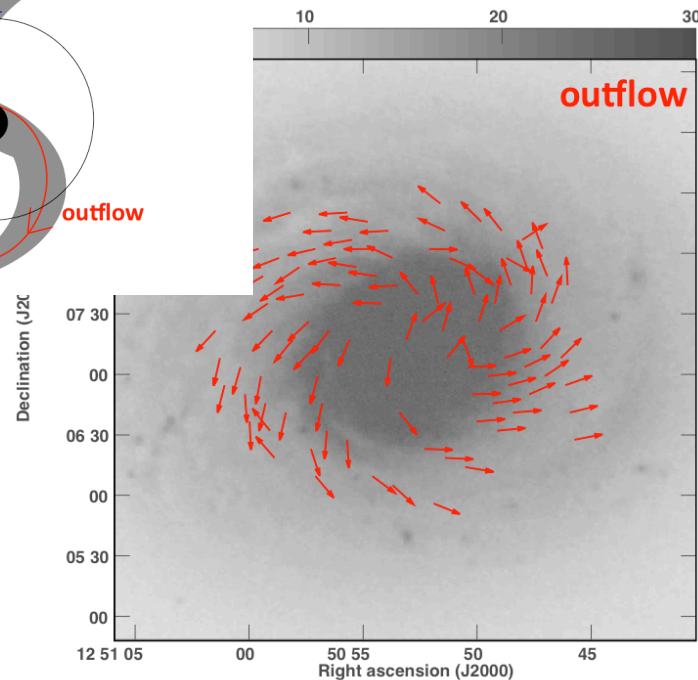
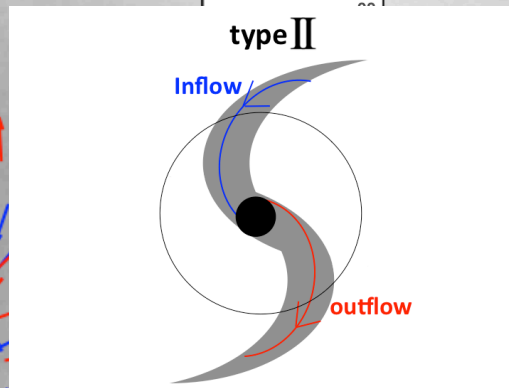
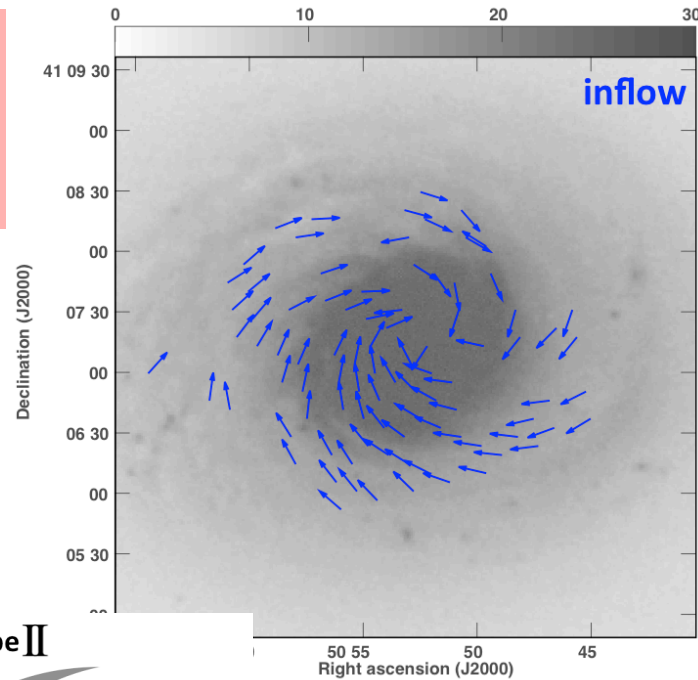
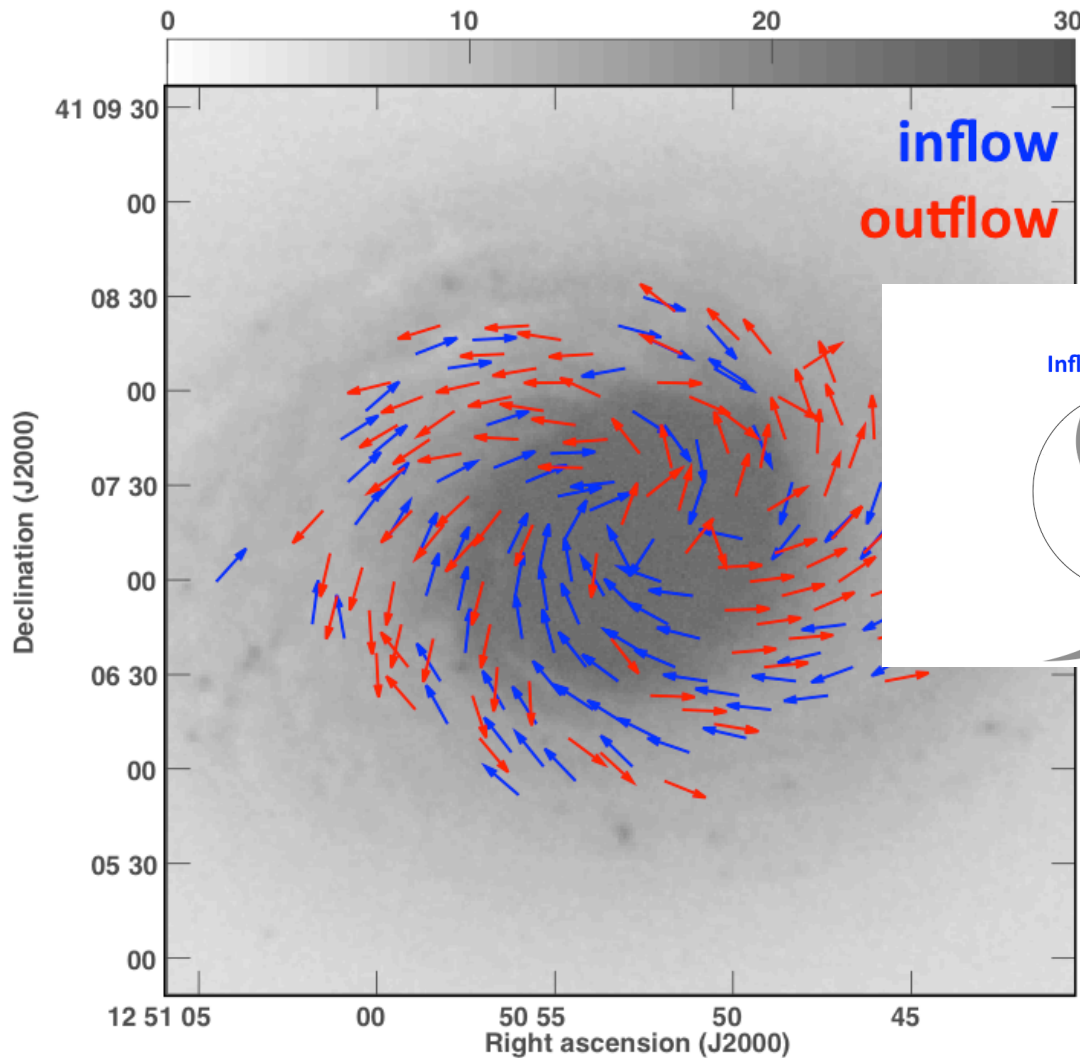


Hubble type : Sc
Distance : 18.3Mpc
inclination : 55°
Position angle : 155°
Frequency : 4.8GHz & 8.3GHz



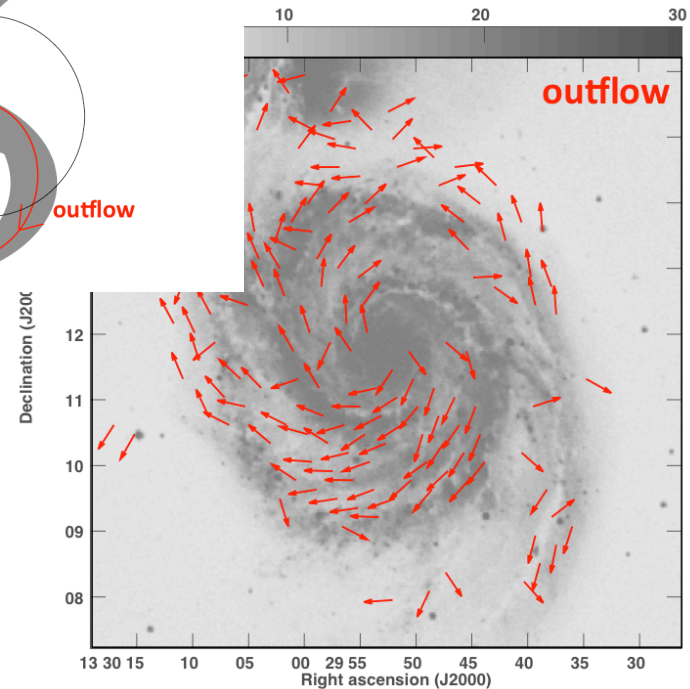
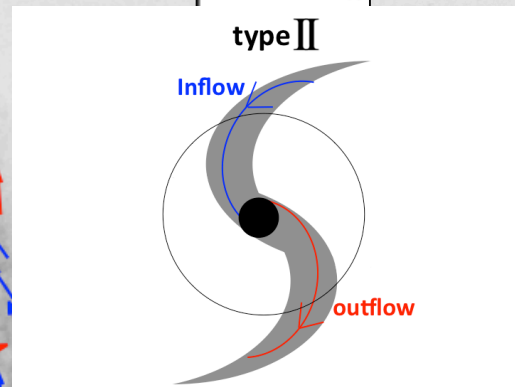
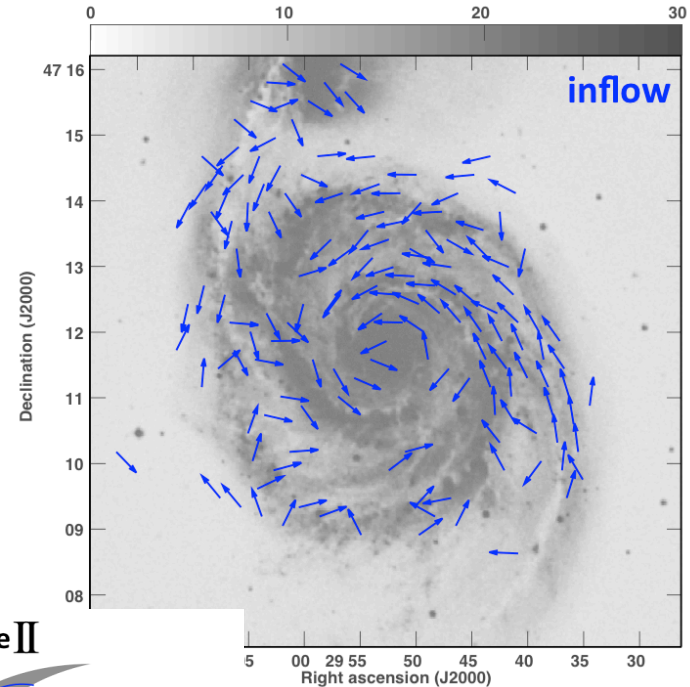
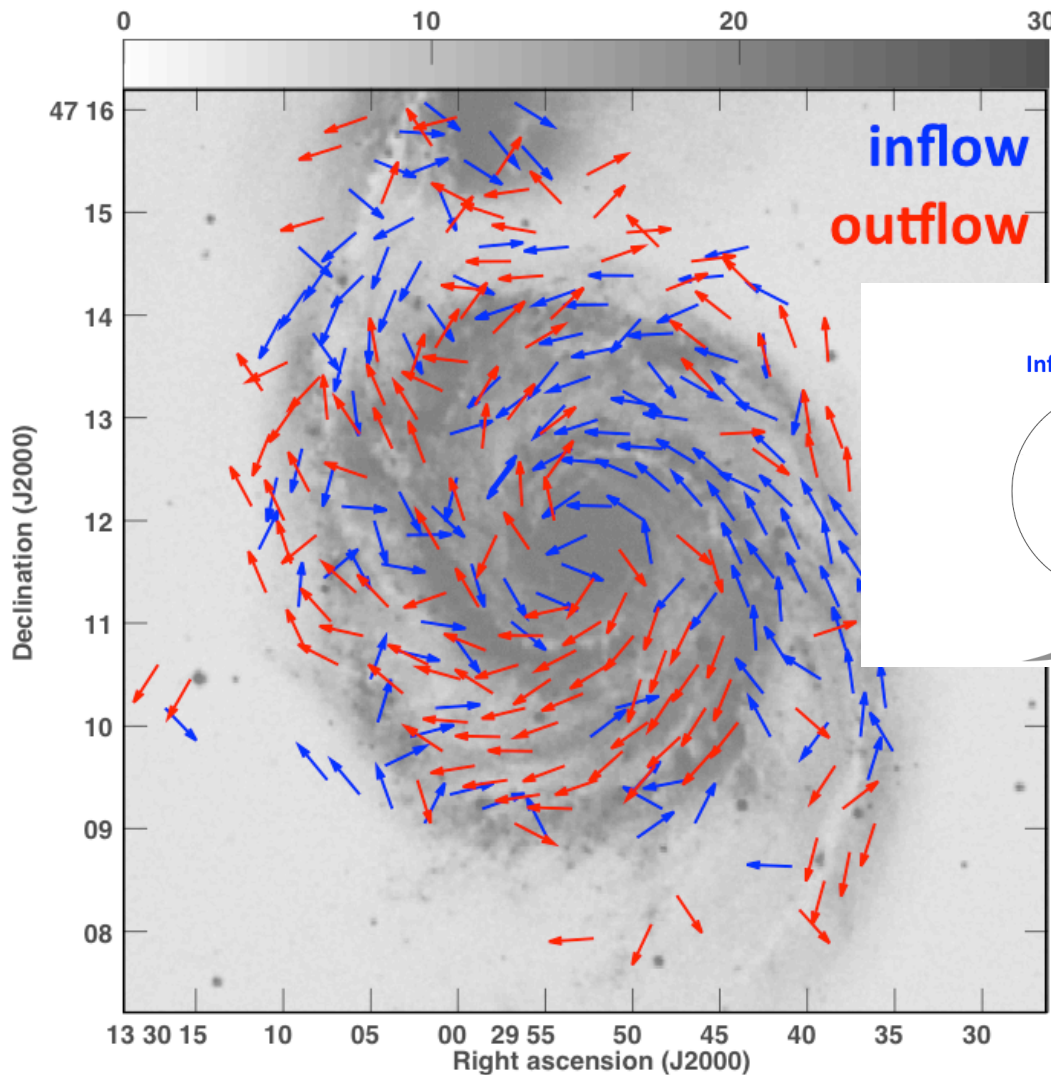
NGC4736

Hubble type : Sab
Distance : 5.02Mpc
inclination : 41°
Position angle : 96°
Frequency : 4.8GHz & 8.3GHz



NGC 5194

Hubble type : Sbc
Distance : 7.8Mpc
inclination : 20°
Position angle : 170°
Frequency : 1.4GHz & 4.8GHz



NGC 6946

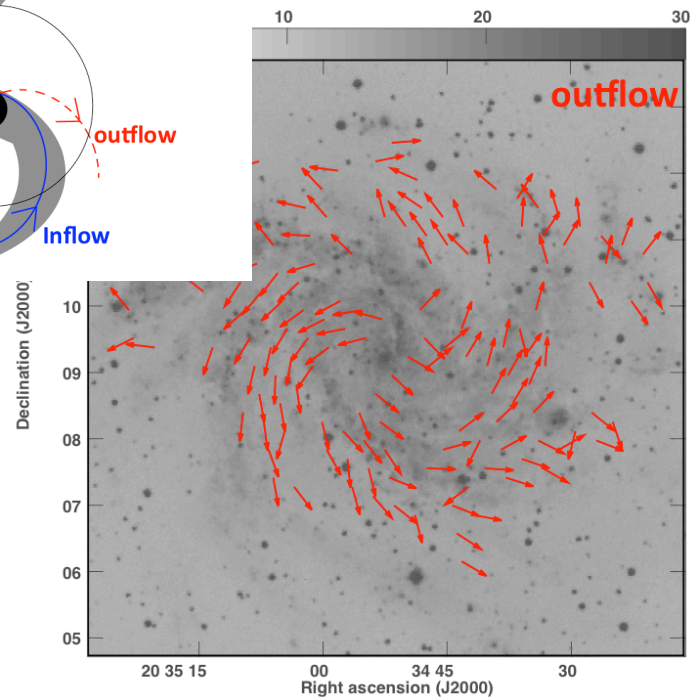
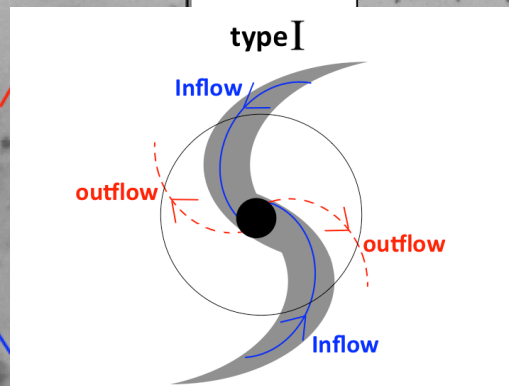
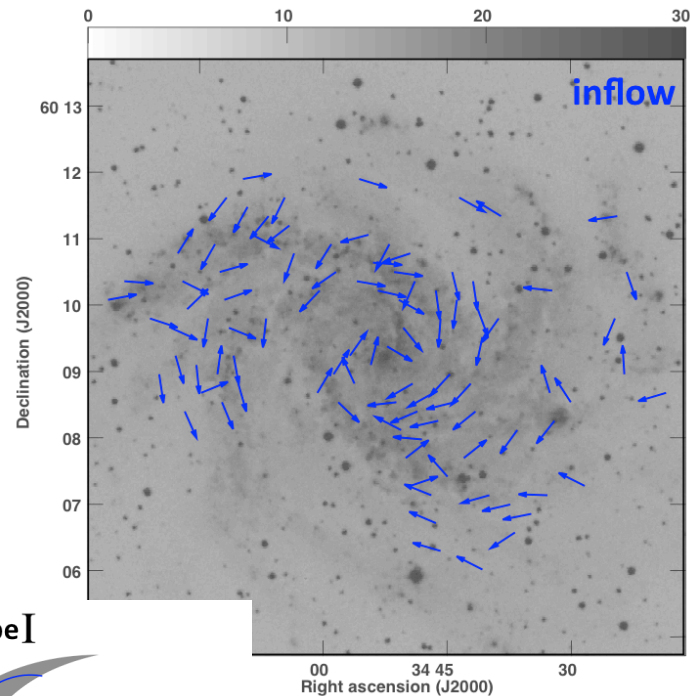
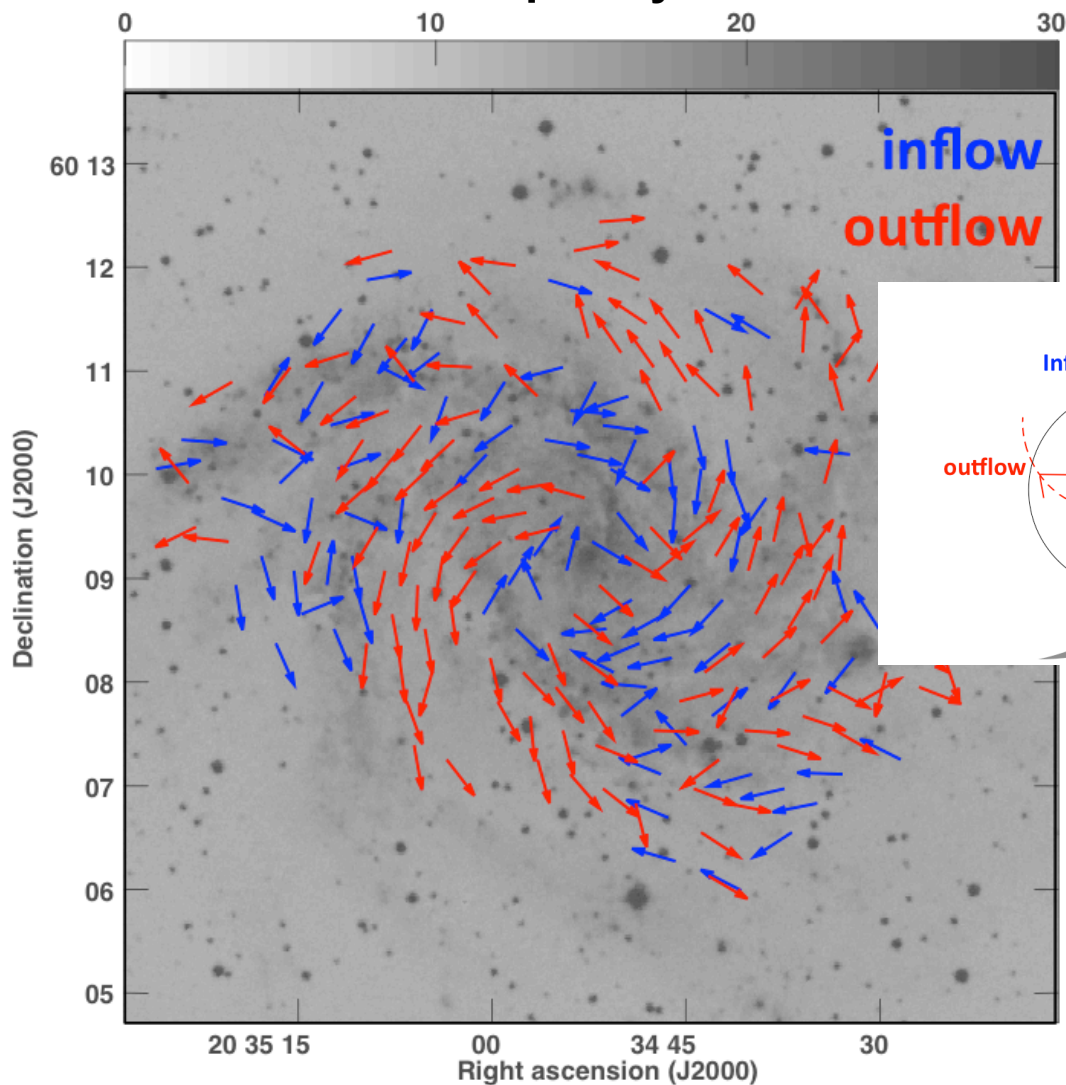
Hubble type : Sc

Distance : 5.82Mpc

Inclination : 34°

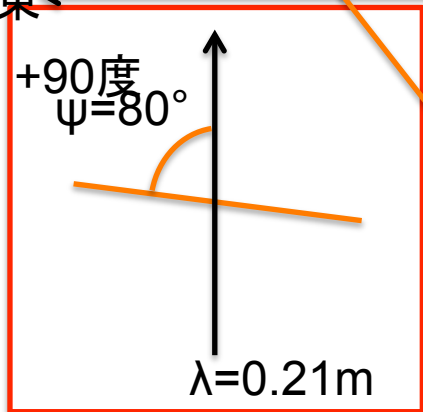
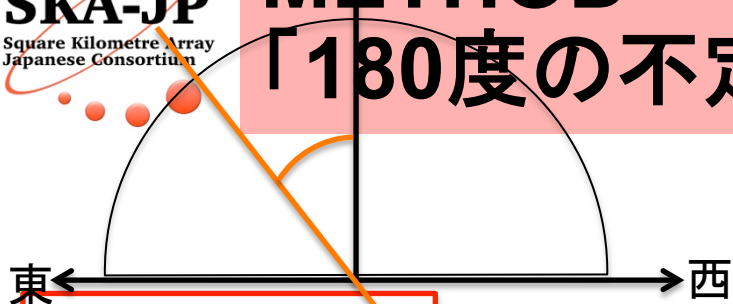
Position angle : 60°

Frequency : 1.4GHz & 4.8GHz

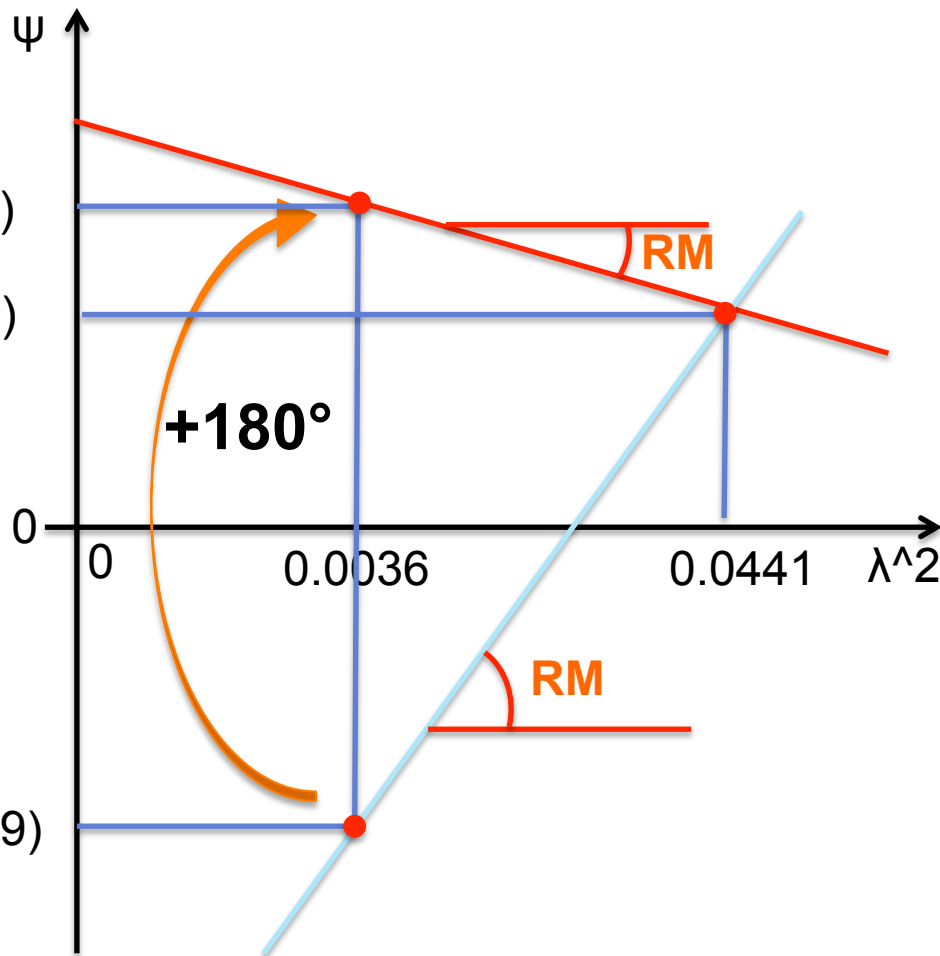
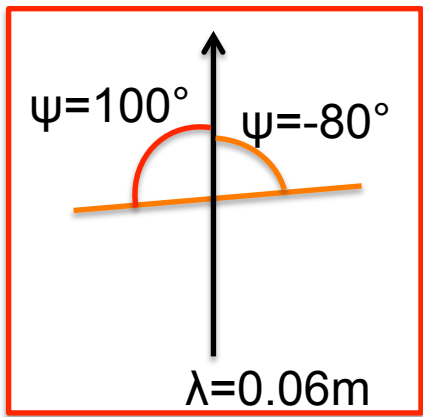


天の北
METHOD

「180度の不定性の考慮」



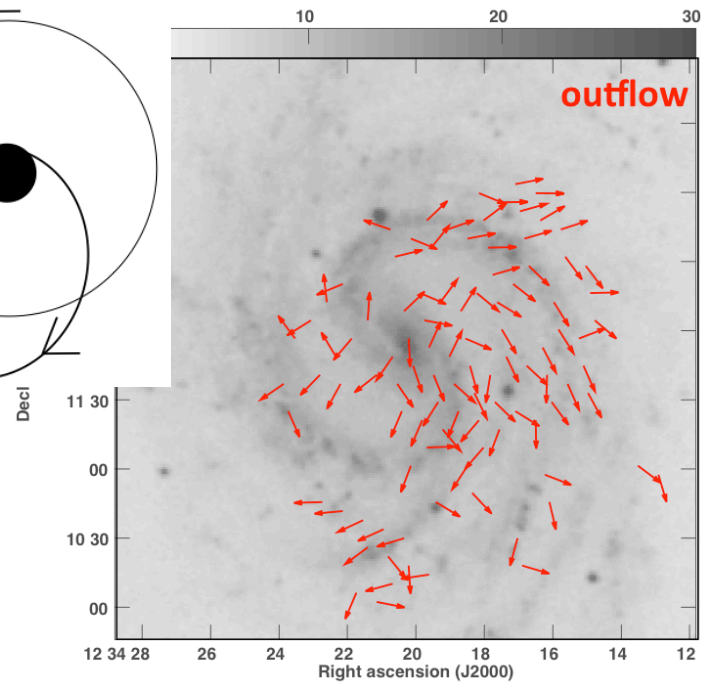
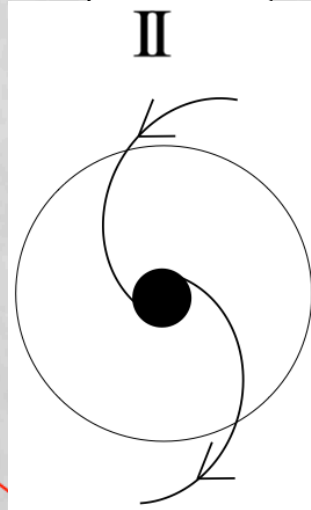
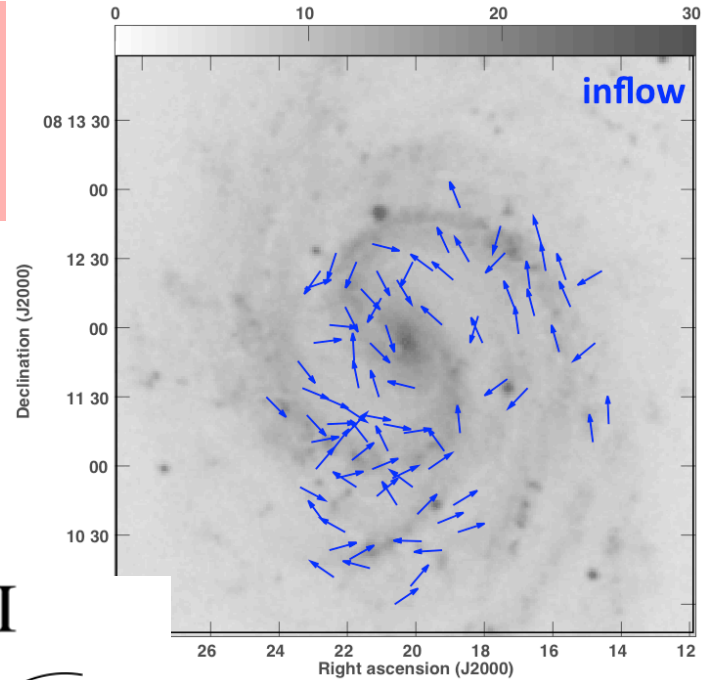
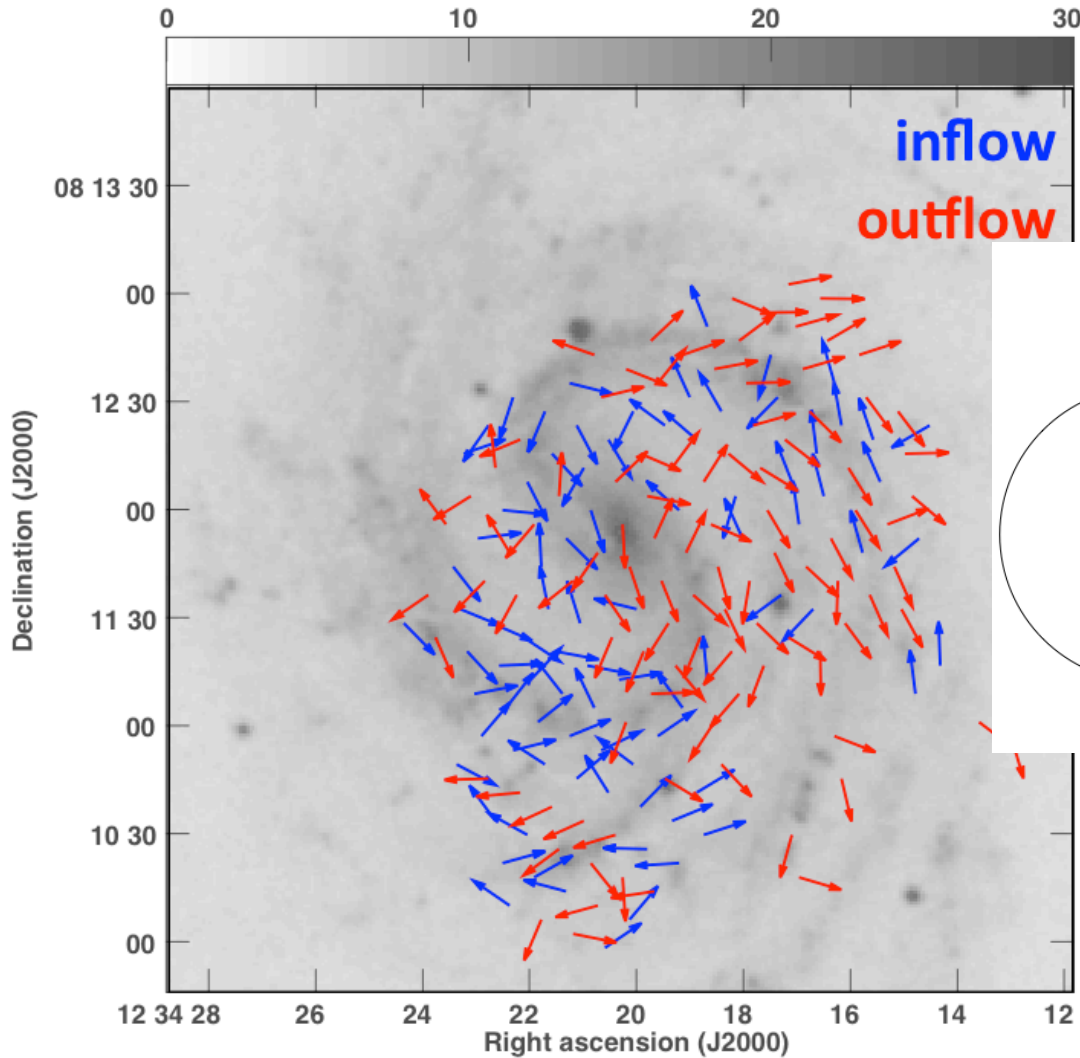
-90度
 $100^\circ (5\pi/9)$
 $80^\circ (4\pi/9)$



$\Delta\psi$ が大きい(90°を超えるような)場合は、RMが小さい方を選択している。

NGC4535

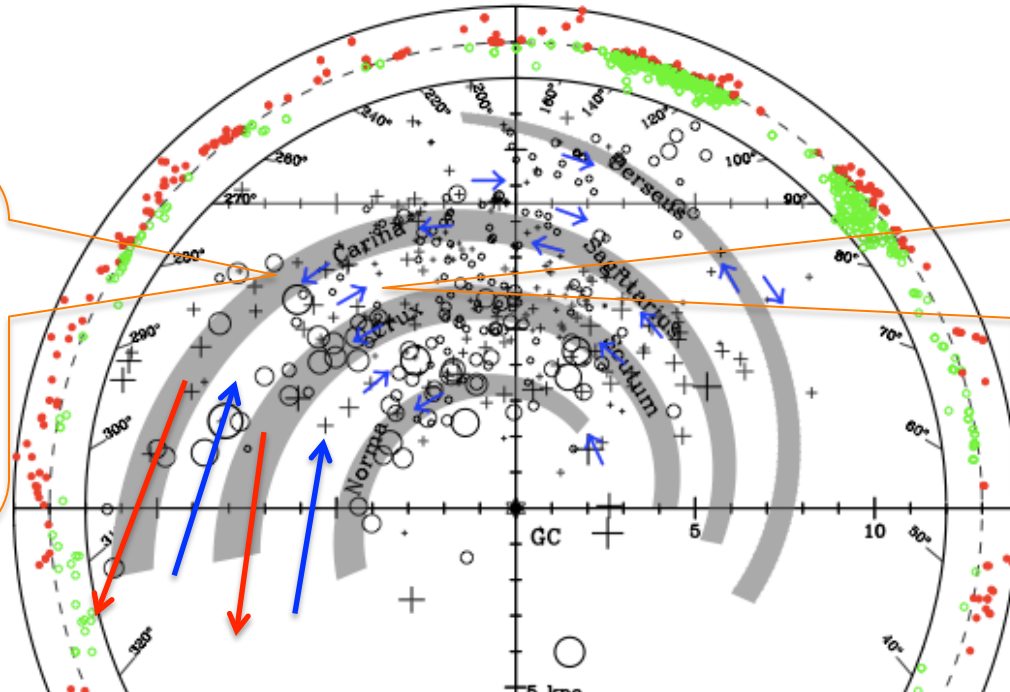
Hubble type : Sc
Distance : 16.8Mpc
inclination : 36°
Position angle : 173°
Frequency : 1.4GHz & 4.8GHz



INTRODUCTION

「先行研究：天の川」

armでは、
外向きの磁
場であり、



Inter armで
は、内向き
の磁場であ
る。

系内のPulsarによる研究では、
腕と磁場は一致しているように
見える。

電波銀河NGC3862の偏波解析による 銀河団Abell1367の磁場推定



修士論文公聴会
2015.2.12

Contents

◆ Introduction

- 銀河団の形成・進化過程と銀河団磁場の関係
- 銀河団磁場の構造を探る(Faraday Rotation)
- 観測概要

◆ Abell 1367 解析結果

◆ 磁場の推定

◆ まとめ

Introduction

- 銀河団は衝突、合体によって成長していくと考えられ、その際には銀河団媒質中で乱流の発生が示唆される。
 - 乱流は銀河団磁場の増幅を説明する鍵になるかもしれない。
 - X線輝度分布による銀河団の形態分類は形成・進化過程を反映している可能性がある。
- ⇒ 銀河団の進化と、磁場の成長には何らかの関係がある可能性
⇒⇒ X線形態分類されている銀河団の磁場を探ることで
両者を比較したい。

※乱流によって磁場が増幅されているなら

X線形態	Irregular	Regular	Cool-core
銀河団進化	衝突合体期	緩和期	冷却進化期
乱流のフェーズ	Driving	Cascade/ Saturation	Saturation/ Decay
磁場の強度	weak	strong	Rather strong

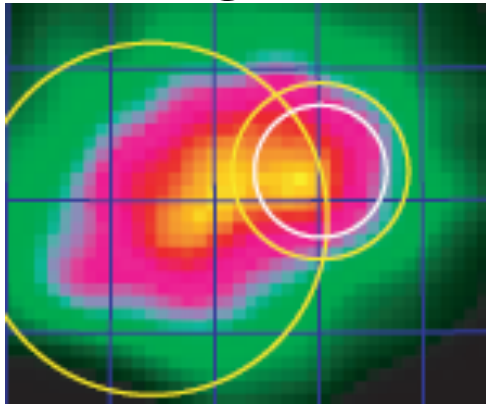
Abell 1367

※仮説

Introduction

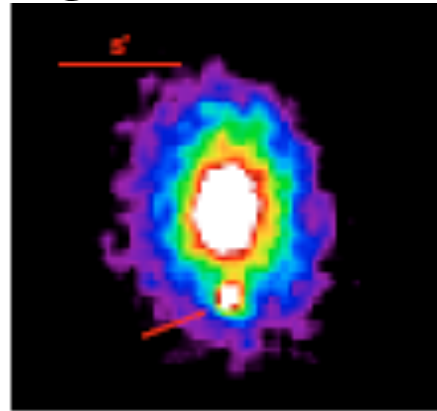
X-ray Image

◆ Irregular



Abell2256

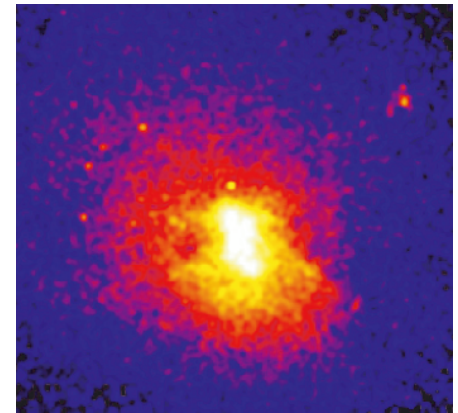
◆ Regular



Abell3571

※Tamura et al.(2011) 等..

◆ Cool-core



Abell262

※乱流によって磁場が増幅されているなら

X線形態	Irregular	Regular	Cool-core
銀河団進化	衝突合体期	緩和期	冷却進化期
乱流のフェーズ	Driving	Cascade/ Saturation	Saturation/ Decay
磁場の強度	weak	strong	Rather strong

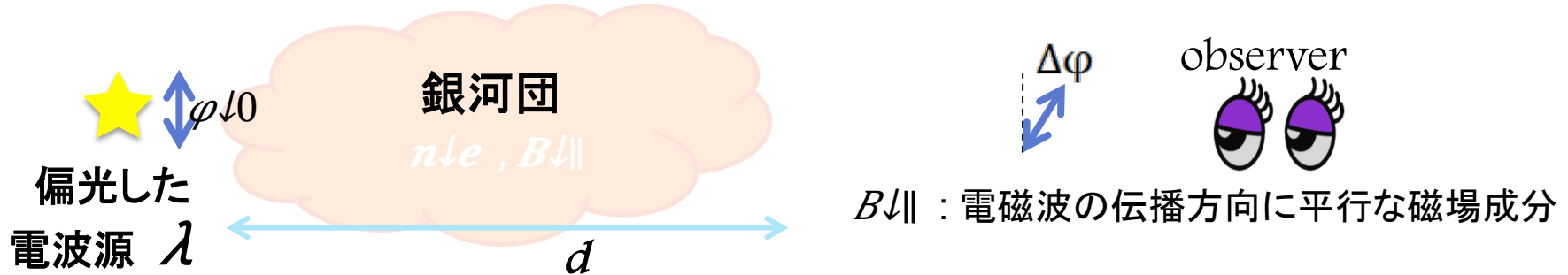
Abell 1367

※仮説

Faraday Rotation による磁場の推定

Faraday Rotationを観測する。

- ◆銀河団の背後もしくは銀河団中にある天体からの偏光している電磁波は磁場を通ることで偏波面が回転する(Faraday Rotation)



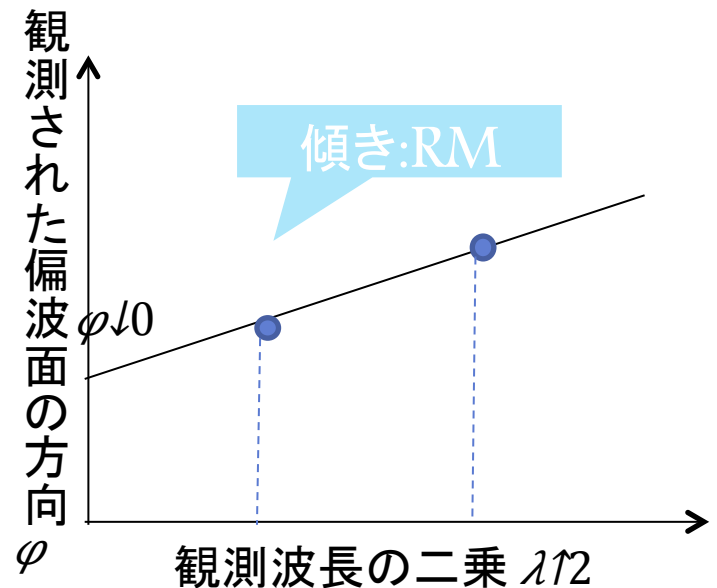
$$\Delta\phi = \frac{\lambda^2 e^3}{8\pi^2 m_e^2 c^3 \epsilon_0} \int_0^d n_e B_{\parallel} ds$$

RM

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi$$

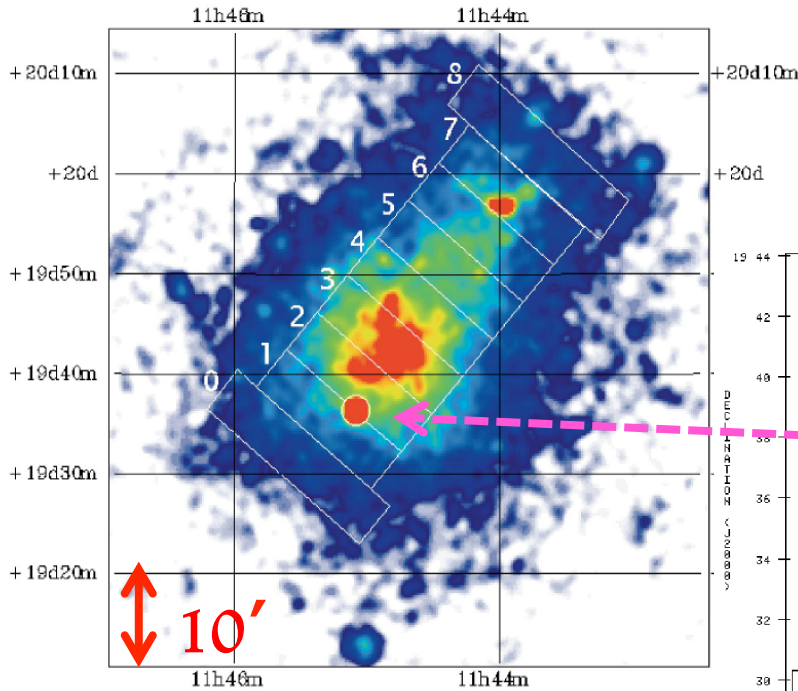
$$\phi = \phi_0 + RM \cdot \lambda^2$$

多波長で偏光観測することでRMを得る
⇒磁場に関する情報が得られる！

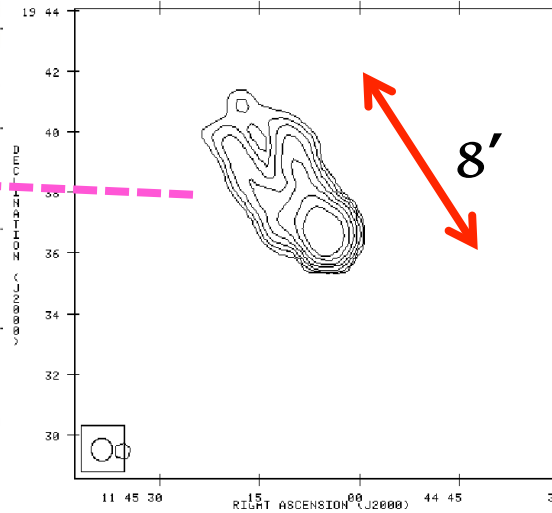


※ただし電子密度分布(X線観測)と磁場構造のモデルを考える必要がある。

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距離 r
 $r \sim 197h \downarrow 70 \uparrow -1$ 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)
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



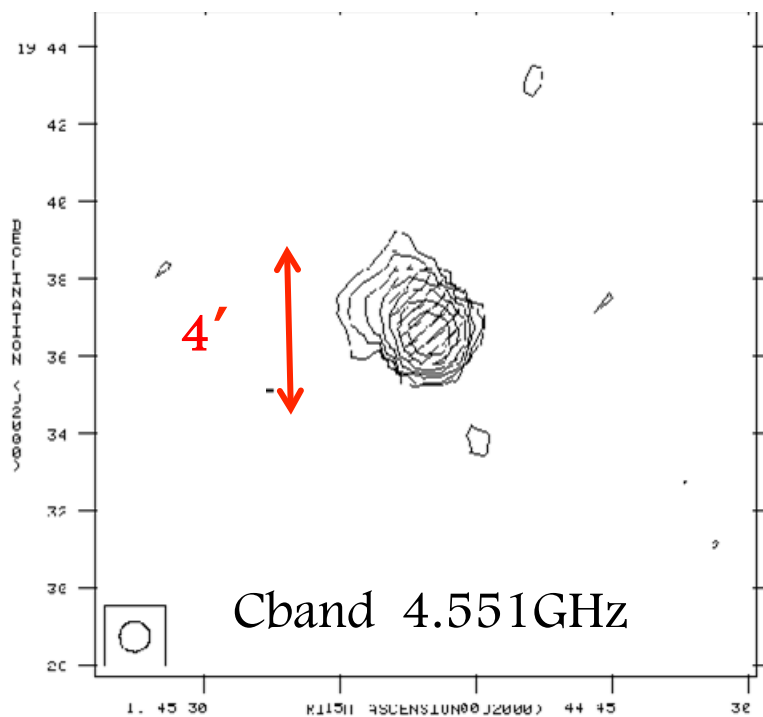
- 本解析では C, X帯 のIF1~16に加えてVLAのarchiveデータ 1.46GHz(L帯)を使用し全部で33周波数分のデータを解析。
- beamsizeは48" に固定
(一番低い分解能である Lbandの分解能に合わせた)

※beamsize...電波望遠鏡で分解能を表す

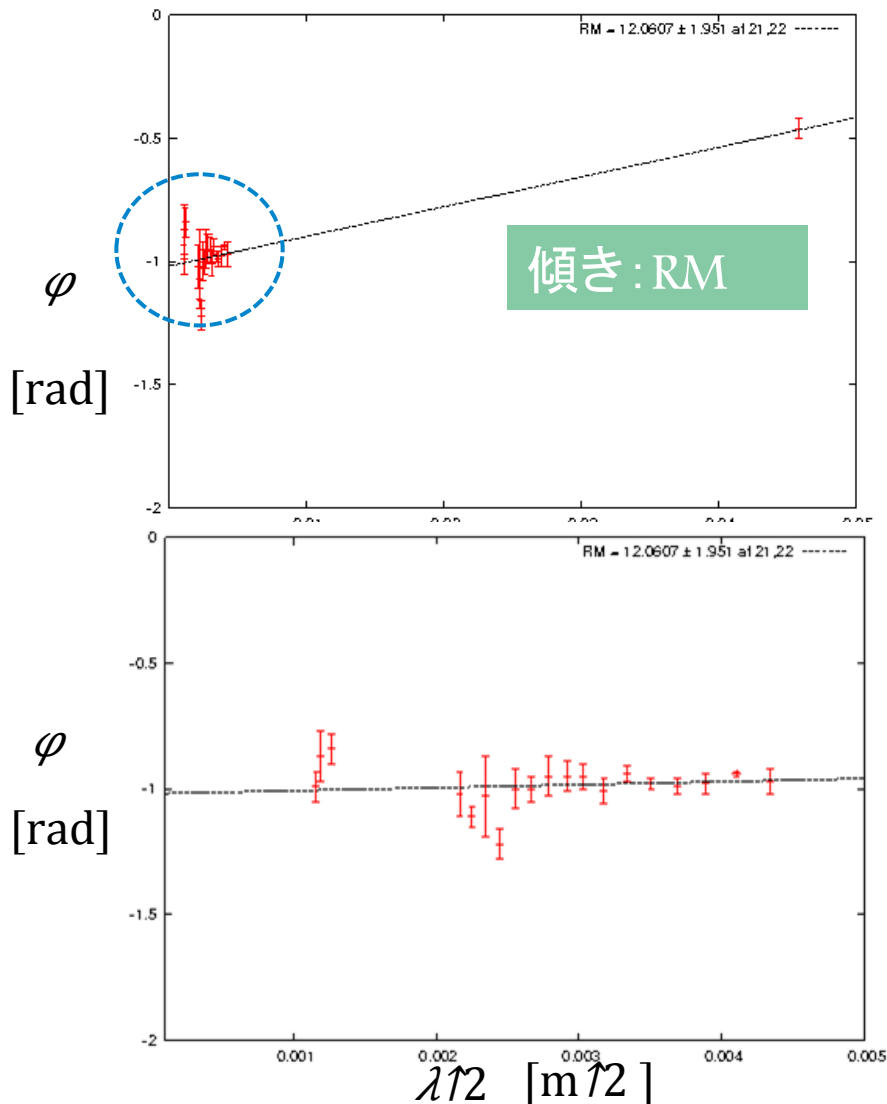
解析結果

Intensity + 偏波ベクトルマップ & RMplot

電波強度(contour) & 偏光方向(vector)マップ

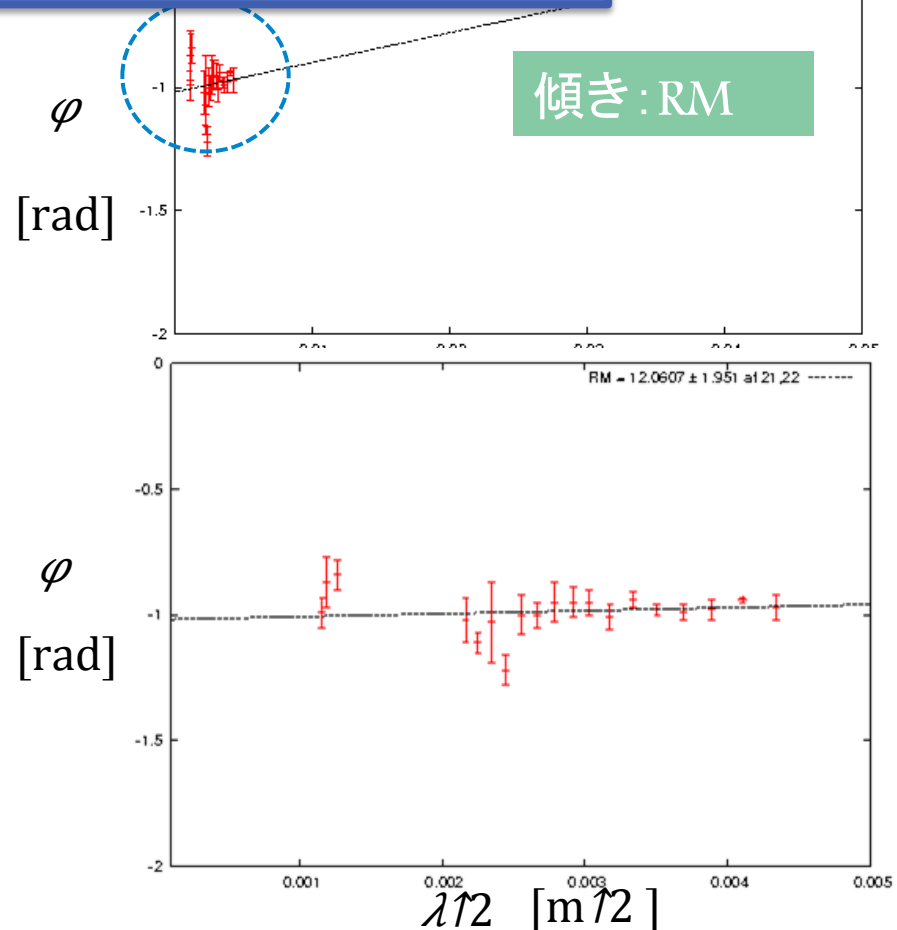
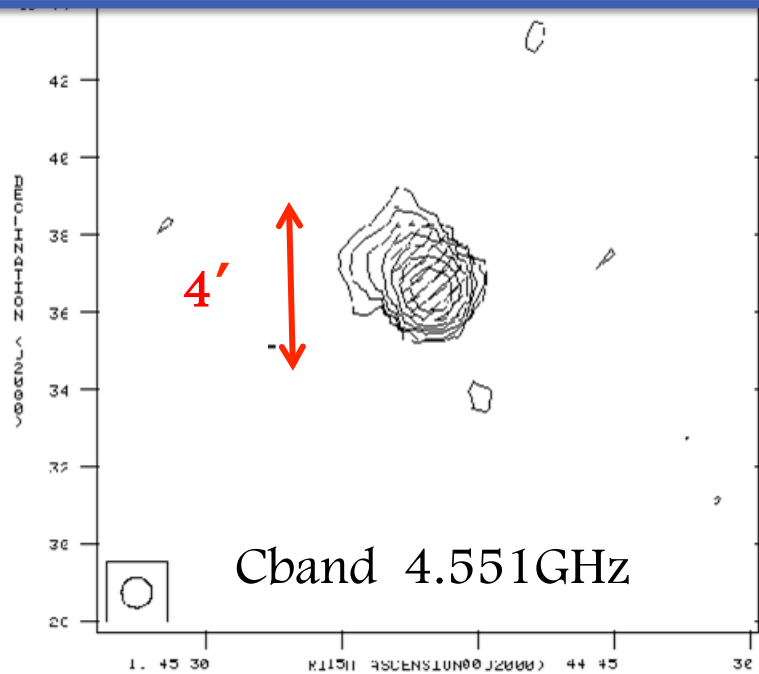


ある点の各周波数での偏波角のプロット



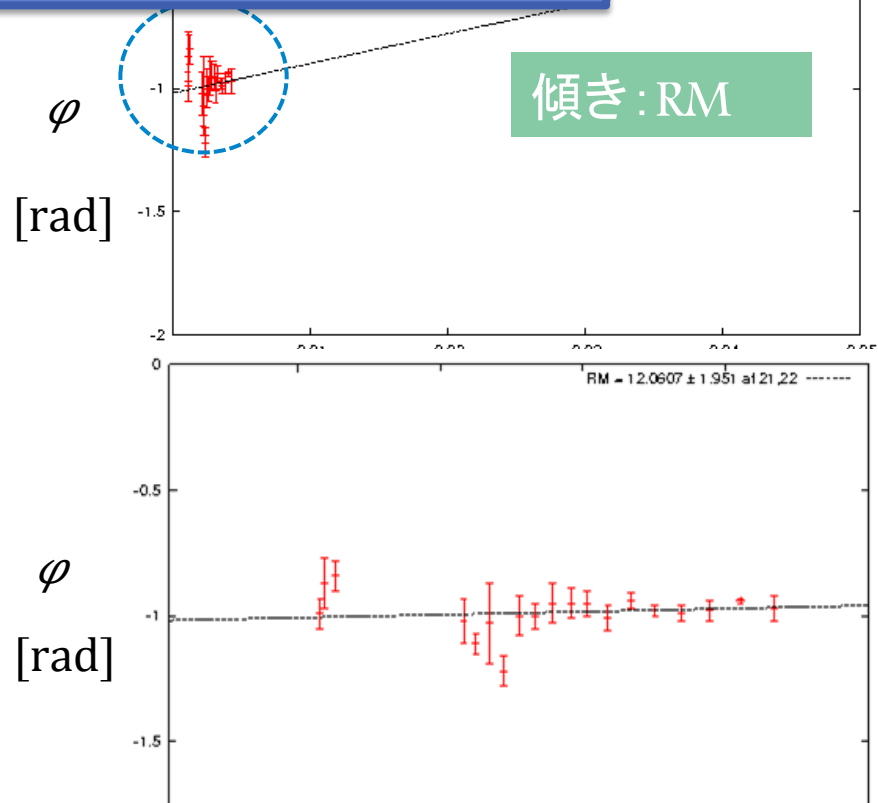
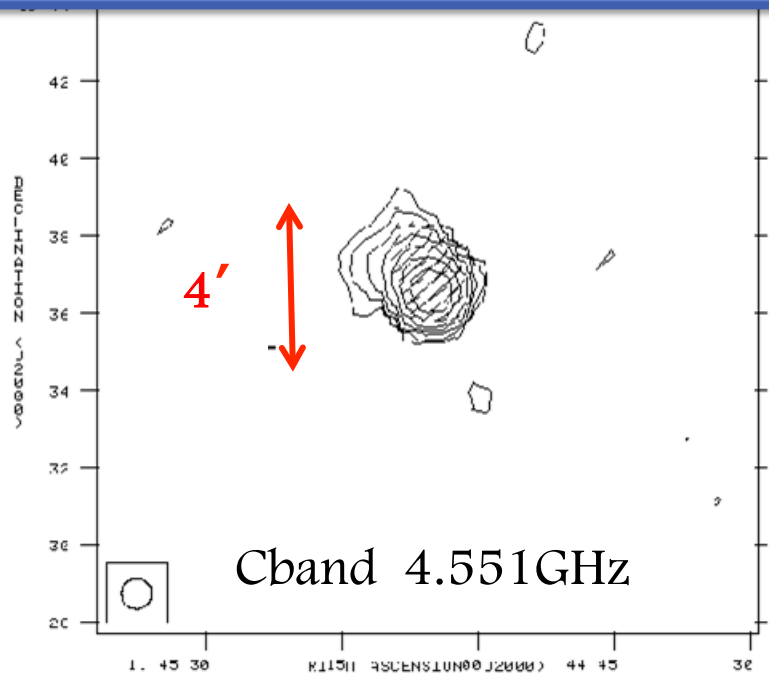
全周波数分作成
⇒各ピクセルで波長の二乗と
偏波角の関係をプロット

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)
 ⇒⇒電波銀河近傍ではなく、銀河間空間の磁場がファラデー回転を起こしている。



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

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)
 ⇒⇒電波銀河近傍ではなく、銀河間空間の磁場がファラデー回転を起こしている。



全周波数
 ⇒各ピクセル
 偏波角の関

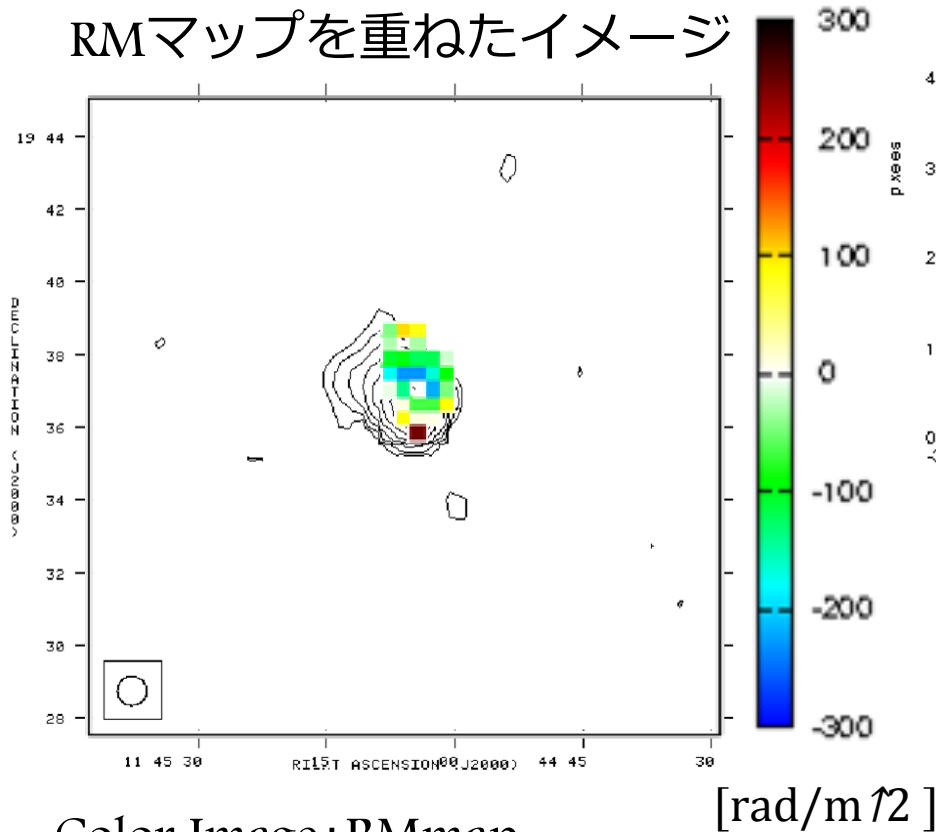
NEXT

各点でのRMを計算してマッピングしていく
 (RMが空間的にどのような分布をするのか見たい)

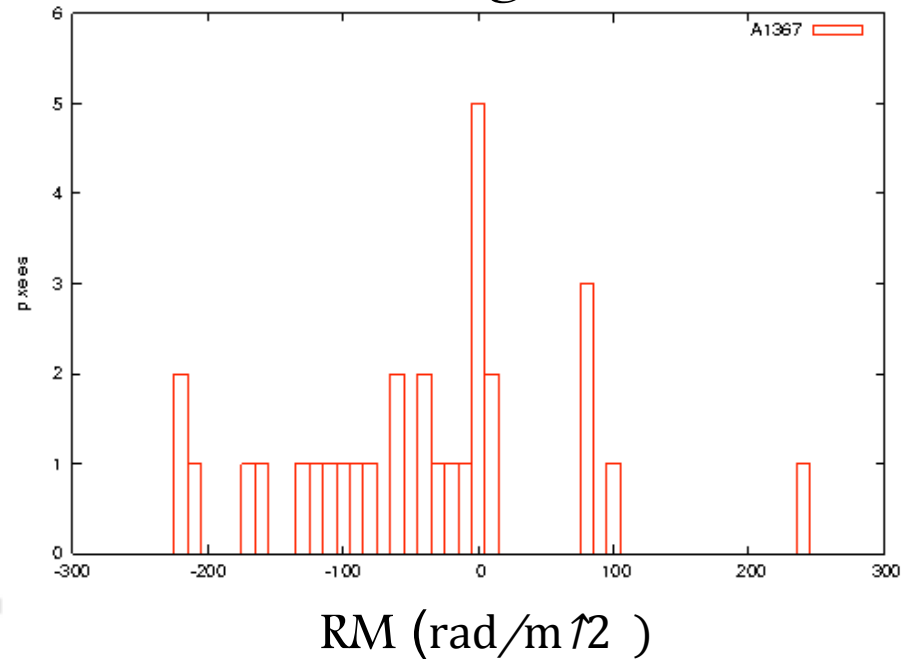
解析結果

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



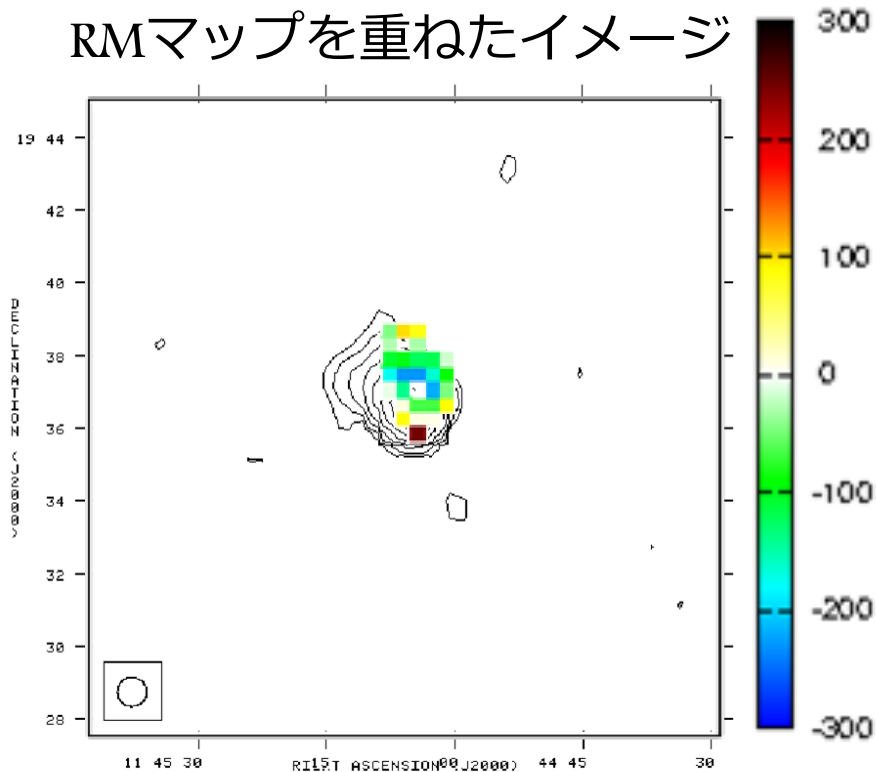
$\langle RM \rangle \sim -45.047 \text{ rad/m}^2$

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

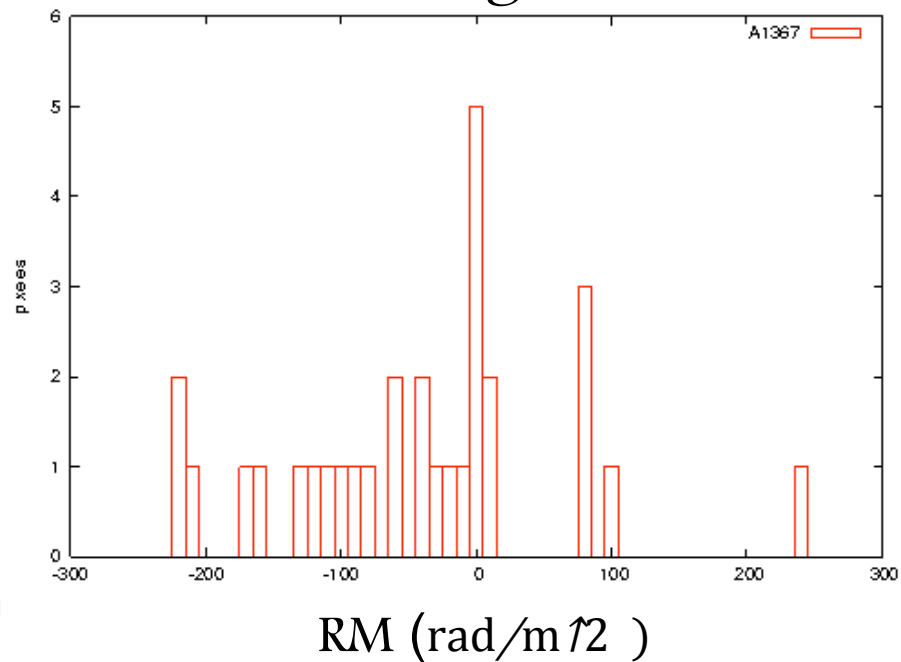
解析結果

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



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

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

Color Image: RMmap

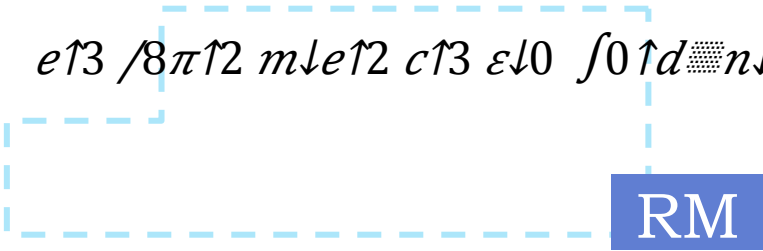
Contour: 4.552GHzの電波強度

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

磁場推定にむけて

- 得られたRMの値に対して、銀河団中の磁場構造のモデルを仮定し、また電子密度分布を与えることで銀河団Abell1367の磁場強度を推定する

$$\Delta\phi = \lambda^2 \int_0^d n_e B_{\parallel} ds$$



$$RM / \text{rad m}^{-2} = 0.81 \int_0^L n_e B_{\parallel} dz / \mu\text{G} \quad (n_e / \text{cm}^{-3}) (B_{\parallel} / \mu\text{G}) d(z/\text{pc})$$



磁場強度
B~???



偏光角
=> RM



磁場の推定(1) 磁場の構造モデル

◆ 磁場モデル...磁場が同じ空間スケール(l)、同じ強度($|B_{\perp 0}|$)
確率1/2でランダムに反転するモデル

※電子密度(n)が一定の場合

$$RM \propto \int_0^L n B_{\perp} dl$$

i 番目のセルの磁場強度: $B_{\perp i}$

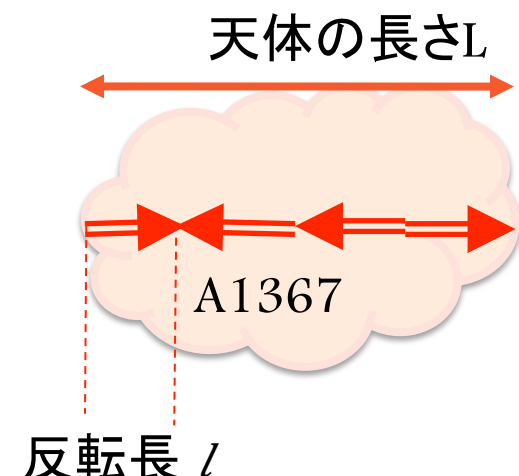
$$\sim \sum_{i=1}^N n B_{\perp i} l$$

$$= n l \sum_{i=1}^N B_{\perp i}$$

$$\langle RM \rangle \propto \langle n l \sum_{i=1}^N B_{\perp i} \rangle = 0$$

$$\langle (RM)^2 \rangle \propto \langle (n l \sum_{i=1}^N B_{\perp i})^2 \rangle \quad \begin{array}{l} \text{※ただし} \\ N=L/l \end{array}$$

$$\langle \sum_{i=1}^N (B_{\perp i})^2 \rangle = N \langle B_{\perp i}^2 \rangle = N |B_{\perp 0}|^2 = L/l |B_{\perp 0}|^2$$



$$\langle (RM)^2 \rangle \propto n^2 l^2 \cdot L/l |B_{\perp 0}|^2$$

RMの標準偏差は
 $\sigma_{RM} \propto n \sqrt{l} L |B_{\perp 0}|$

磁場の推定(2) 電子密度分布

※より現実的な電子密度の分布を考える

◆ 電子密度分布はβモデルに従う

$$n(r) = n_0 [1 + (r/r_0)^2]^{-3\beta/2}$$

A1367 はX線の表面輝度分布から電子密度分布が見積もられている

➤ βモデルのパラメータ

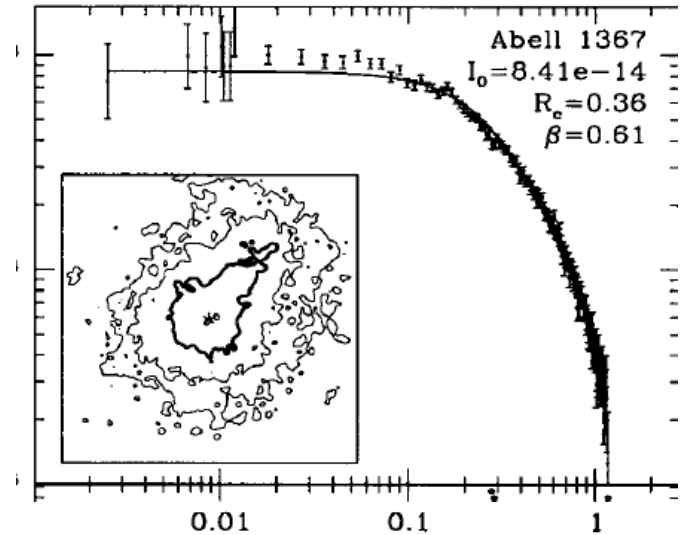
... $\beta = 0.61$, $r_0 = 0.257 h_{70}^{-1} \text{ Mpc}$

➤ 中心の電子密度

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

n_0 : 銀河団中心の電子密度
 r_0 : コア半径

×線表面輝度



中心からの距離(Mpc)

Rosat X-ray image
(Mohr et al. 1999)

磁場の推定(3)

磁場の構造モデルとβモデル電子密度分布を考慮してRMを計算すると

$$\sigma_{RM}(r) = K B n_0 r_0^{1/2} l^{1/2} / (1 + r^2/r_0^2)^{3/2}$$

(Govoni et al.2010)

※磁場は等方的であると仮定 ($\sqrt{3} B_{||} = B$)

観測値とパラメータの値

σ_{RM}	107 [rad/m ²]
β	0.61
r_0	0.257 h ₇₀ ⁻¹ Mpc
n_0	1.48 × 10 ⁻³ [cm ⁻³]
r	197 h ₇₀ ⁻¹ [kpc]

K	定数(411)
n_0	銀河団のX線中心での電子密度
r_0	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 磁場強度を見積もると
β	βモデルのパラメータ



※ここではランダム磁場のスケールは典型的な値である10kpcを使用している

磁場の推定(3)

この値は先行研究によって得られている典型的な銀河団の磁場強度(数 μG 程度)に矛盾しないものとなった

磁場の構造モデルと β モデル

$$\sigma_{RM}(r) = K B n_e r^{\beta} / (1 + r^2/r_0^2)^{\beta/2}$$

(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_0	0.257 h_{70}^{-1} Mpc
n_e	1.48×10^{-3} [cm ⁻³]
r	197 h_{70}^{-1} [kpc]

K	定数(411)
n_e	銀河団のX線中心での電子密度
r_0	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 磁場強度を見積もると
β	β モデルのパラメータ



※ここではランダム磁場のスケールは典型的な値である10kpcを使用している

まとめ

- 電磁波の伝播方向に平行な磁場成分を含むプラズマ中を直線偏光した電磁波が伝搬する際、偏波角が回転する現象をファラデー回転という
- ファラデー回転を利用し、銀河団の背後もしくは銀河団中の電波源から放出された偏光した電磁波を観測することで銀河団磁場の情報を得ることができる
- 電波銀河NGC3862の偏光した電磁波を観測することで、銀河団A1367のファラデー回転測度のマップを作成した
- 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 $\langle RM \rangle \sim -45.047 [rad/m^2]$ 、 $\sigma_{RM} \sim 107.14 [rad/m^2]$ となった
- 得られたRMの値からA1367の磁場強度を推定した結果 $4.51 (l/10kpc)^{1/2} [\mu G]$ 程度になり、典型的な値に矛盾しないものとなった

fin

予備スライド

βモデル電子密度分布

βモデル

…銀河団のプラズマガスの密度分布を表す一般的なモデル

- 仮定
- ◆ 静水圧平衡、球対称
 - ◆ 等温
 - ◆ ガスも銀河も同じポテンシャル構造に従う

$$\rho(r) = \rho(0) [1 + (r/r_c)^2]^{-3/2\beta}$$

熱制動放射の放射率はガスの密度の二乗に比例する。

二次元投影図において中心から

$$S(R) = S(0) [1 + (R/r_c)^2]^{-3\beta}$$

$$S(R) \propto \int_0^\infty (1 + r/r_c)^{-3\beta} dl$$

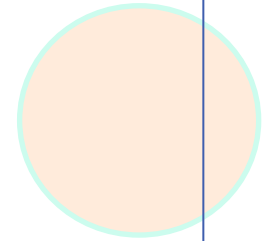
※視線方向に積分

$S(R)$ は観測値である。

$S(0), \beta, r_c$ をフリーパラメータとして $S(R)$ をモデルに比較的よく合うようにfitさせることができれば、パラメータの値として β, r_c が求まる。

⇒ガス密度分布が求まる。

視線方向

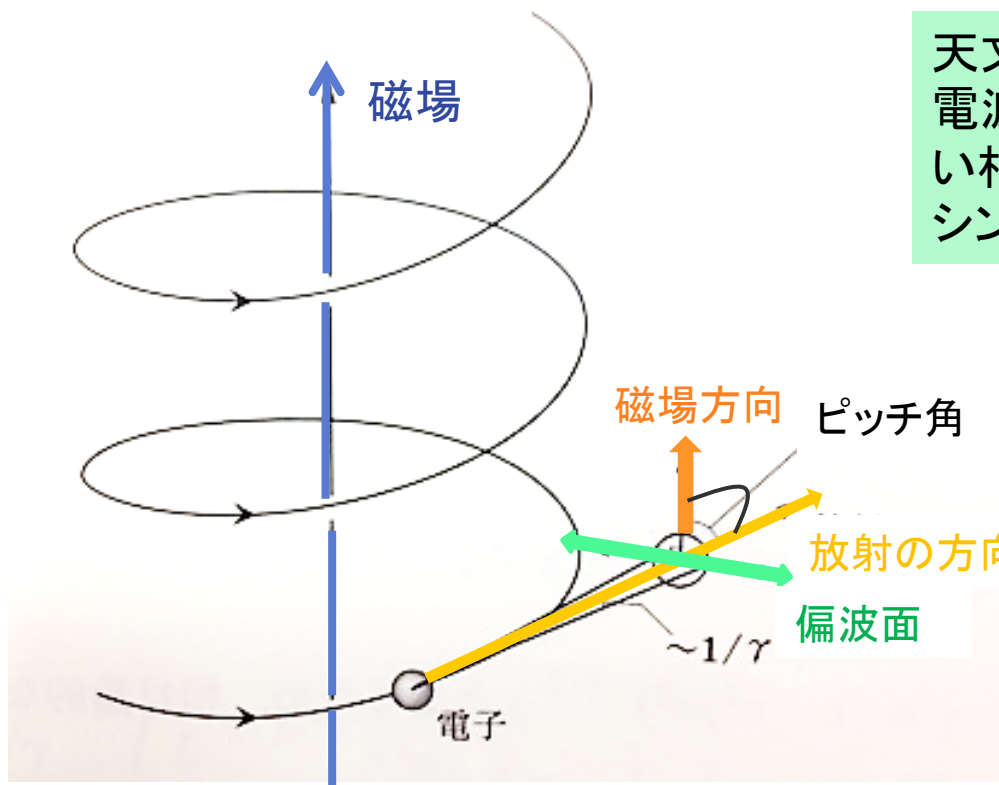


シンクロトロン放射

シンクロトロン放射

...光速に近い速度を持った高エネルギー電子(相対論的電子)が星間空間の磁場と相互作用して放射される電磁波。
電波天文の観測において、重要な連続スペクトルの一つ。

◆ 一個の電子から出るシンクロトロン放射



天文学においては超新星残骸や電波銀河クェーサーなどで光速度に近い相対論的電子が放出されるシンクロトロン放射が重要

シンクロトロン放射は磁場に垂直方向に放射されるために偏波する。

Faraday Rotationとは？

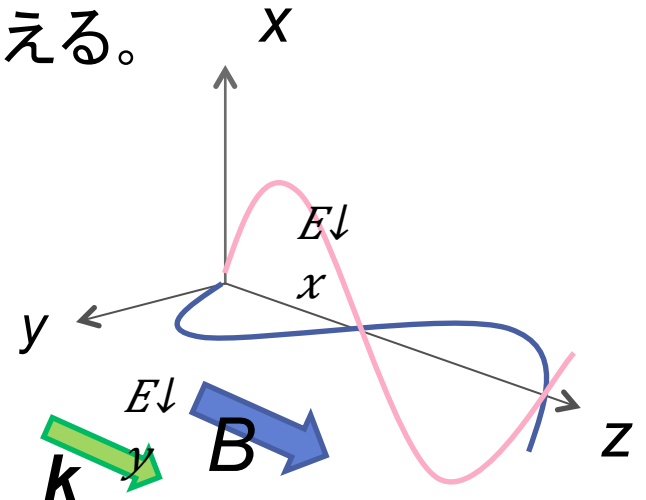
Faraday Rotation...

電磁波の伝播方向に平行な磁場成分を含むプラズマ中を直線偏光した電磁波が伝搬する際に、偏波角が回転してしまう現象

◆ 静磁場 $\mathbf{B} = (0, 0, B_0)$ が存在するプラズマ領域内を、

電場 \mathbf{E} を持つ電磁波が伝播する状況を考える。

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp\{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{z} - \omega t)\}$$



プラズマ中の電子の運動方程式

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e\mathbf{E} - \frac{e}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad \dots (1)$$

\mathbf{v} : 電子の速度
 e : 素電荷
 \mathbf{B} : 磁場

-: 右円偏向
 +: 左円偏向

◆ 伝播波が円偏向で正弦波だと仮定する

$$\mathbf{E}(t) = E e^{-i\omega t} (\boldsymbol{\epsilon}_1 \mp i\boldsymbol{\epsilon}_2) \quad \dots (2)$$

$$\mathbf{B} = B \downarrow 0 \ \boldsymbol{\epsilon}_3 \quad \dots (3)$$

$$\boldsymbol{\epsilon}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\epsilon}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\epsilon}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{v}(t) = \frac{-ie}{m(\omega \pm \omega_B)} \mathbf{E}(t) \quad \dots (4)$$

※ただし、 ω_B はサイクロトン周波数

$$\omega_B = \frac{eB_0}{mc}$$

+ : 右円偏向
 - : 左円偏向

◆分散関係を考える。

$$c^2 k^2 = \varepsilon \omega^2$$

$$\mathbf{j} = -nev$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$$

(4)式より

$$\sigma_{R,L} = \frac{ine^2}{m(\omega \pm \omega_B)} \dots (5)$$

ここで、 ε を以下のように定義する

$$\varepsilon \equiv 1 - \frac{4\pi\sigma}{i\omega} \dots (6)$$

j : 電流密度

σ : 伝導率

ε : 誘電率

(5)(6)から、

$$\varepsilon_{R,L} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega \pm \omega_B)}$$

※ただし、 ω_p はプラズマ周波数

$$\omega_p^2 \equiv \frac{4\pi ne^2}{m}$$

分散関係から、 $k_{R,L}$ は

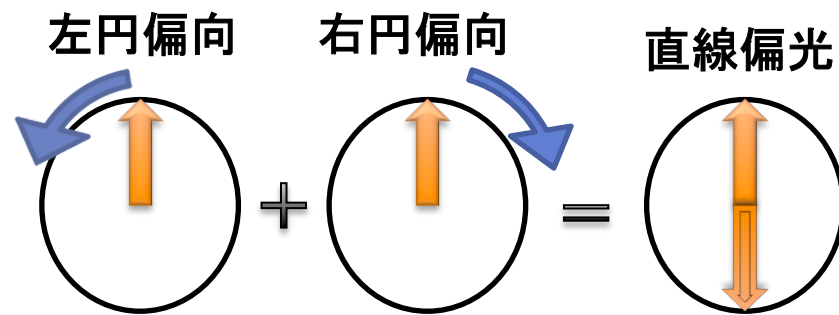
$$k_{R,L} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_{R,L}}$$

$$= \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega \pm \omega_B)}}$$

$\omega \gg \omega_B$ $\omega \gg \omega_p$ と仮定する

と、

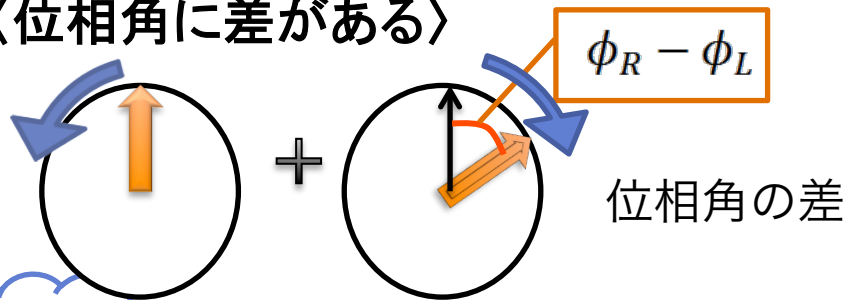
$$k_{R,L} \approx \frac{\omega}{c} \left[1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2} \left(1 \mp \frac{\omega_B}{\omega} \right) \right]$$



位相角 ϕ は、 $k \cdot d$ と表せられることから

$$\phi_{R,L} = \int_0^d k_{R,L} ds$$

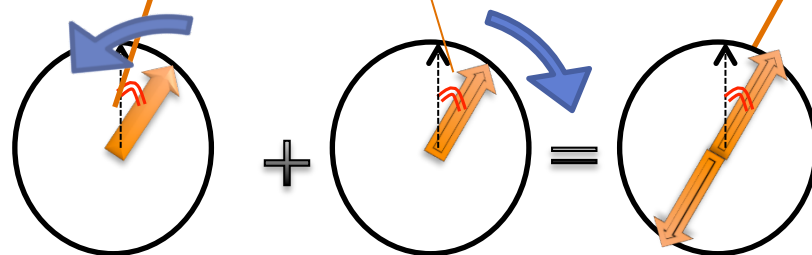
〈位相角に差がある〉



右円偏光と左円偏光で
位相角に差が出る

見方を変えると

$$\frac{\phi_R - \phi_L}{2} \quad \Delta\phi = \frac{\phi_R - \phi_L}{2}$$



直線偏光は回転する

(右円偏光と左円偏光の重ね合わせ)

直線偏光

◆式にしてみると...

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \frac{1}{2}(\phi_R - \phi_L) \\ &= \frac{1}{2} \int_0^d (k_R - k_L) ds \\ &= \frac{1}{2} \int_0^d (c\omega^2)^{-1} \omega_p^2 \omega_B ds\end{aligned}$$

ここで ω_B , ω_p^2 代入すると、

ファラデー回転の式

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

同じ視線方向でも ω が変わると
 $\Delta\varphi$ は変わる。

RM: 回転量度

(Rotation measure)

※ただし、**B**が視線方向に沿う時
のみ適用できる。

視線方向に沿う電場: B_{\parallel}

$$\Delta\varphi \propto \frac{1}{\omega^2} \int_0^d nB_{\parallel} ds$$

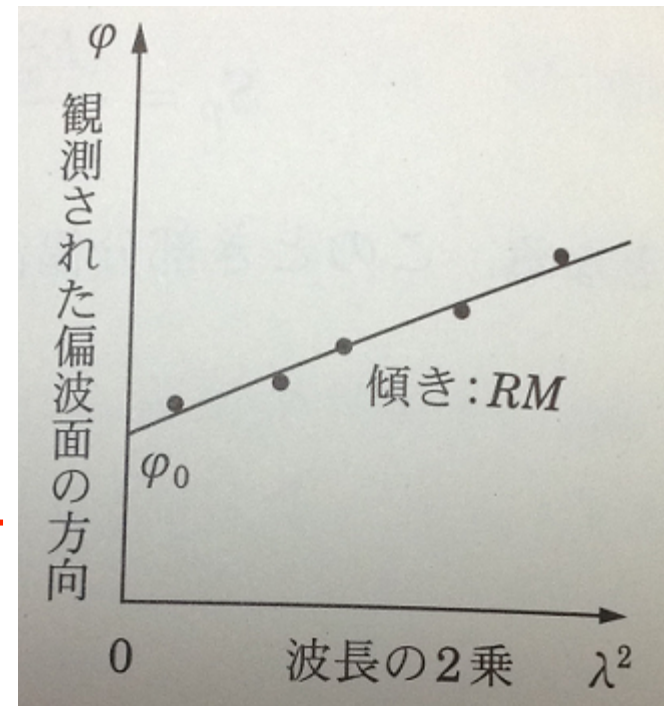
$$\propto \lambda^2 \int_0^d nB_{\parallel} ds$$

$\Delta\varphi$ は ω (or λ)が変化すれば変わる値



多周波数(多波長)で観測することでRMを求めることができる。

n の値が得られれば B を推定できる



$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_0 + \Delta\varphi(\omega) \\ &= \varphi_0 + RM \cdot \lambda^2\end{aligned}$$

φ : 観測される偏光角
 φ_0 : もともとの偏光角

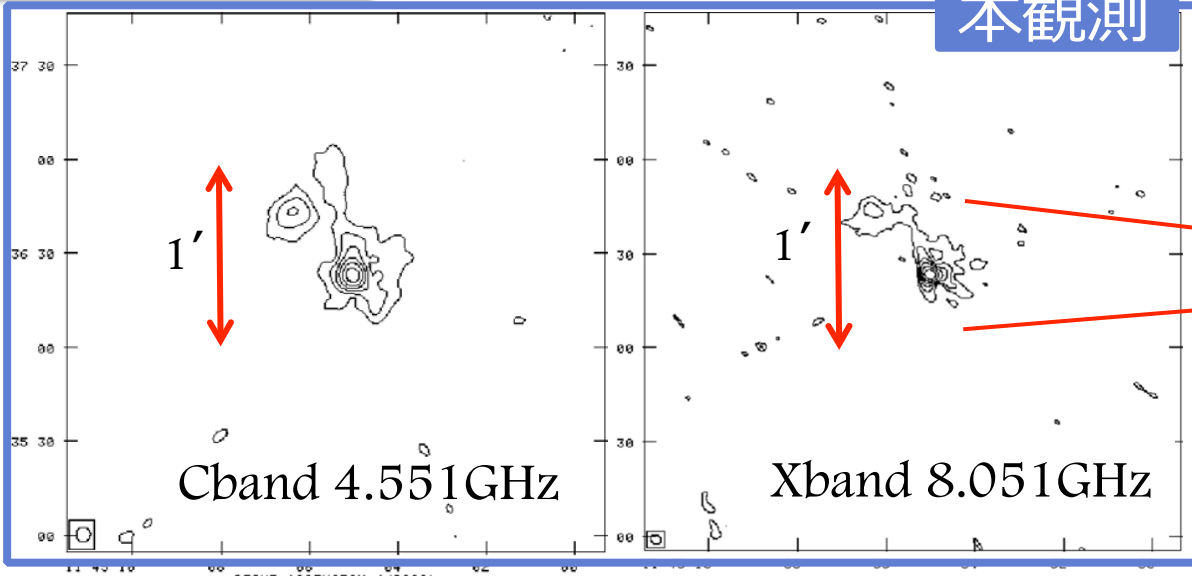


Faraday Rotationから磁場を求める

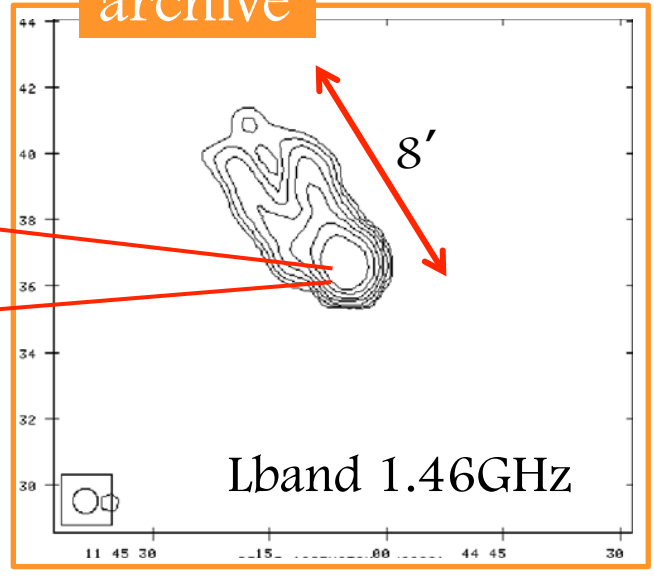
解析結果
intensity

Contour: 各周波数での電波強度

本観測



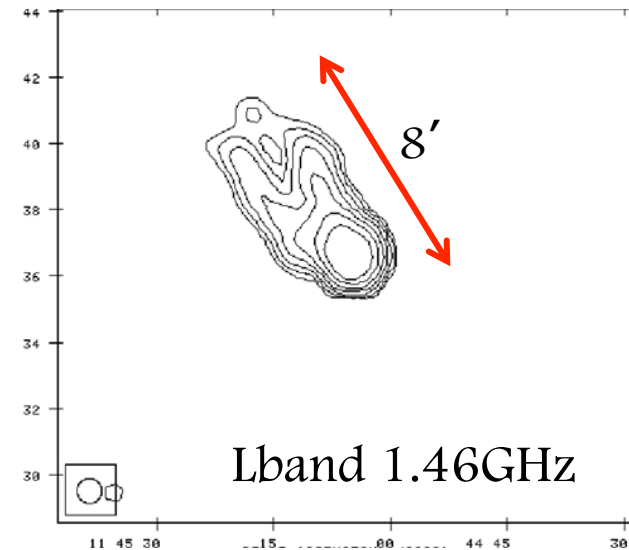
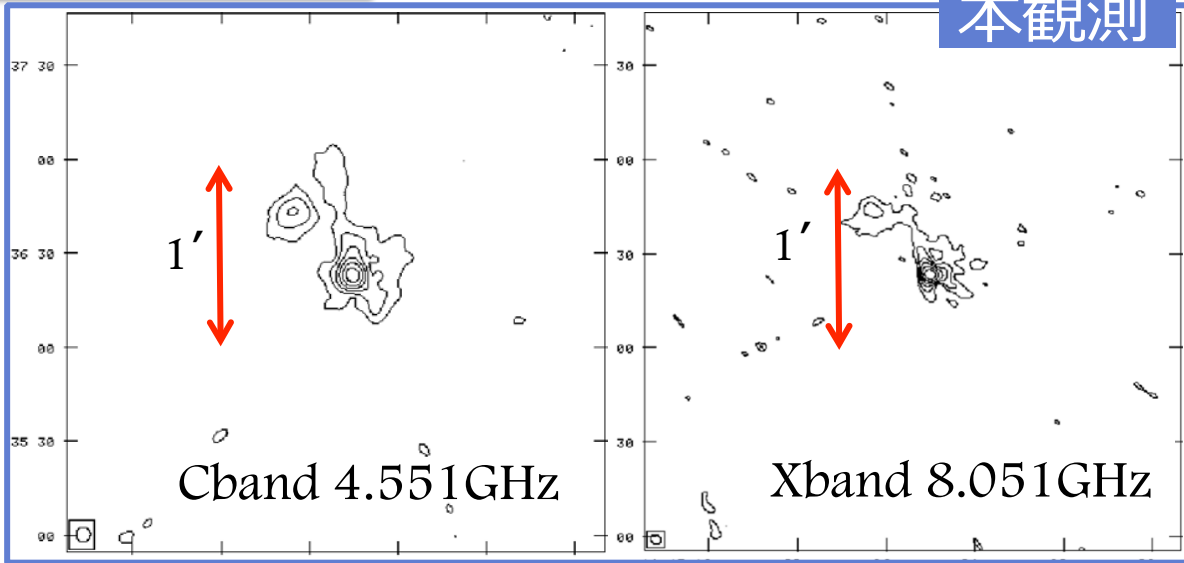
archive



解析結果
intensity

Contour: 各周波数での電波強度

本観測



※ 今回観測が行われた周波数帯、アレイ配置では
空間分解能(θ_{HPBW})は高いが、最大角度スケール(θ_{LAS})
が小さいため広がった成分を落としてしまう。

(λ :観測波長、 B :基線長)

$$\theta_{LAS} [\text{arcsec}] \sim \lambda [\text{mm}] / B_{\text{min}} [\text{m}]$$

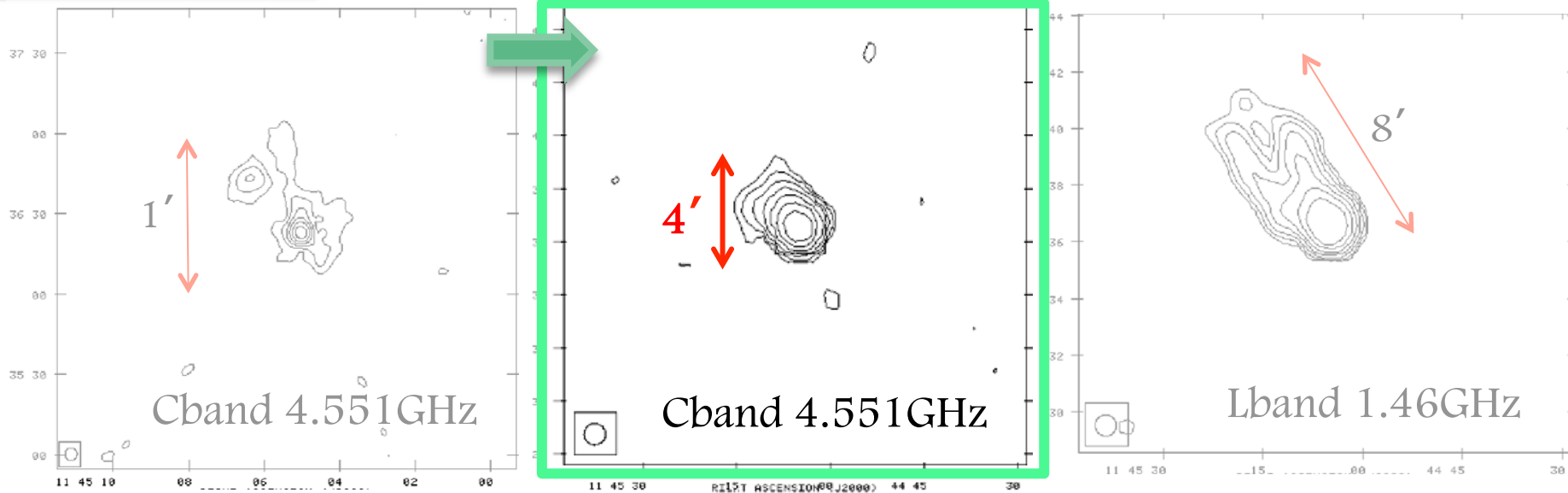
$$\theta_{HPBW} [\text{arcsec}] \sim \lambda [\text{mm}] / B_{\text{Max}} [\text{m}]$$

	C array	Cband	Xband
θ_{LAS} [arcsec]		240''	145''
θ_{HPBW} [arcsec]		3.5''	2.1''

解析結果
intensity

Contour

分解能を低くする代わりに
広がった成分に重みをつけた



※ 今回観測が行われた周波数帯、アレイ配置では
空間分解能(θ_{HPBW})は高いが、Largest Angular Scale (θ_{LAS})
が小さいため広がった成分を落としてしまう。

$\theta_{LAS} [arcsec] \sim \lambda [mm] / B [m]$ (λ : 観測波長、 B : 基線長)

$\theta_{HPBW} [arcsec] \sim \lambda [mm] / B_{Max} [m]$

	C array	Cband	Xband
$\theta_{LAS} [arcsec]$		240''	145''
$\theta_{HPBW} [arcsec]$		3.5''	2.1''

ストークスパラメータ

- ◆ 電磁波の偏波特性を記述する方法の一つに電波源から伝搬してくる方向(z 方向)に対して垂直な二つの方向(x, y 方向)分解される電場の成分を電場の振幅 $E_{\downarrow 1}, E_{\downarrow 2}$ と二つの独立な波の間の位相差 ϕ を用いて表す方法がある。

$$E_{\downarrow x} = E_{\downarrow 1}(t) \cos(\omega t - kz + \delta_{\downarrow x})$$

$$E_{\downarrow y} = E_{\downarrow 2}(t) \cos(\omega t - kz + \delta_{\downarrow y})$$

ω :角周波数

k :波数

$\delta_{\downarrow x}, \delta_{\downarrow y}$:位相因子

- ◆ 電場の振幅($E_{\downarrow 1}, E_{\downarrow 2}$)とその二つの独立な波の位相差(ϕ)を直接観測するのは難しい。
→ストークスパラメータというパラメータを使用して偏波の特性を記述。

$$E_{\downarrow x}^2 / E_{\downarrow 1}^2 - 2E_{\downarrow x} E_{\downarrow y} / E_{\downarrow 1} E_{\downarrow 2} \cos\delta + E_{\downarrow y}^2 / E_{\downarrow 2}^2 = \sin^2 \delta \quad (\text{電場の軌跡:楕円})$$

$$\ast \delta = \delta_{\downarrow y} - \delta_{\downarrow x}$$

楕円偏波に対して楕円の長軸と短軸のそれぞれ X 軸, Y 軸とする。

電場ベクトル E の先端が描く図が楕円形である。

$$E \downarrow X = E \downarrow x \cos \chi + E \downarrow y \sin \chi$$

$$E \downarrow Y = -E \downarrow x \sin \chi + E \downarrow y \cos \chi$$

楕円の長軸: X
短軸: Y

※ χ は x 軸と X 軸がなす角

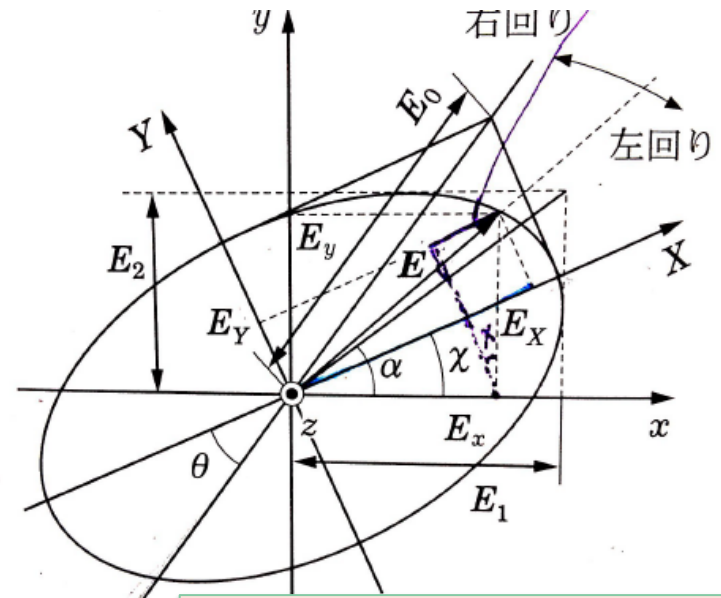
◆ 楕円長半径、短半径をそれぞれ

$$E \downarrow 0 \cos \theta, E \downarrow 0 \sin \theta \text{ とすると}$$

$$E \downarrow 0 \uparrow 2 = E \downarrow 1 \uparrow 2 + E \downarrow 2 \uparrow 2$$

$$\tan 2 \chi = \tan 2 \alpha \cos \delta$$

$$\sin 2 \theta = \sin 2 \alpha \sin \delta$$



※ 完全偏波の場合

$$I \uparrow 2 = Q \uparrow 2 + U \uparrow 2 + V \uparrow 2$$

$$\chi = 1/2 \tan^{-1} (U/Q)$$

→ ストークスパラメータ

$$I = E \downarrow 1 \uparrow 2 + E \downarrow 2 \uparrow 2 / Z \downarrow 0 = \text{全エネルギーフラックス (直接観測できる量)}$$

$$Q = E \downarrow 1 \uparrow 2 - E \downarrow 2 \uparrow 2 / Z \downarrow 0 = I \cos 2 \theta$$

真円度を測る。V=0 なら直線偏光

$$U = 2 E \downarrow 1 E \downarrow 2 \cos \delta / Z \downarrow 0 = I \cos 2 \theta \sin 2 \chi$$

※ $Z \downarrow 0$ は真空のインピーダンス、Sはポイ

x軸に対する楕円の方角を図る
Q=U=0は円偏光の条件

偏波の測定

※部分偏波している場合(自然界はほとんどの場合無偏波成分を含む)

$$E_x = E_{xp} + E_{xu}$$
$$E_y = E_{yp} + E_{yu}$$

$$S_p = \langle E_{xp}^2 \rangle + \langle E_{yp}^2 \rangle / Z_0$$
$$S_u = \langle E_{xu}^2 \rangle + \langle E_{yu}^2 \rangle / Z_0 = S_p + S_u$$

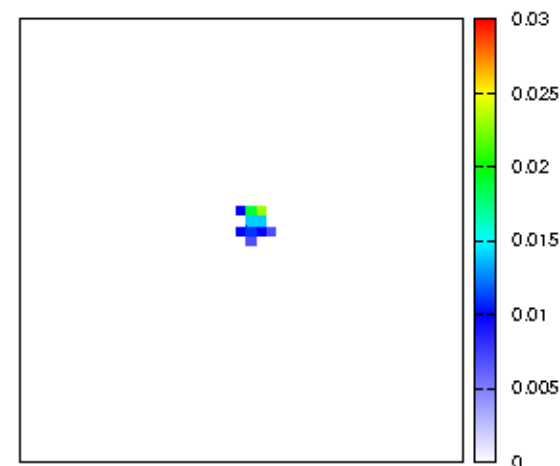
E_{xp}, E_{yp} : 完全偏波成分

E_{xu}, E_{yu} : 無偏波成分(振幅と位相がランダムに変化)

部分偏波では、

$$I \geq Q^2 + U^2 + V^2$$

$$\text{偏光率 } P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I$$

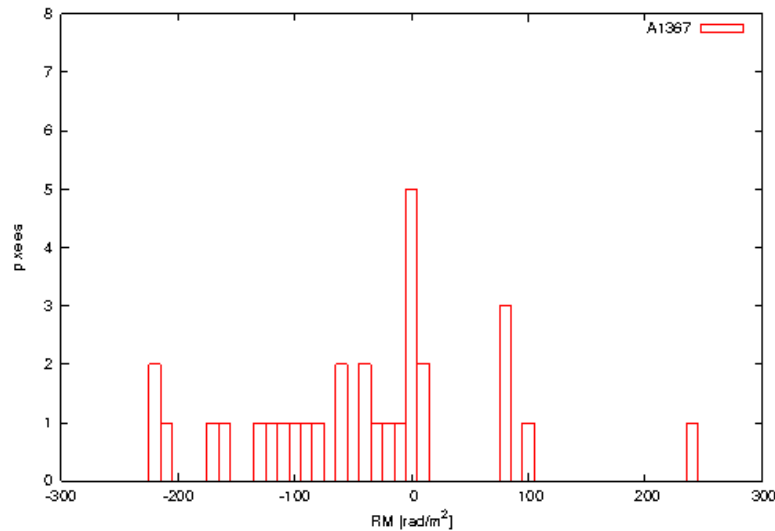


A1367の偏波率マップ

※つまり、部分偏波している場合の偏波を観測した時はストークス I に比べて Q, U が小さくなるため、偏波率は非常に小さくなる場合がある。

周波数の選択に関して

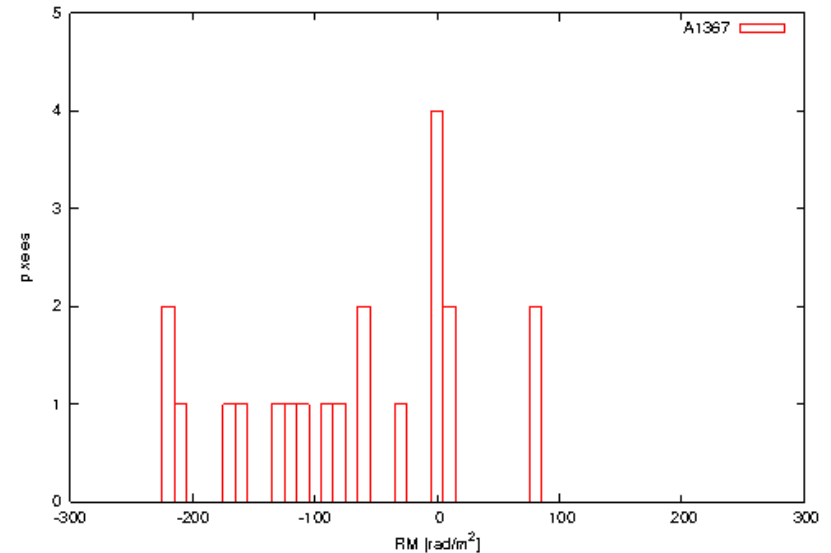
33周波数のうち4周波数以上受かっている場合で、Lbandが受かっていないピクセルを抜いた。(19pixel)



$$\langle RM \rangle \sim -60.53 \text{ rad/m}^2$$

$$\sigma_{RM} \sim 124.56 \text{ rad/m}^2$$

33周波数のうち10周波数以上受かっている場合。(21pixel)



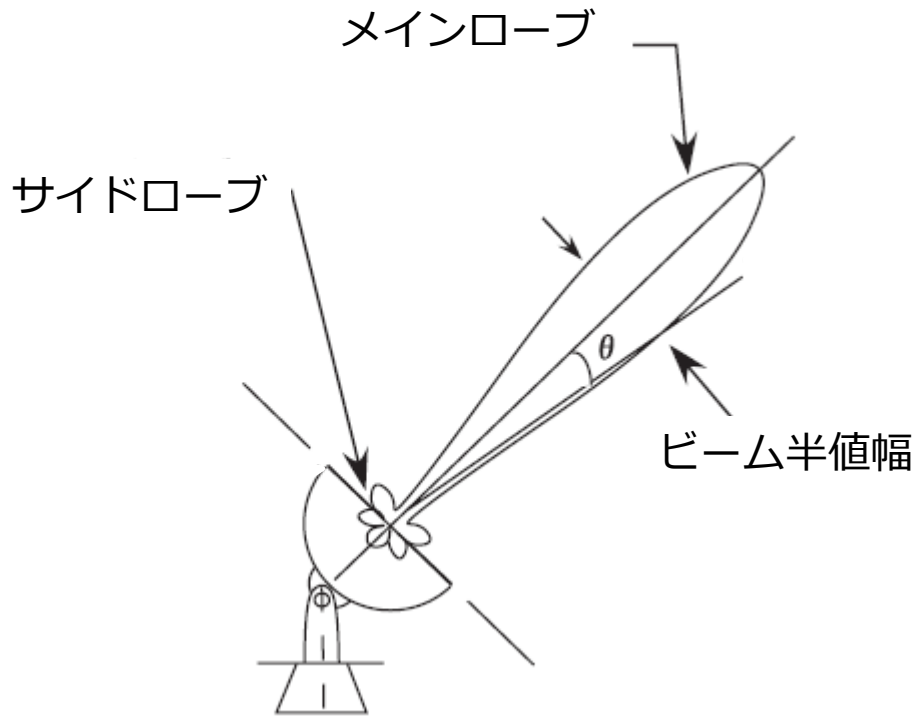
$$\langle RM \rangle \sim -72.86 \text{ rad/m}^2$$

$$\sigma_{RM} \sim 97.08 \text{ rad/m}^2$$

条件を厳しくすると、受かるピクセル数が変わってしまう。
⇒「Iは受かっててもQ,Uが受からない」が効いてきて、外側まで偏波が受からない。

検出器感度や観測時間の問題？

電波望遠鏡について



- ◆ アンテナは電波の到来する方向によってその電力を感じる感度が異なる。
主ビーム：感度が最大になる方向を含む広がり
サイドローブ：その周囲の感度が低い所
- ◆ 主ビームの感度が半分になるまでの角度の広がりをも HPBW[rad]という
- ◆ これの半分が望遠鏡の分解能に相当するビームサイズ。

電波望遠鏡とビーム

- 電波望遠鏡の主ビームのFWHM $\theta \downarrow B$ を望遠鏡のビームサイズもしくは空間分解能という。

$$\theta \downarrow B = 1.02 \lambda / D$$

電波干渉計について

広がりを持たない点源で、ある単一の周波数 ν_0 でのみ放射しているとし放射場を $E(t) = E_0 \cos(2\pi\nu_0 t + \phi_0)$ と表す。

素子アンテナで受信すると電場に比例した電圧 $V(t) = aE(t)$
(a は素子アンテナの半径)

二つの素子アンテナで受信した電圧($V_1(t), V_2(t)$)は山同士、谷同士が重なって強めあったり弱めあったりする。干渉計の出力 $r_{1,2}$ とすると、

$$r_{1,2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t=-T/2}^{T/2} \{V_1(t) + V_2(t)\}^2 dt$$
$$r_{1,2} = \langle [V_1(t) + V_2(t)]^2 \rangle = 2a^2 E_0^2$$



- 光路長の差(ct_g)が生じる
- 天体の方向ベクトルを s とする
- $ct_g = D \cdot s$

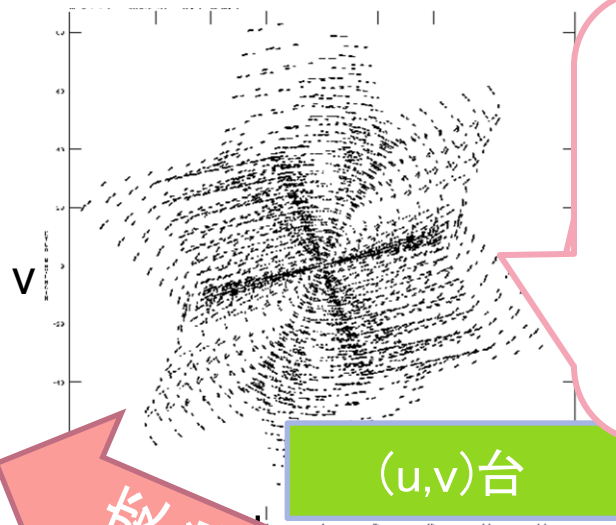
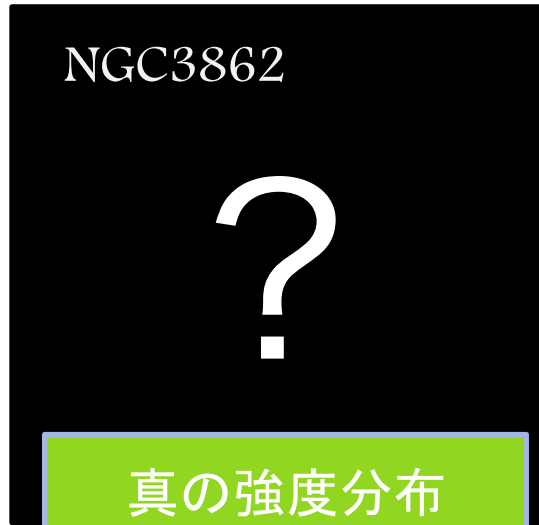
この $D \cdot s$ が波長の整数倍なら強めあい、半整数倍なら弱めあいになる。
このパターンをフリンジ(干渉縞)という

干渉計における像の合成

※干渉計で実際に得ることができるのは、干渉縞の明暗強度。

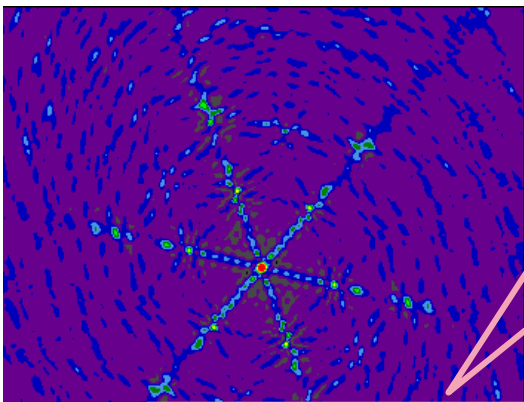
➤ 天体からのフラックス強度分布のフーリエ成分を観測。

→→逆フーリエ変換して強度分布を得る必要がある。

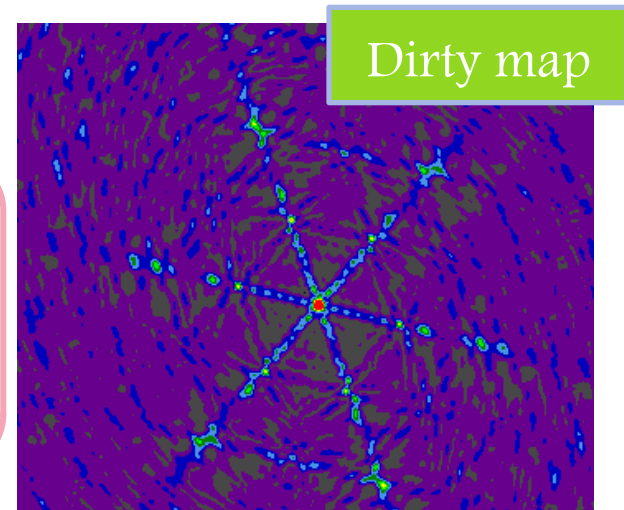


※得られたビジビリティの空間周波数分布。この部分しかデータが得られない。
⇒穴があるため完全な強度分布は得られない

欠けたる必敵



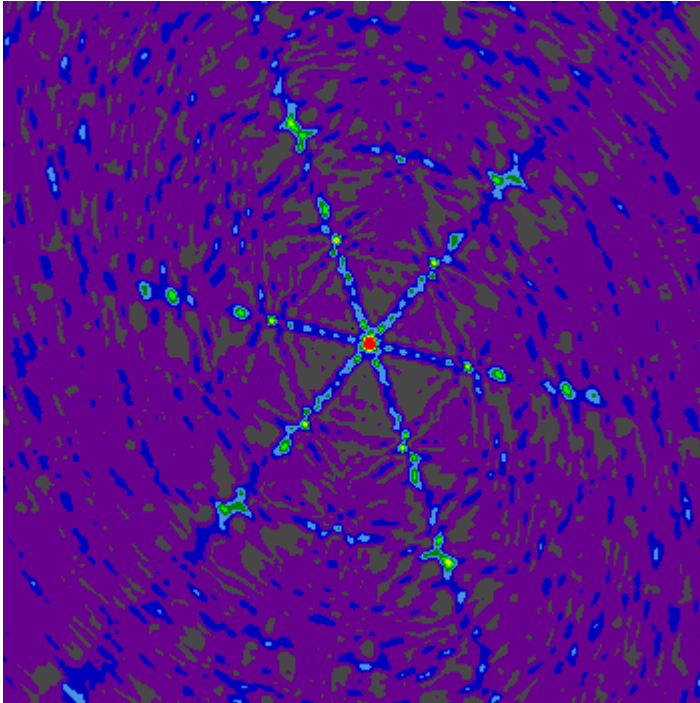
※干渉計で得られる強度で空間解像度を表すものは、(u,v)台によって決まる。
【点源のdirty map】



※実際に得られる画像

Dirty map

Dirty map...ビームのパターンが残ってしまっている。



Stokes I intensityを表す

➤得られるものは
合成ビームと真の像との畳み込み
(dirty map)

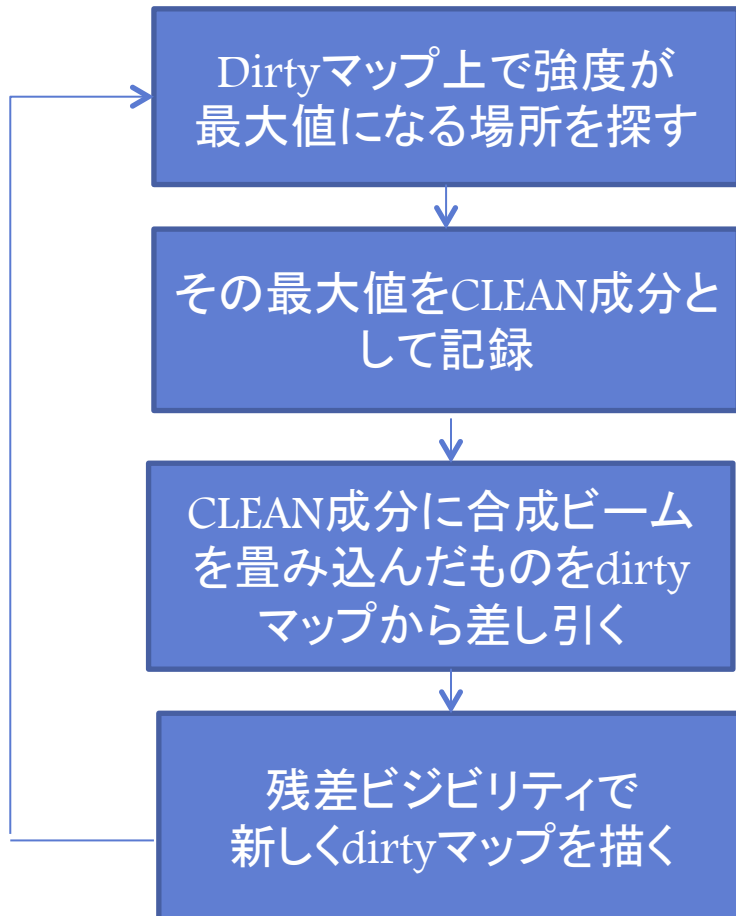
※合成ビームは点源をuv空間で
FTしたとき得られるもの。

➤真の強度分布(に近いもの)を
得るためには、畳み込みを
ほどくことが必要。

→よく使われる方法は
CLEANという方法

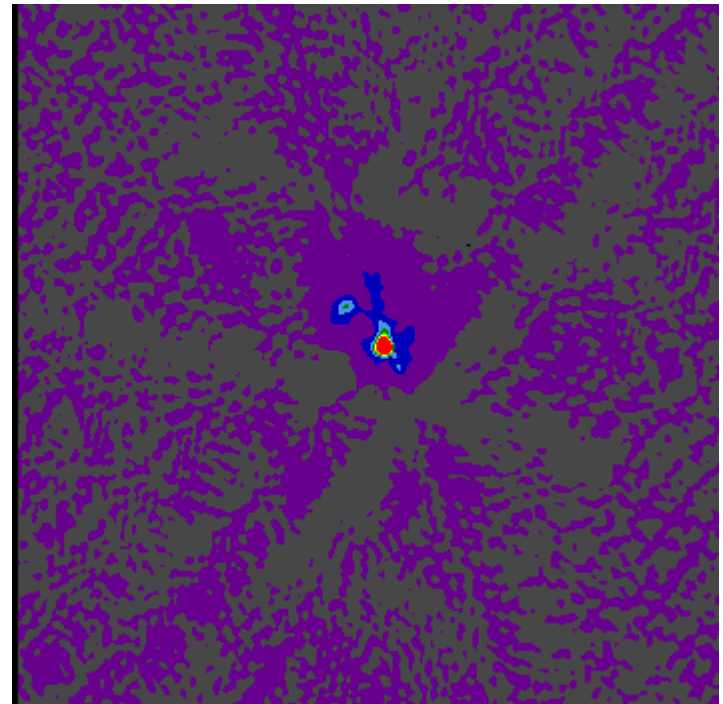
Cleanについて

- Dirtyマップにはサイドローブの影響が強くなる。
そこで、dirtyマップから合成ビームを適当にスケーリングして、dirtyマップから差し引くことでサイドローブを取り除くというのがCLEANである。



これを何度も繰り返して
サイドローブを取り除いていく

Clean後

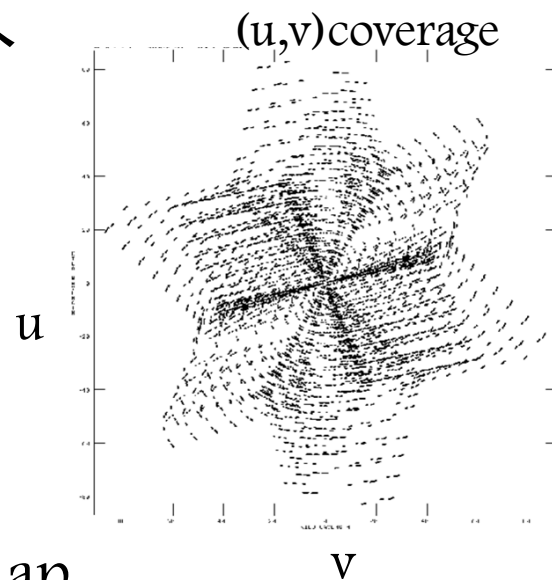


※広がった成分を得るため、短い基線長(D)の成分へ
 ガウシアンで重みをつける。(uvtaper)

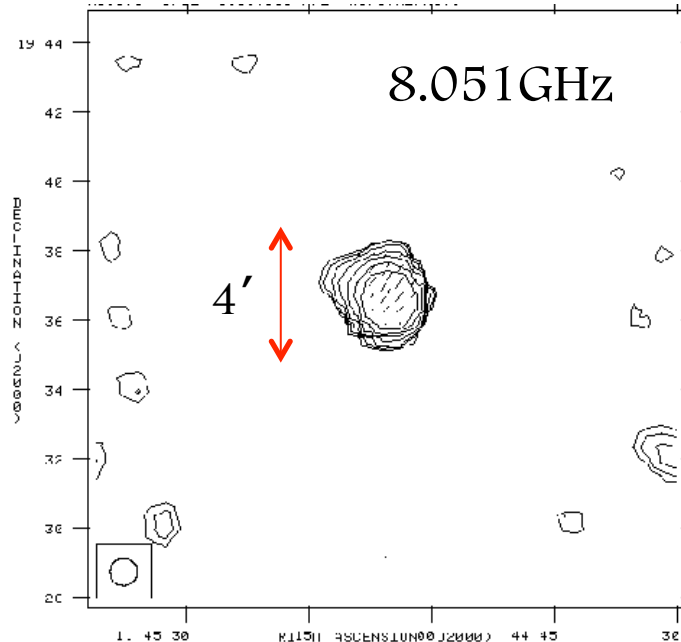
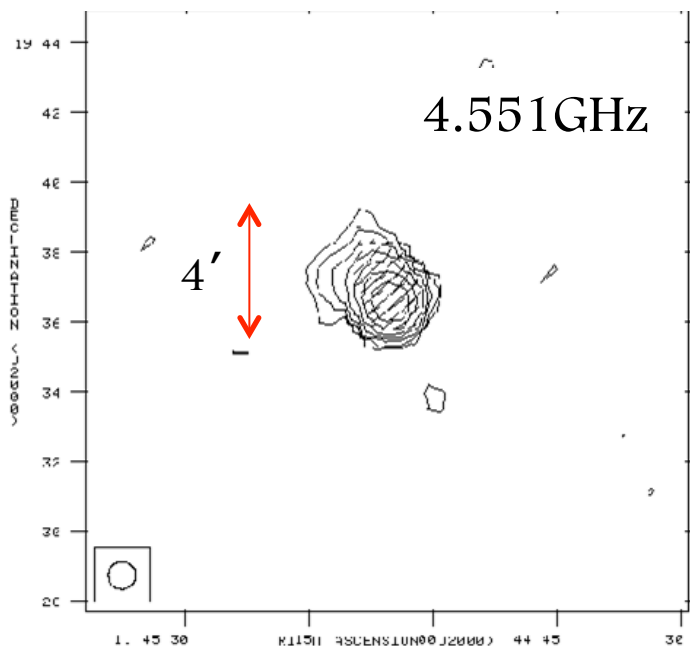
空間周波数

$$(u, v, w) = (D \cdot \sin \theta \cos \phi / \lambda, D \cdot \sin \theta \sin \phi / \lambda, D \cdot \cos \theta / \lambda)$$

干渉縞がどのように変化するか表す

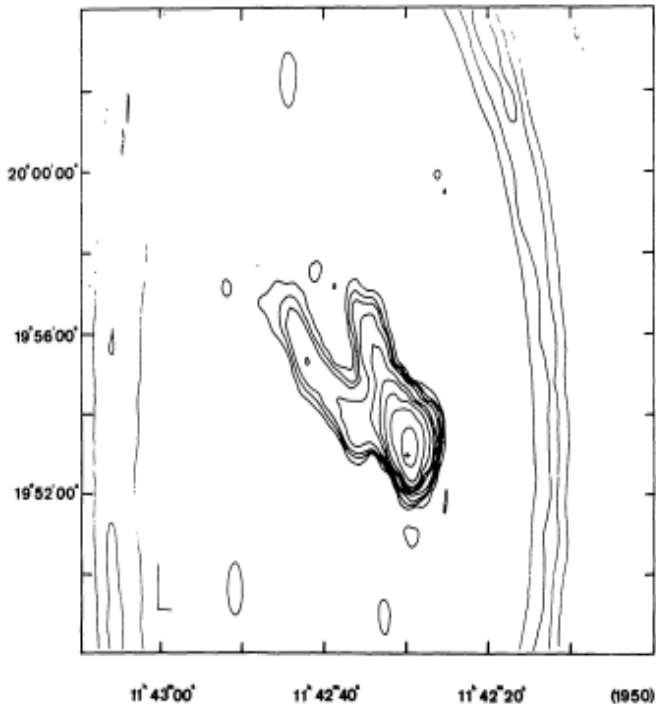


短い基線長に重みをつけた電波のcountor map



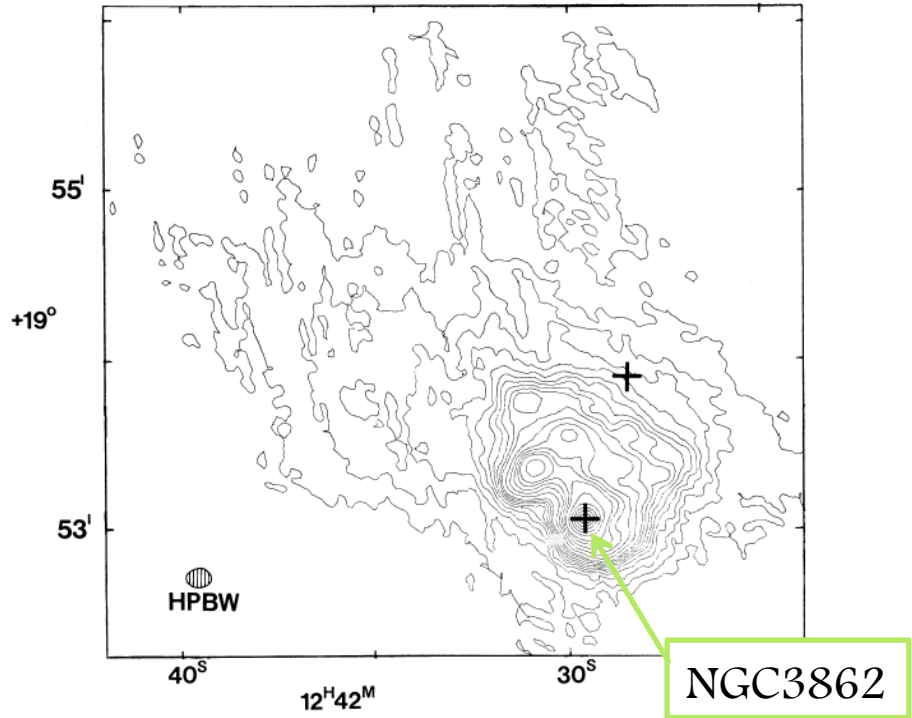
NGC3862

- >radio,opticalの両方でjetがあるような銀河
- >AGNを持つ。
- > $z \sim 0.02171$
- >斜めに伸びているような形



G.Gavazzi et.al (1981)

1.4GHz WSRTでのmap
(Westerbork Synthesis Radio Telescope)



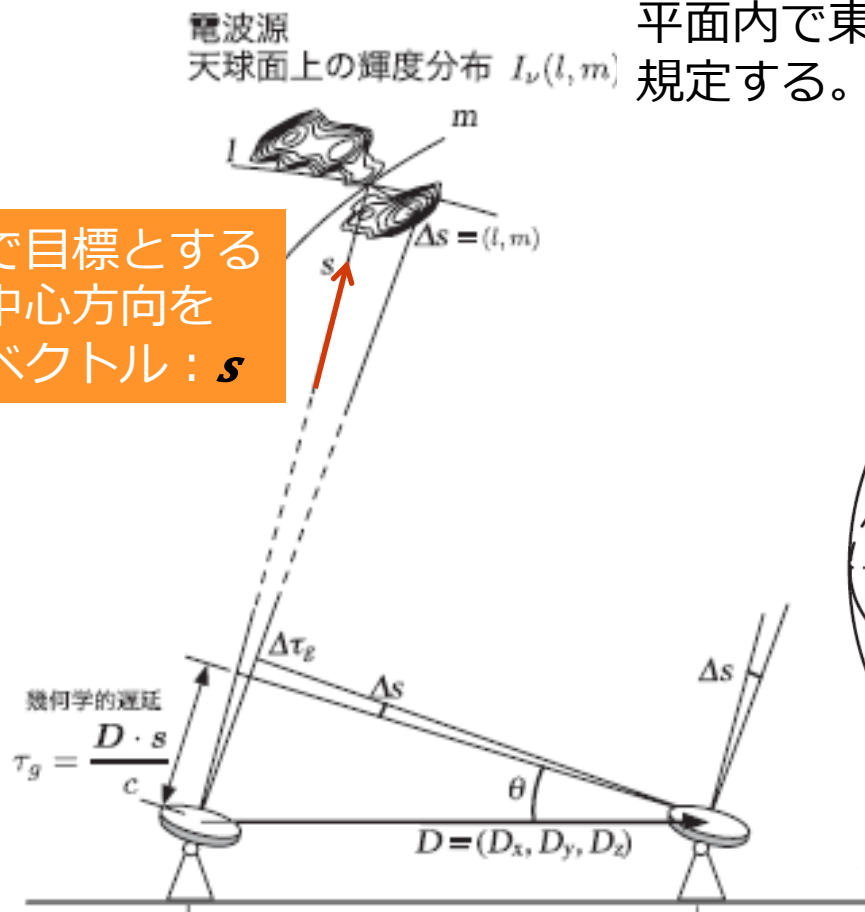
A.H Bridle et.al (1981)

VLA 1.4GHz
total intensity map

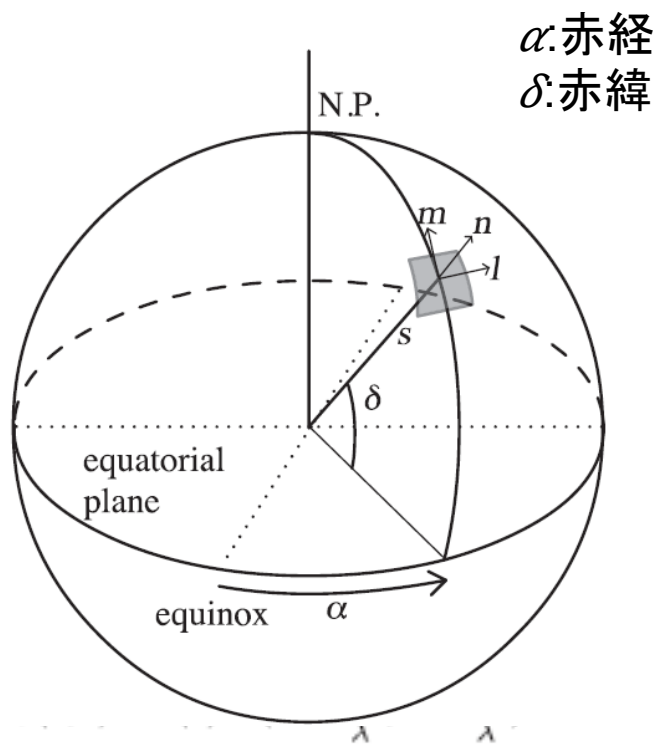


電波干渉計について

※ s を位相追尾中心として天球面に接する平面内で東西方向 l ,南北方向 m の座標系を規定する。

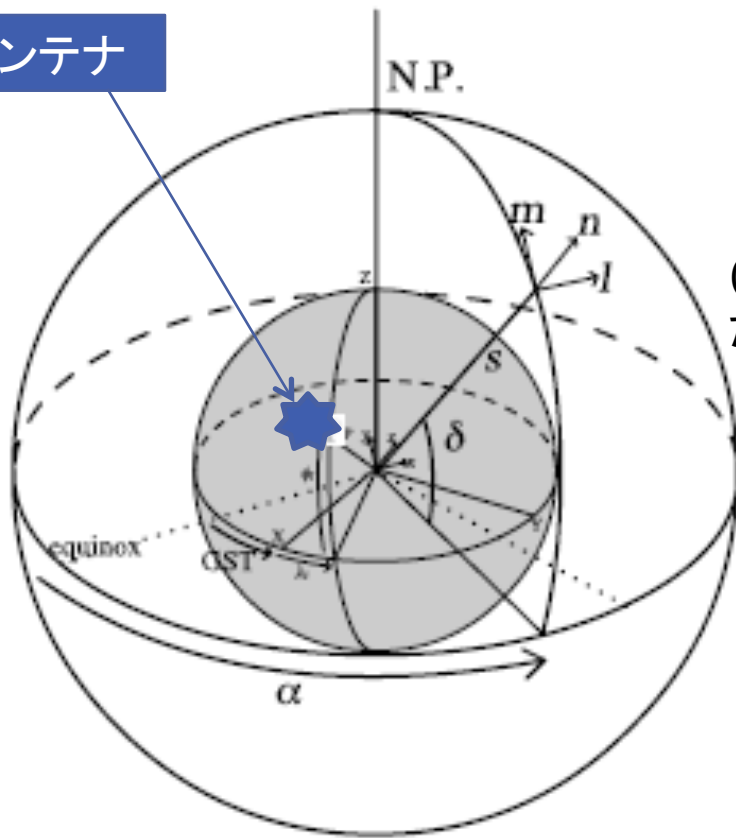


天球面上で目標とする電波源の中心方向を指す単位ベクトル： s



電波干渉計について

アンテナ



※アンテナを地球に固定させて座標系をとる。

Z軸...北極

X軸...経度 $\lambda \ll l=0$, 経度 $\phi \ll l=0$

Y軸...経度 $\lambda \ll l=\pi/2$, 緯度 $\phi \ll l=0$

※アンテナの位置ベクトルを \mathbf{P} とおく。

$(P \downarrow X, P \downarrow Y, P \downarrow Z) = R \downarrow P (\cos \lambda \ll l \cos \phi \ll l, \sin \lambda \ll l \cos \phi \ll l,$

ただし、 $R \downarrow p = |\mathbf{P}|$

※解析に関して

- beamsizeは48" に固定
(L帯のビームサイズに合わせた)
- Pixelsizeはbeamsizeの1/2程度の大きさにした。
- 今回の解析では、C,X帯のIF1～16とVLAのarchiveデータ1.46GHzの全部で33周波数で解析した。
- 今回は33周波数のうち、4周波数以上、偏波が受かった場合のみ、RMを計算するようにしている。

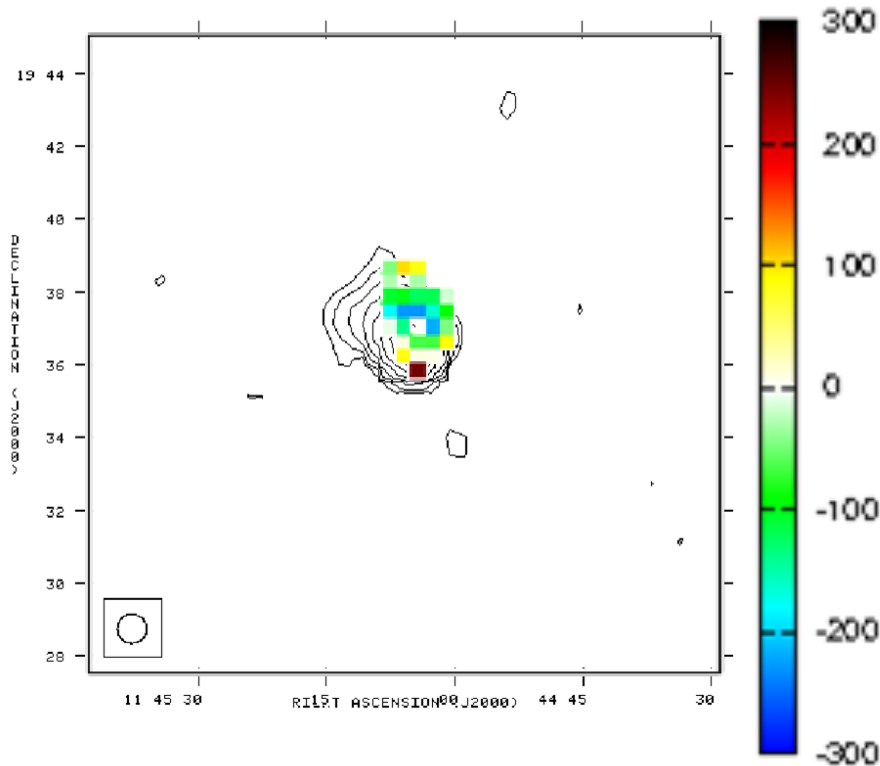
(※ただしこの条件に関しては、まだ考える必要がある。)

C, X帯 観測周波数(GHz)

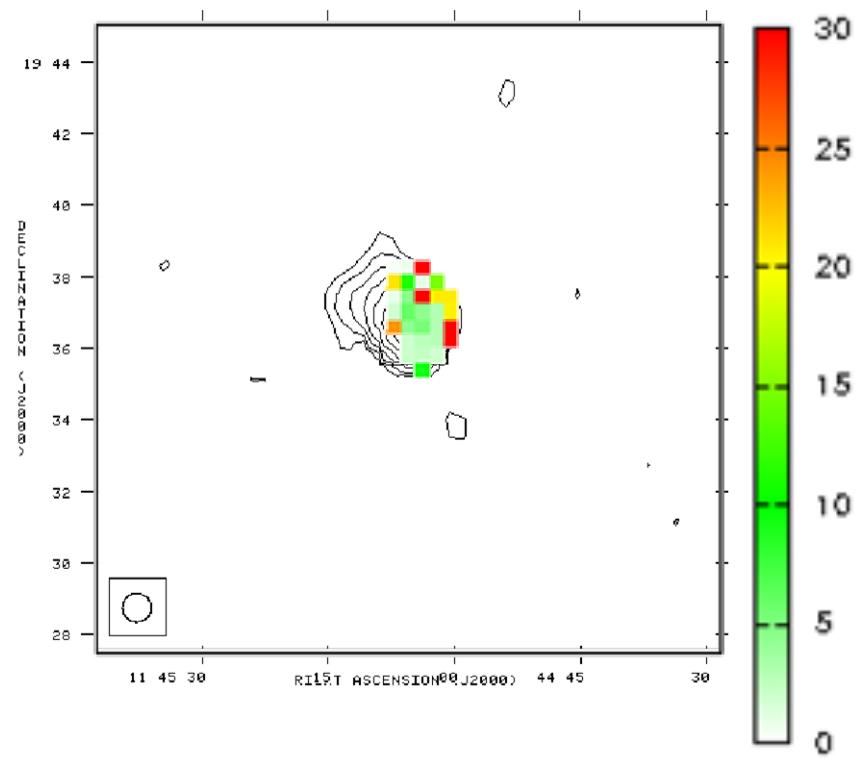
cif1	4.552	xif1	8.052
cif2	4.680	xif2	8.180
cif3	4.808	xif3	8.308
cif4	4.936	xif4	8.436
cif5	5.064	xif5	8.564
cif6	5.192	xif6	8.692
cif7	5.320	xif7	8.820
cif8	5.448	xif8	8.948
cif9	5.552	xif9	9.052
cif10	5.680	xif10	9.180
cif11	5.808	xif11	9.308
cif12	5.936	xif12	9.436
cif13	6.064	xif13	9.564
cif14	6.192	xif14	9.692
cif15	6.320	xif15	9.820
cif16	6.448	xif16	9.948

解析結果

RM map & RM error map



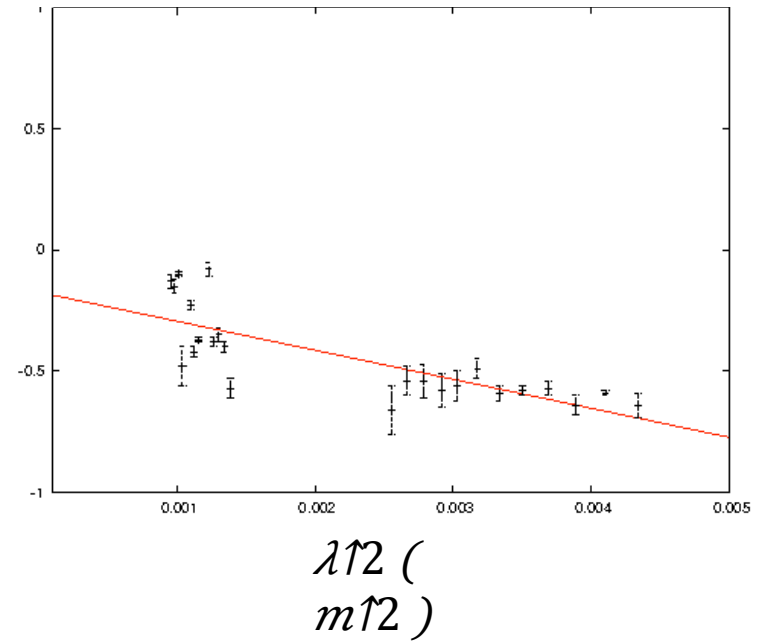
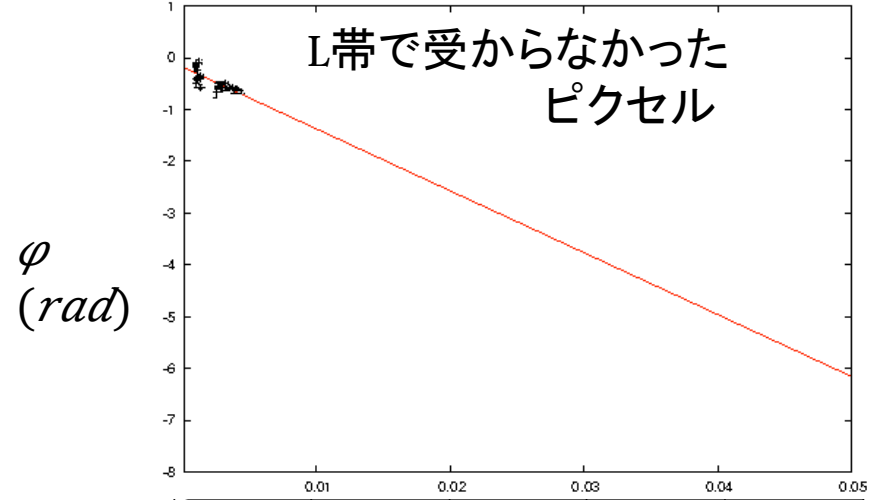
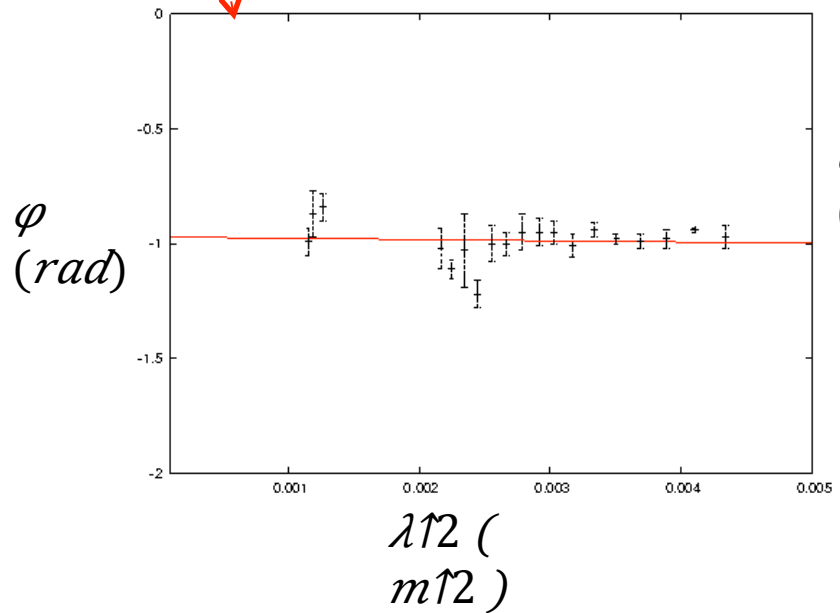
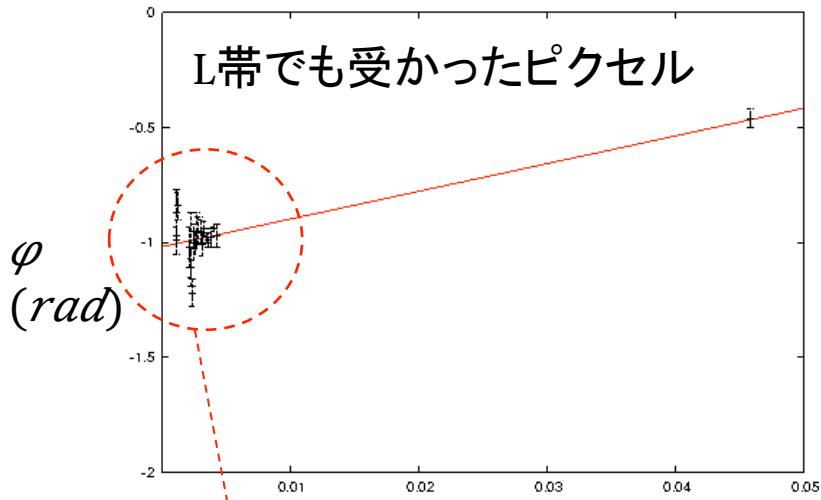
RMmap



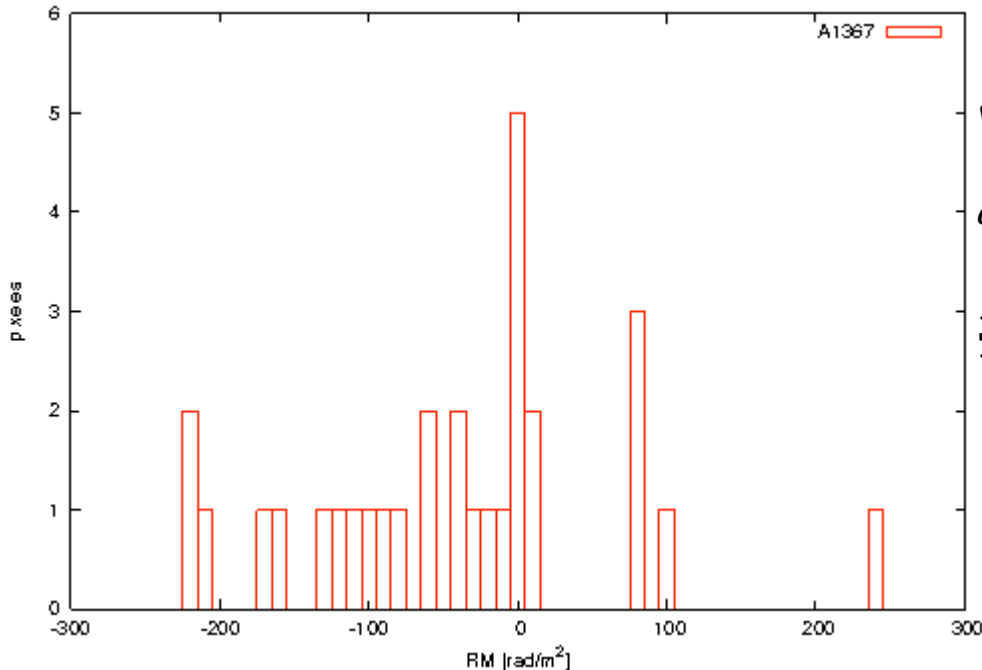
RM error map

※ストークスQ,UはIに比べて受かっていないため、RMを計算できるピクセルは少ない。→contour mapに比べてRmmapが狭い範囲にしかない。

解析結果
RM plot



解析結果 RM histogram



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

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

※標準偏差が典型的な銀河団の値よりも小さくなった

※銀河団A1367の 温度、質量に関して

➤ 平均温度 3.28keV

➤ $M_{500} = 1.84 \times 10^{14} h_{70}^{-1} M_{\odot}$

⇒ $M_{vir} \sim 3.31 \times 10^{14} h_{70}^{-1} M_{\odot}$

(Okabe et.al)

A1367は
小さな銀河団で
また電子密度も小さい

まとめ

- 銀河団Abell1367の偏波解析を行った。
- 偏波源NGC3862のRMを測定することで、A1367の磁場についての情報を得た。
- 解析した周波数はC帯(4.552~6.448GHz)とX帯(8.052~9.948GHz)とVLAのarchiveデータ1.46GHzの合わせて33周波数を使用した。
- 解析の結果、得られたRMの平均値、標準偏差はそれぞれ
 $\langle RM \rangle \sim -45.047 \text{ [rad/m}^2 \text{]}、\sigma_{RM} \sim 107.14 \text{ [rad/m}^2 \text{]}$
となった。
- F.Govoni et.al(2010)より、得られたRMの標準偏差から求めた磁場強度は $B \sim 7.8 (\Lambda \downarrow B / 10 \text{ kpc})^{1/2} \text{ [\mu G]}$ であった。
- 得られた値は典型的な規則銀河団より得られると予測される値より、大きい値になった。

今後

- 解析結果を誤差付きで表す。
- RMを計算する条件として、33周波数のうちの何周波数以上偏波が受かっているならば、そのピクセルのデータを使用してRMを計算するの点についての議論。
- A1367は規則銀河団に分類されているとして解析してきたが、中心から離れた点でもX線でのピークが見つかったため、そのほかの形態に分類される可能性も考えて議論していく必要がある。
- ランダム磁場のスケール(Λ_{LB})を、今回は典型的な値(10kpc)を入れて考えたが、今後は自己相関関数を計算して Λ_{LB} 関しての情報を得る。

Introduction

- 銀河団は衝突、合体によって成長していくと考えられ、その際にはICM中で乱流の発生が示唆される。
 - 乱流は銀河団磁場の増幅を説明する鍵になるかもしれない。
 - X線輝度分布による銀河団の形態分類は形成・進化過程を反映している可能性がある。
- ⇒ 銀河団の進化と、磁場の成長には何らかの関係がある可能性
⇒⇒ X線形態分類されている銀河団の磁場を探ることで
両者を比較したい。

X線形態	Irregular	Regular	Cool-core
銀河団進化	衝突合体期	緩和期	冷却進化期
乱流のフェーズ	Driving	Cascade/ Saturation	Saturation/ Decay
磁場の強度	weak	strong	Rather strong

A1367

Faraday Rotation による磁場の導出

Faraday Rotationを観測する。

- ◆ 銀河団の背後もしくは銀河団中にある天体からの偏光している電磁波は磁場を通ることで偏波面が回転する。
⇒ 偏波の回転度合いを見て磁場に関する情報が得られそう。
- ◆ 銀河団磁場のモデルを考え観測と比較し構造をさぐる。

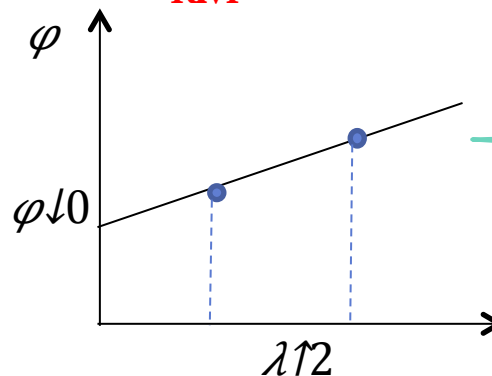


$$\Delta\varphi = \frac{\lambda^2 e^3}{8\pi^2 m_e^2 c^3 \epsilon_0} \int_0^d n_e B_{\parallel} ds$$

RM

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_0 + \Delta\varphi \\ &= \varphi_0 + RM \cdot \lambda^2\end{aligned}$$

➢ 多波長で偏波を観測(電波観測)して、RMの値を得ることで銀河団の磁場に関する情報が得られる。
※ただし、電子密度分布(X線観測)と磁場構造のモデルを考える必要がある。



傾きがRM

Abell1367

◆ X-ray morphology: Regular Non-cool-core

◆ RA...11:44.8

Dc...+19:42

◆ l...237.63(銀経)

b...+73.426(銀緯)

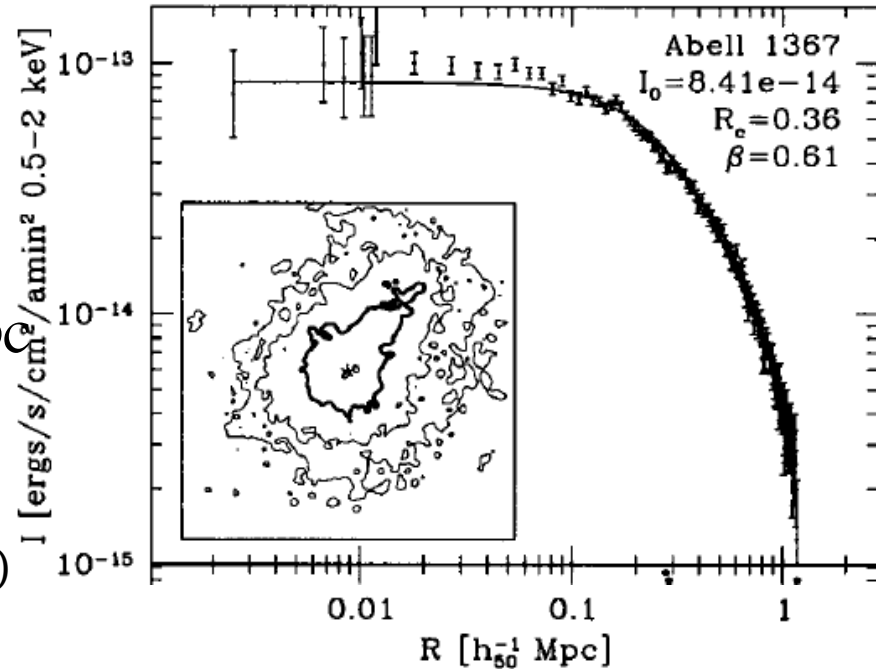
◆ $\beta = 0.61$, $r_{10} = 0.257 h_{70}^{-1} \text{ Mpc}$

◆ Redshift= 0.022

◆ 中心の電子密度

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

表面輝度



中心からの距離

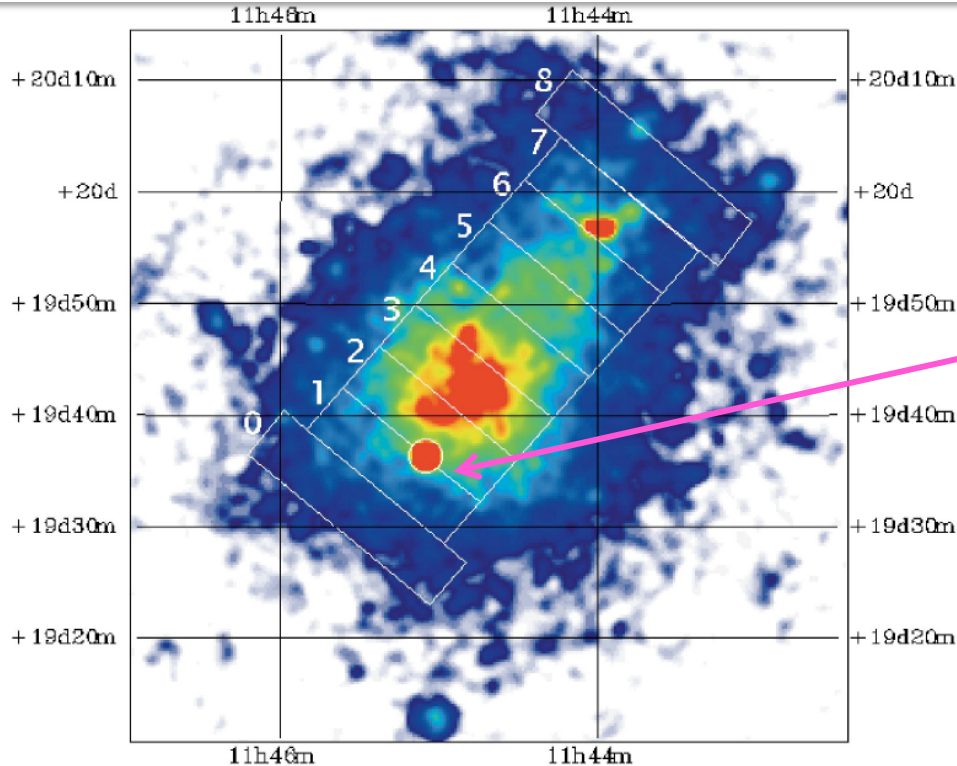
※対象銀河団はX線観測によって
 β モデル電子密度fitが得られている
 ものに限定する
 $n(r) = n_{10} [1 + (r/r_{10})^2]^{1-3\beta/2}$

n_{10} : 中心の電子密度

r_{10} : コア半径

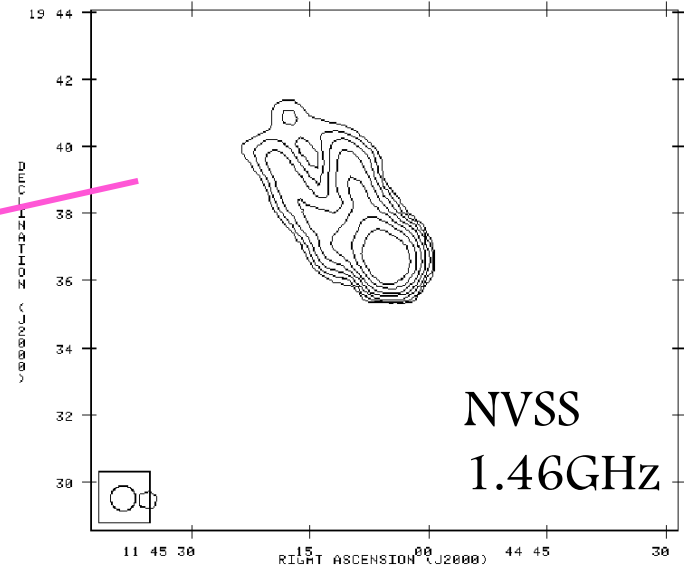
Mohr et.al (1999)

Abell 1367と偏波源 NGC3862



偏波源

NGC3862 ($z=0.02171$)



Abell 1367 Rosat X-ray image

Donnelly et.al (1998)

※銀河団中心(X-ray観測での中心)と

偏波源の間の距離 r

$r \sim 197 h_{70}^{-1} \sim 1 \text{ kpc}$

◆ RA..11:45:05.62

Dec..+19:36:18.70

◆ 可視光、電波でJetが
確認されている。

※A1367は規則銀河団に分類されるとしている。
確かに中心部分は規則銀河団と考えられるが、
離れた所にもう一つピークがあるため、よく調べる
必要あり。

観測概要

- ◆観測天体:Abell1367
- ◆JVLAによる観測 (P.I.:赤堀さん)
- ◆アレイ配置:Cアレイ
- ◆Cband(4.552~6.448GHz)
 - 観測日時:2013.8.24
 - 観測時間 :0.25h
- ◆Xband(8.052~9.948GHz)
 - 観測日時:2013.8.20
 - 観測時間 :0.25h
- ◆Band width:128MHz
- ◆16IF

※解析に関して

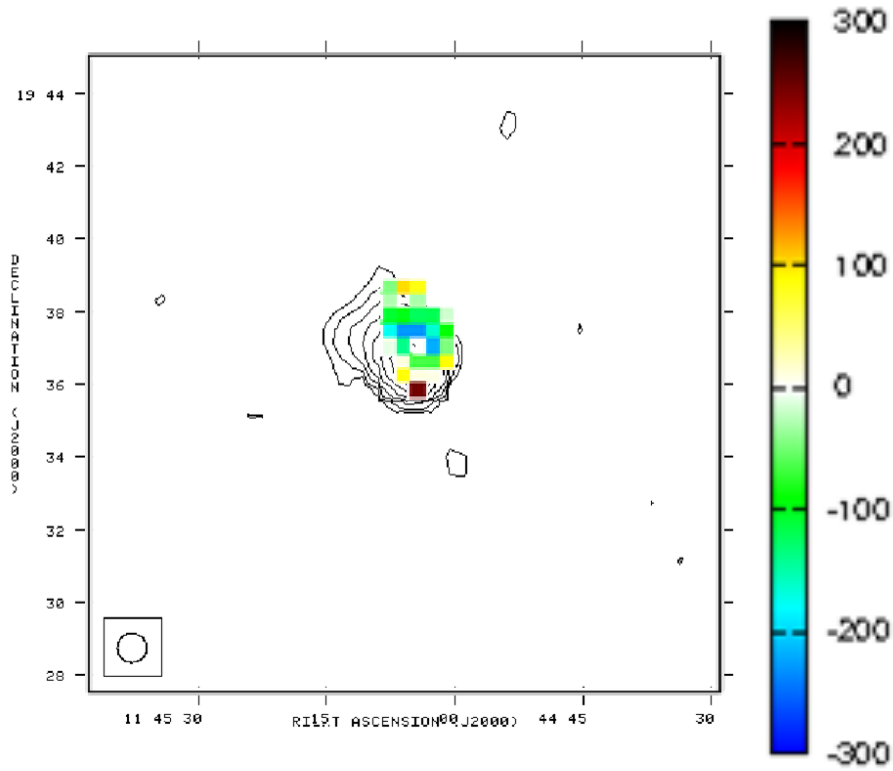
- beamsizeは48" に固定
(L帯のビームサイズに合わせた)
- Pixelsizeはbeamsizeの1/2程度の大きさにした。
- 今回の解析では、C,X帯のIF1～16とVLAのarchiveデータ1.46GHzの全部で33周波数で解析した。
- 今回は33周波数のうち、4周波数以上、偏波が受かった場合のみ、RMを計算するようにしている。

(※ただしこの条件に関しては、まだ考える必要がある。)

C, X帯 観測周波数(GHz)

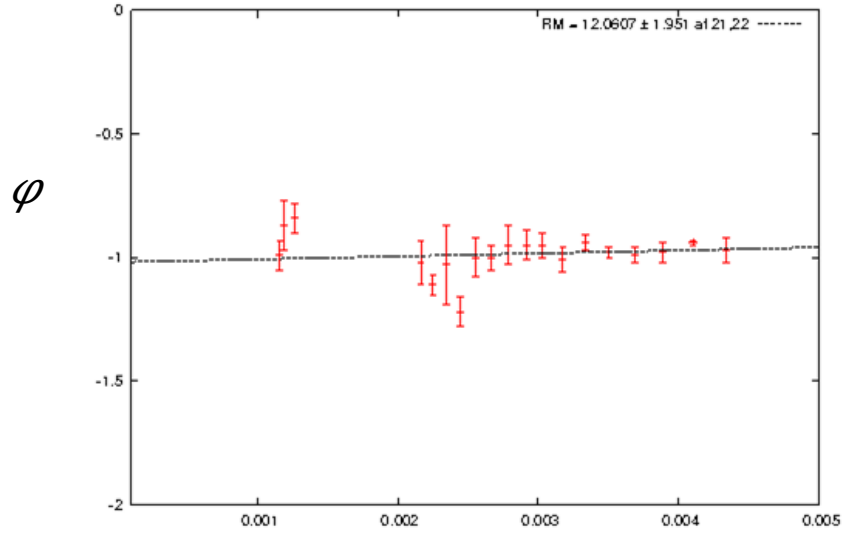
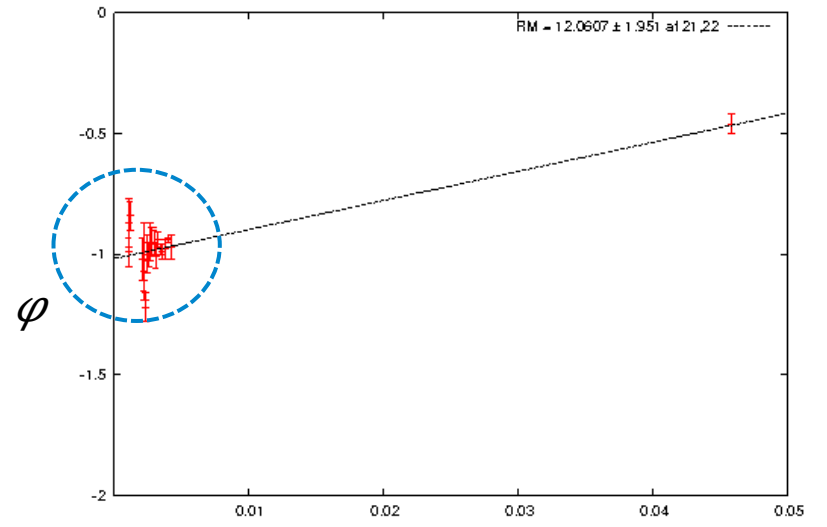
cif1	4.552	xif1	8.052
cif2	4.680	xif2	8.180
cif3	4.808	xif3	8.308
cif4	4.936	xif4	8.436
cif5	5.064	xif5	8.564
cif6	5.192	xif6	8.692
cif7	5.320	xif7	8.820
cif8	5.448	xif8	8.948
cif9	5.552	xif9	9.052
cif10	5.680	xif10	9.180
cif11	5.808	xif11	9.308
cif12	5.936	xif12	9.436
cif13	6.064	xif13	9.564
cif14	6.192	xif14	9.692
cif15	6.320	xif15	9.820
cif16	6.448	xif16	9.948

解析結果 RM map

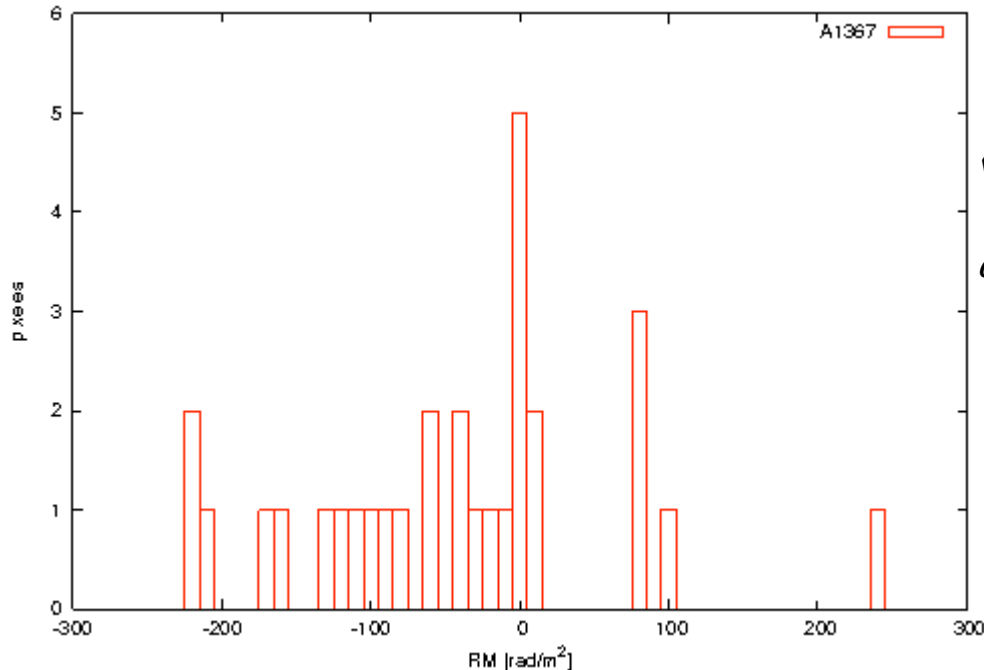


RMmap

Counter : Cband (4.552GHz)



解析結果 RM histogram



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

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

※RMが計算された
ピクセルは30個だった

※銀河団A1367の 温度、質量に関して

➤ 平均温度 3.28keV

➤ $M_{500} = 1.84 \times 10^{14} h_{70}^{-1} M_{\odot}$

⇒ $M_{vir} \sim 3.31 \times 10^{14} h_{70}^{-1} M_{\odot}$

(Okabe et al. 2010)

A1367は
小さめな銀河団で
また電子密度も小さい

まとめと今後

- 偏波源NGC3862のRMを測定することで、A1367の磁場についての情報を得た。
- 解析した周波数はC帯(4.552~6.448GHz)とX帯(8.052~9.948GHz)とVLAのarchiveデータ1.46GHzの合わせて33周波数を使用した。
- 解析の結果、得られたRMの平均値、標準偏差はそれぞれ $\langle RM \rangle \sim -45.047 [rad/m^2]$ 、 $\sigma_{RM} \sim 107.14 [rad/m^2]$ となった。
- Govoni et al. (2010)より、得られたRMの標準偏差から求めた磁場強度は $B \sim 4.51 (\Delta B / 10 kpc)^{1/2} [\mu G]$ であった。

- RMを計算する条件として、33周波数のうちの何周波数以上偏波が受かっているならば、そのピクセルのデータを使用してRMを計算するのかという点に関する議論が必要。
- A1367は規則銀河団に分類されているとして解析してきたが、中心から離れた点でもX線でのピークが見つかったため、そのほかの形態に分類される可能性も考えて議論していく必要がある。
- ランダム磁場のスケール(ΔB)を、今回は典型的な値(10kpc)を入れて考えたが、今後は自己相関関数を計算して ΔB に関する情報を得る。

❖ 目的

- 乱流による銀河団磁場増幅の有無を観測から調べる

❖ 理論

- 乱流磁場による偏波解消
- X線形態による磁場強度の違い

❖ 方法

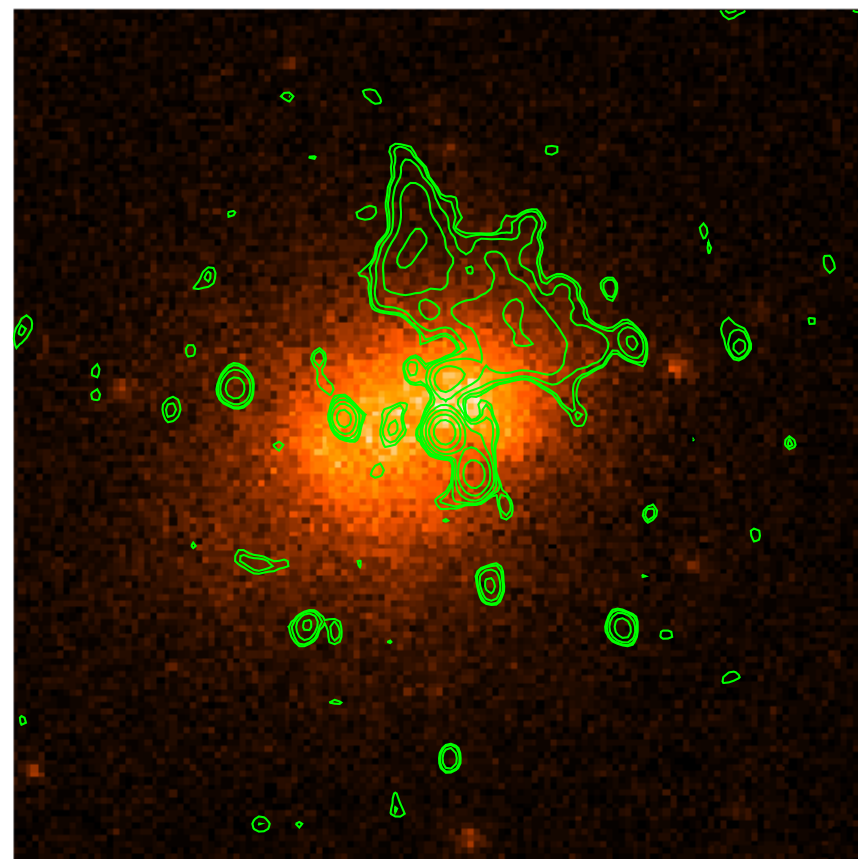
- JVLAで銀河団を偏波観測

❖ 結果

- Abell 2256のリダクションと解析
 - Stokes Iのスペクトル
 - 偏波率
 - Faraday Rotation Measure

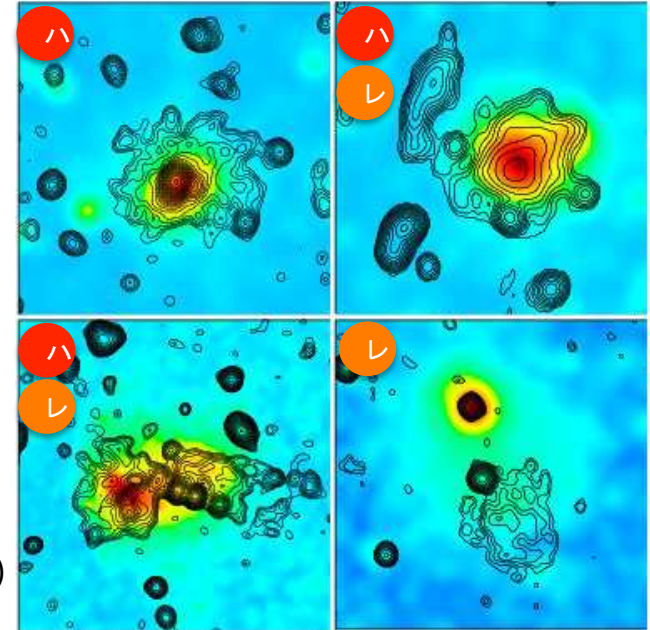
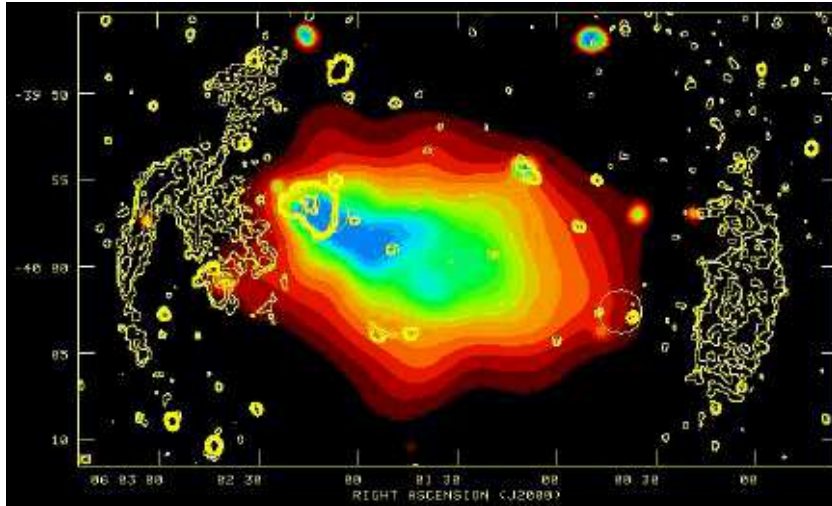
❖ 議論

- Abell 2256の偏波解消
- Abell 2256、401、2199の磁場強度比較



Abell 2256 JVLA 2GHz + X線

銀河団の広がった電波放射



Abell 3376 コントア:電波 カラー:X線 (Bagchi + 2006)

- ❖ 銀河団は衝突により進化
- ❖ Intra Cluster Medium(ICM, $\sim 10^7$ K)が熱制動放射
- ❖ 数百kpc~数Mpcに広がるシンクロトロン放射が見える事がある

ハロー

X線放射と電波放射が同箇所
で起きているもの

レリク

X線放射の周辺に電波放射が
あるもの

ミニハロー

小型のHalo、まだ定義が曖昧

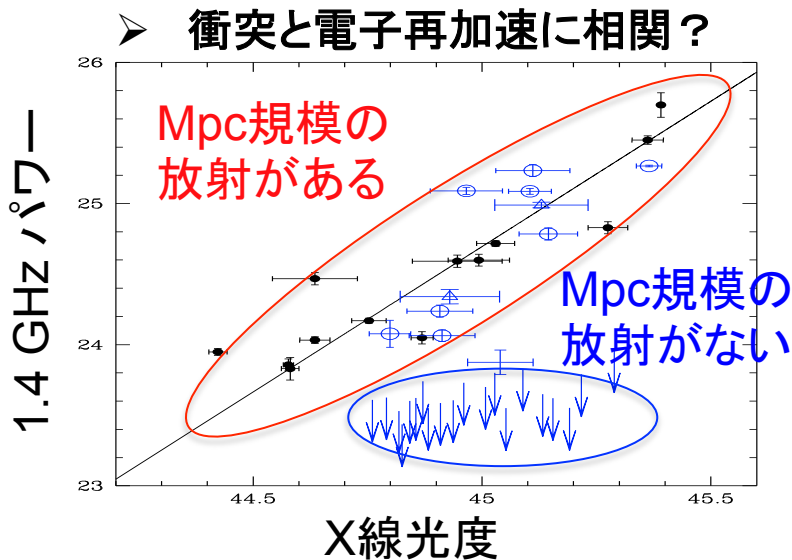
広がった電波放射の起源

放射機構仮説

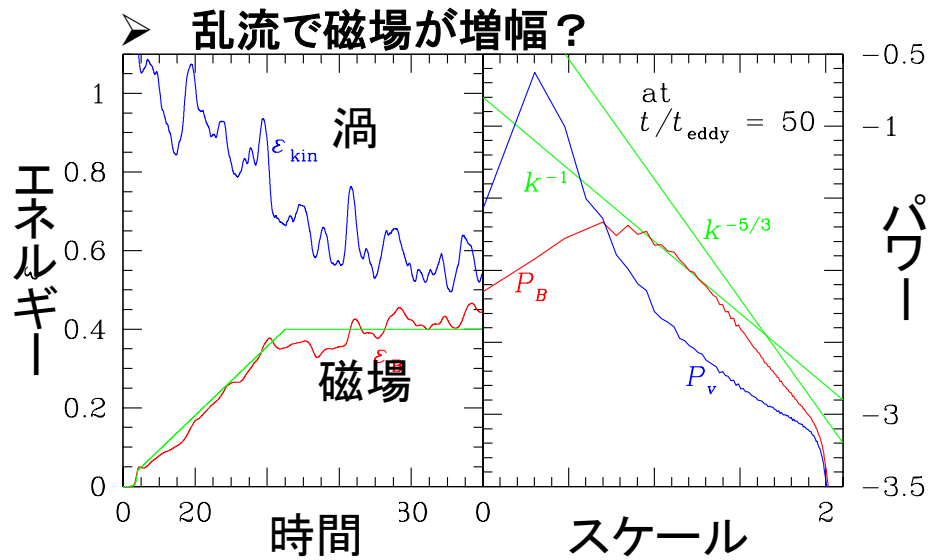
1. 銀河団衝突・衝撃波の発生
2. ICM内の加熱・乱流の発生
3. 乱流による磁場の増幅
4. 宇宙線電子の再加速
5. 広がった電波放射の発生

乱流の証拠として
❖ 乱流磁場による偏波解消

乱流による磁場増幅の証拠として
❖ X線形態による磁場の性質の違い
が見られる？

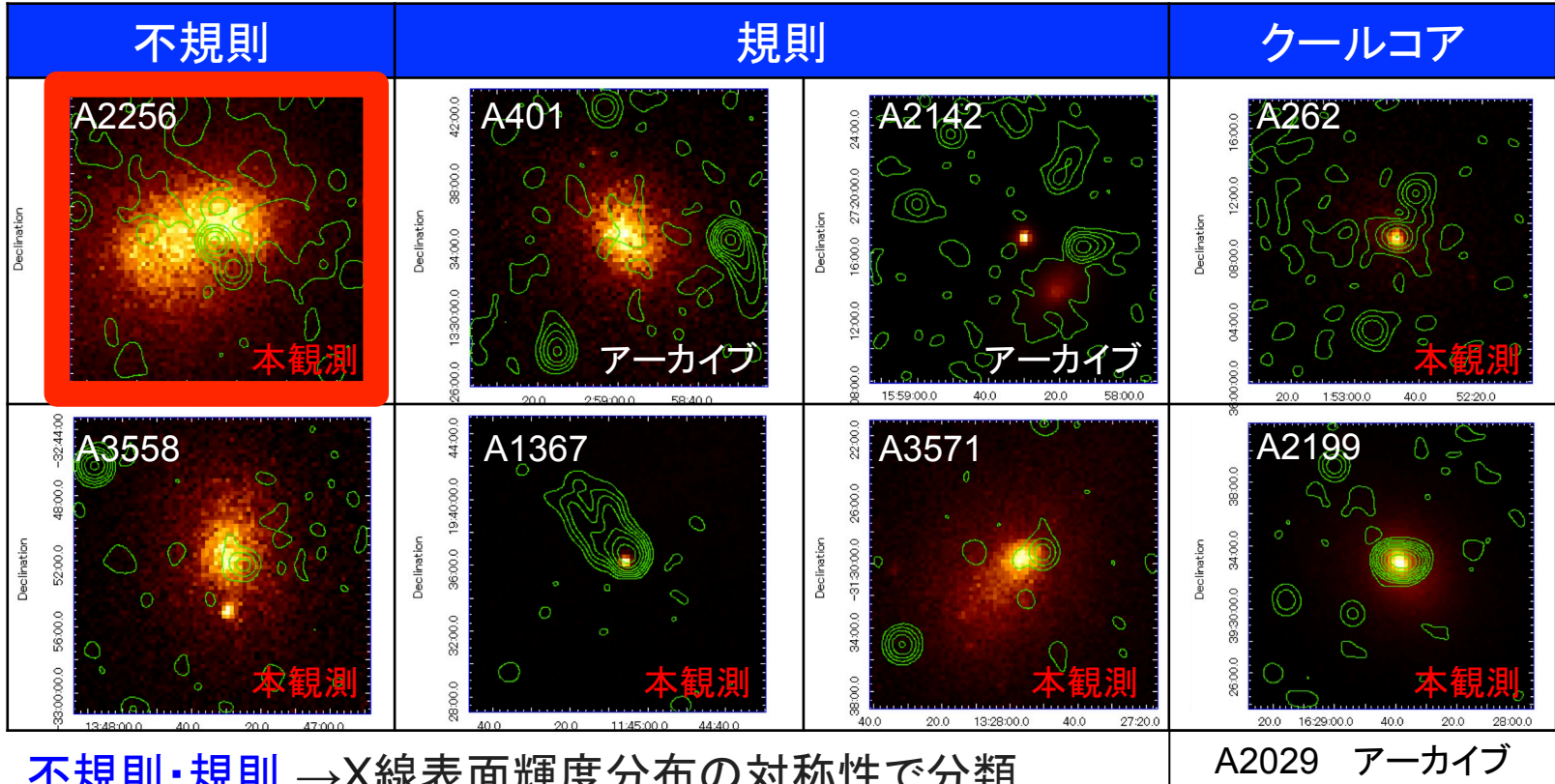


電波強度とX線光度との関係 (Brunetti + 2009)



乱流による磁場の増幅 (Ryu + 2008)

X線形態分類



不規則・規則 → X線表面輝度分布の対称性で分類

クールコア → 銀河団中心に向かって温度の減少がある

衝突により
不規則 → 規則 → クールコア
と進化してるなら

X線形態	不規則	規則	クールコア
乱流の状態	ドライビング	カスケード・飽和	飽和・減衰
磁場強度	弱い	強い	強い

The Karl G. Jansky Very Large Array

観測概要

- ❖ 2012年にJVLAへ観測提案を申請し(P.I. 赤堀)、2013年9月にAbell 2256を含む6天体の観測を実施した

天体の選定条件

X線で観測されている近傍銀河団 (Mohr + 1999)

β モデル(電子分布モデル)のパラメータが既知
(Mohr + 1999, Ota & Mitsuda 2002, Chen + 2007)

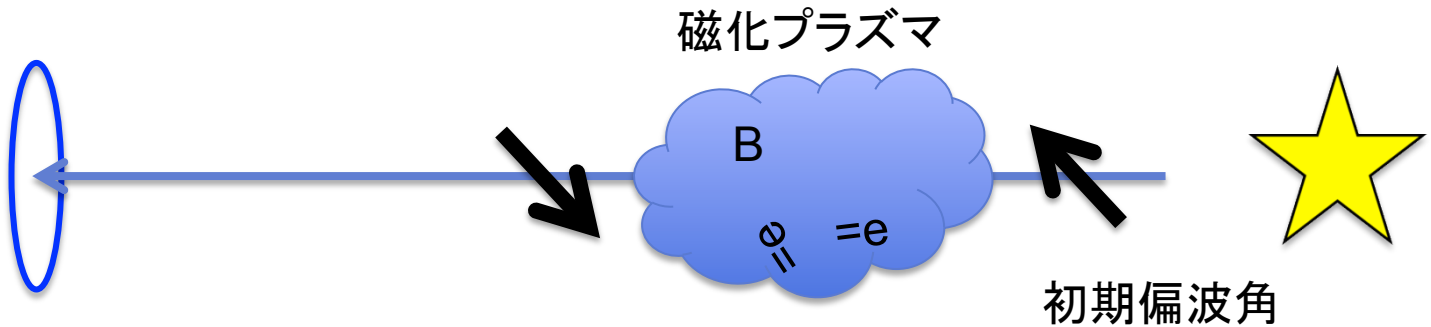
X線形態分類が
なされている
(Akahori & Masai
2005)

クールコアの存在が既知 (Sanderson + 2006)

- Cアレイ配置
- S帯(2-4 GHz), X帯(8-10 GHz)
- 両偏波観測

銀河団磁場の測定方法

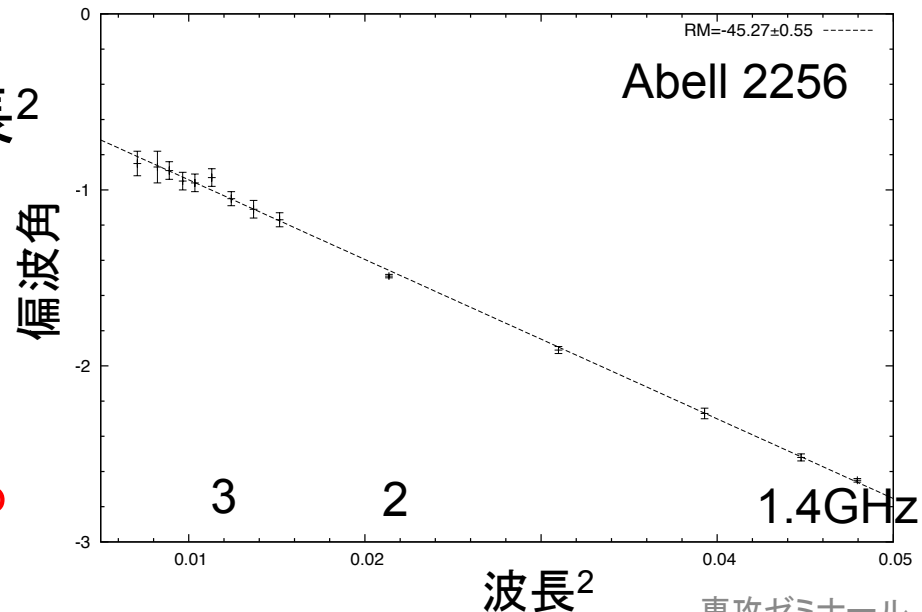
❖ Faraday Rotation Measure



$$\text{偏波角} = \text{初期偏波角} + \text{RM} \cdot \text{波長}^2$$

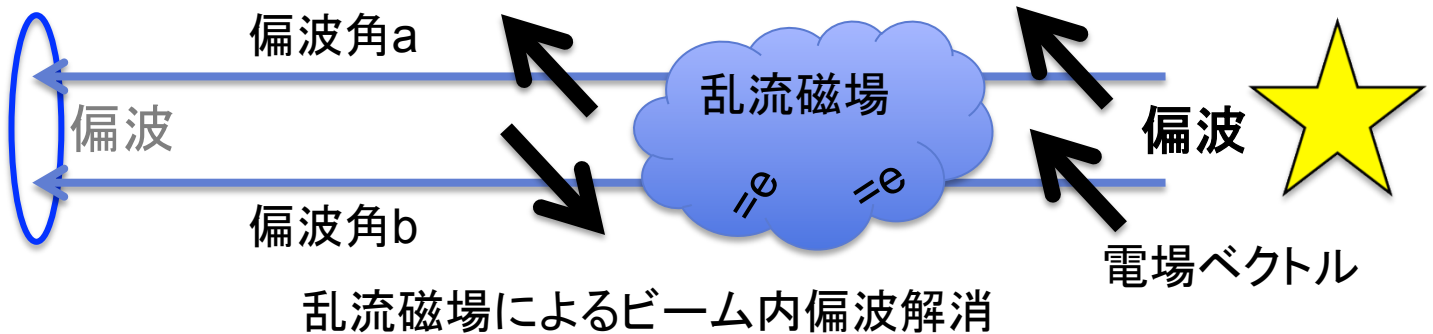
$$\text{RM} = 0.81 \int n_e B_{\parallel} dl$$

- 視線方向の磁場の情報が得られる
- 銀河団内偏波源の銀河団磁場によるファラデー回転を観測



乱流磁場による偏波解消

偏波解消: 天体固有の偏波よりも弱まった偏波を観測する現象



直線偏波強度

$$P(\lambda^2) = \int \varepsilon(r) e^{2i\chi(r, \lambda^2)} dr$$

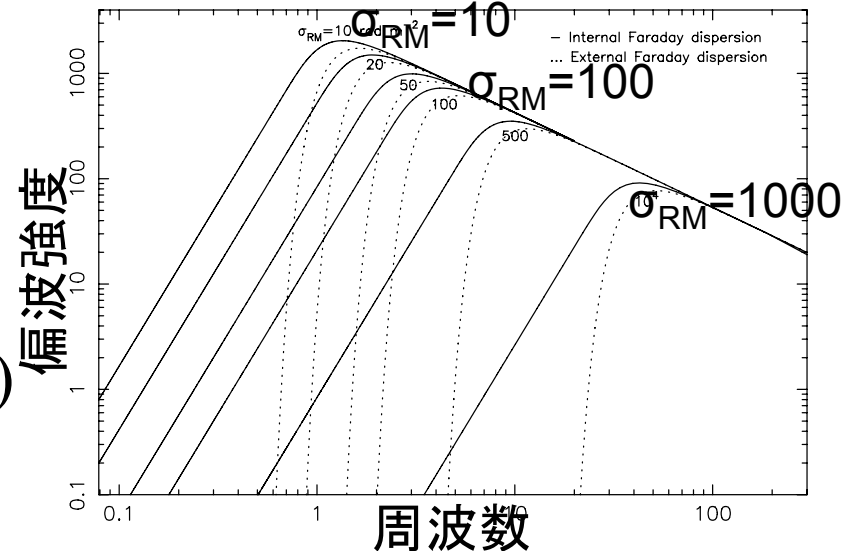
ε : 放射率 χ : 偏波角

放射率1、偏波角a, bの偏波があるとして

$$P = e^{2ia} + e^{2ib} \quad |P|^2 = 2 + 2 \cos 2(a - b)$$

❖ 偏波角の差が $\pi/2$

(電場ベクトルの差が π)の時無偏波

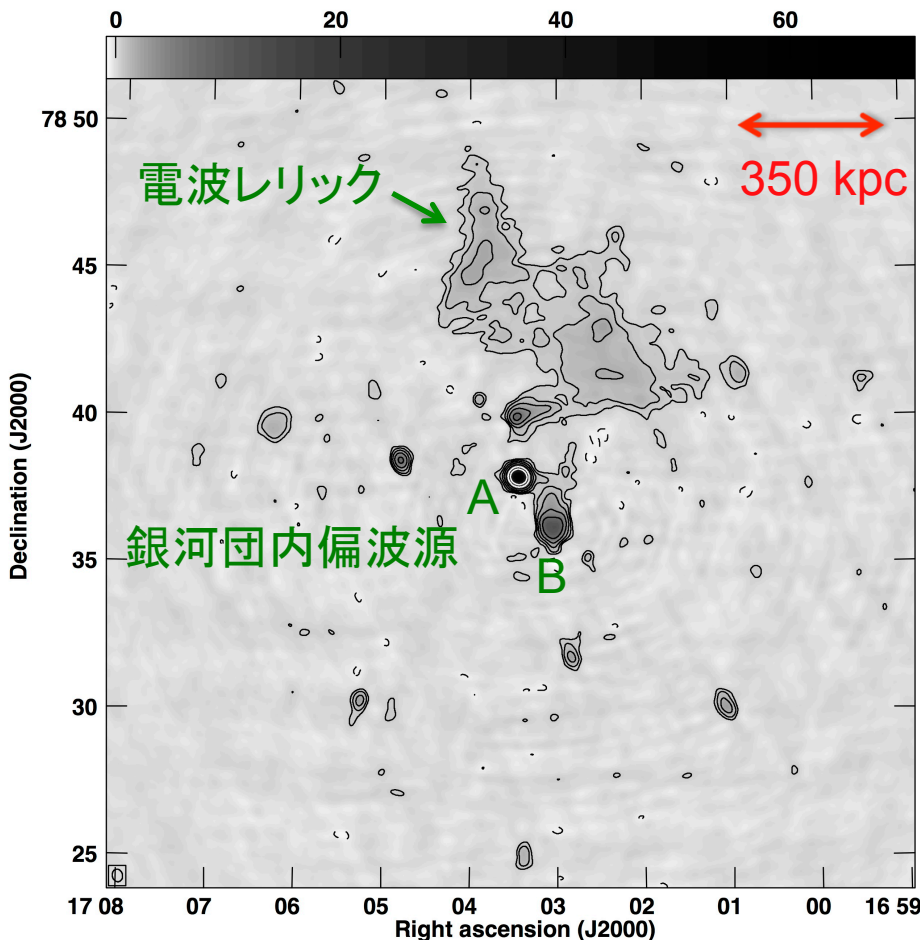


ビーム内偏波解消のBurn則

(Arshakian & Beck 2011) 専攻ゼミナール

Abell 2256

RA, DEC (X線) = 17h04m2.3s + 78°37'55.2"
l,b = 110.996, 31.754
z = 0.0581: 66.96kpc/arcmin



Abell 2256 JvLA 2GHz

❖ 衝突銀河団

- 銀河が3つの速度集団をなす
- 銀河団ガスのバルクモーション

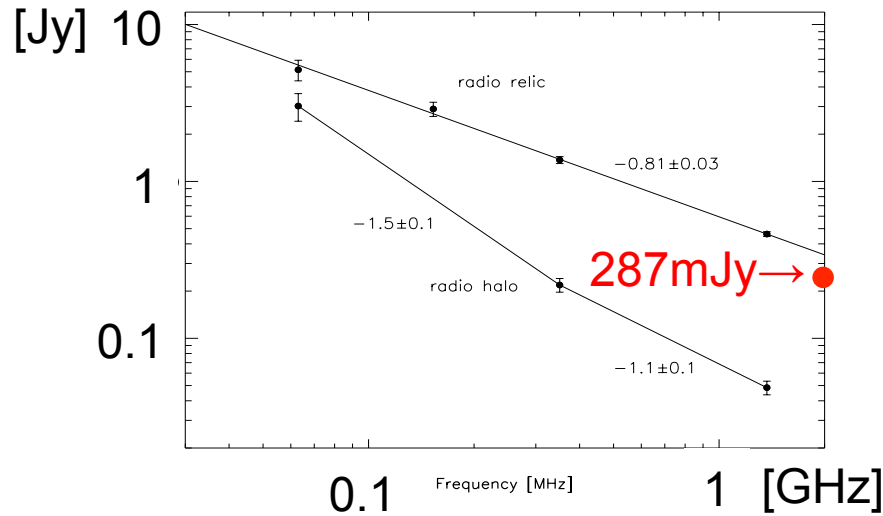
❖ 過去の干渉計観測

- LOFAR 60 (MHz)
- GMRT 150
- WSRT 350
- JvLA 1300~8000
- JvLA 2000~3500 ←New!
- JvLA 8000~10000 ←New!

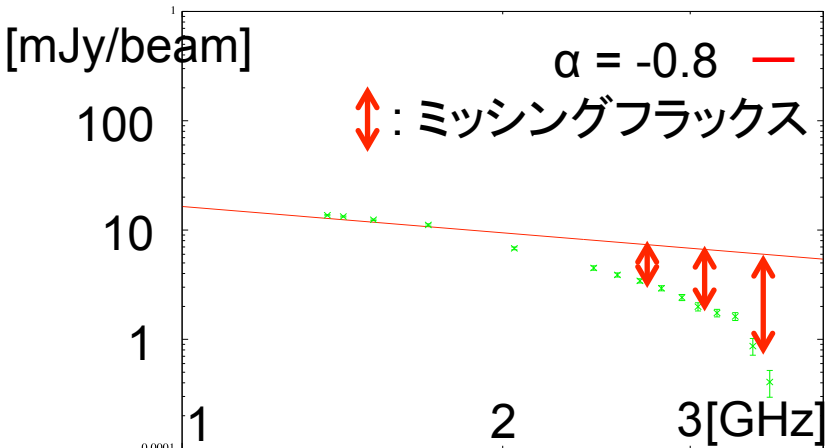
❖ 高周波数のメリット

- 分解能が高い
- ファラデー回転が起きにくい
 - intrinsicな磁場の決定
 - 低周波数のデータと合わせた精密なRM

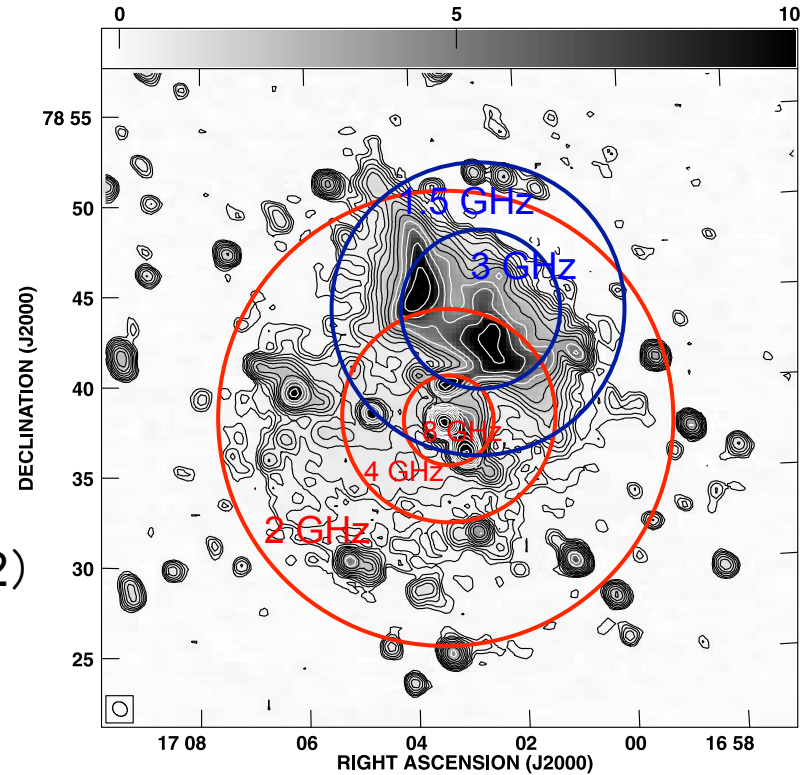
電波レリックのスペクトル



レリック全域のフラックス (van-Weeren + 2012)



レリック内のある1点でのスペクトル

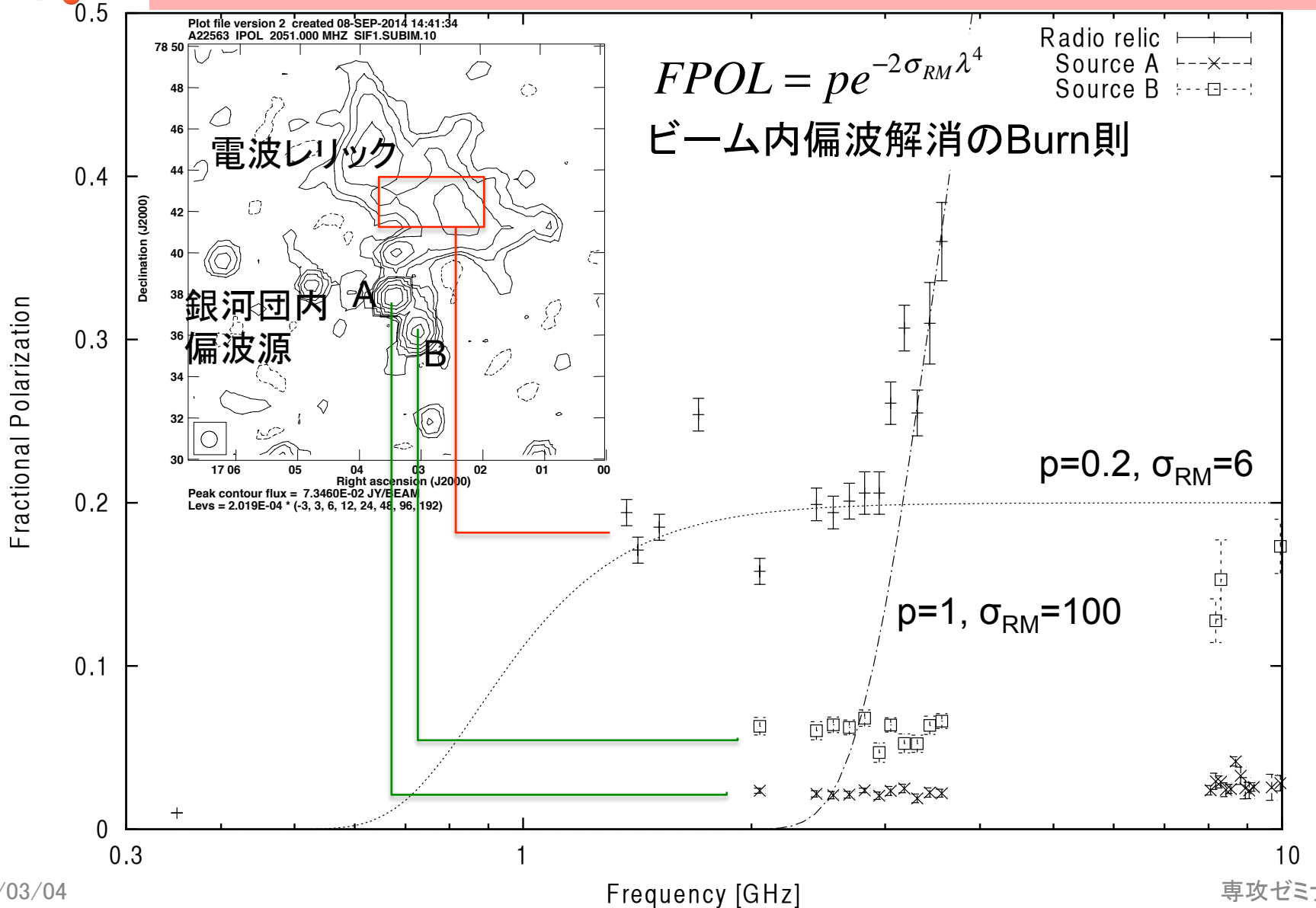


A2256 1396 MHz (Clarke & Ensslin 2006)

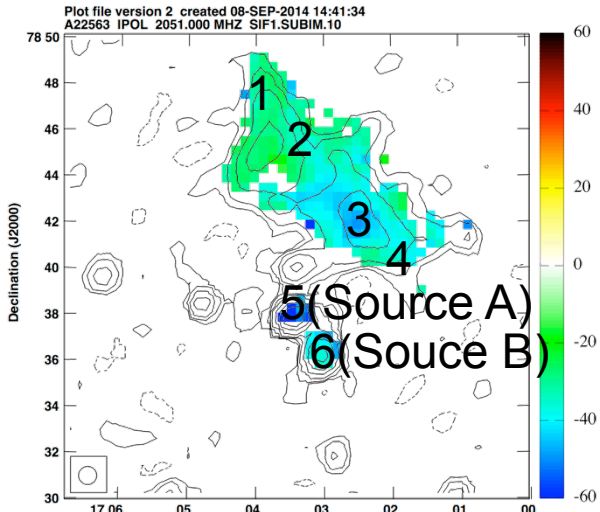
赤: 視野 (背景偏波源が観測中心) 青: 最大角度スケール (比較のためレリックに重ねている)

- ❖ 単一鏡2.7GHzの観測ではフラックスの低下は見られない (e.g. Owen 1975)
- ❖ **JVLAの最大角度スケールに起因?**

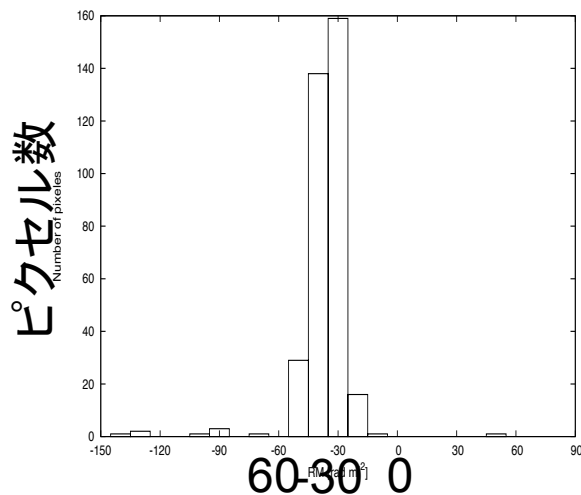
電波レリックと銀河団内偏波源の偏波率



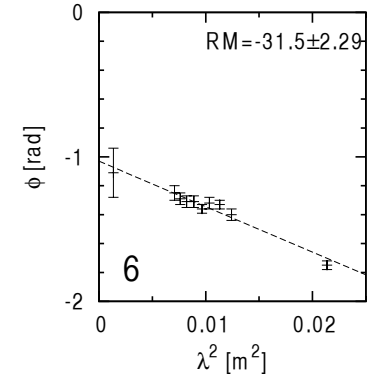
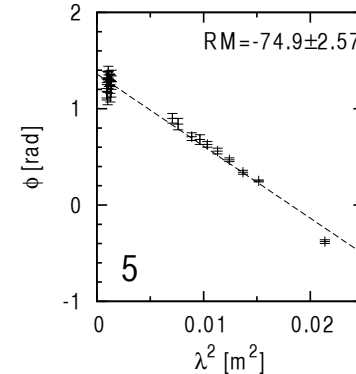
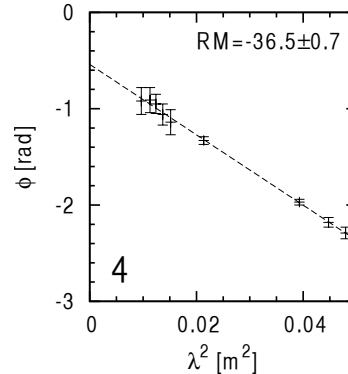
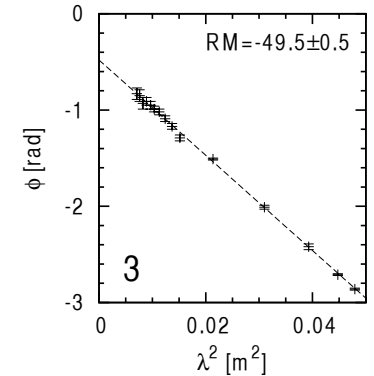
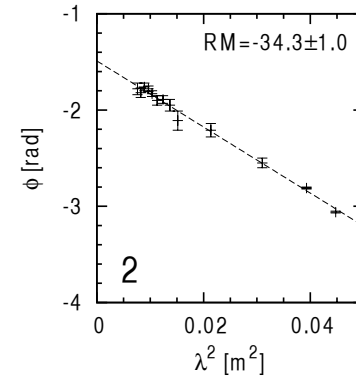
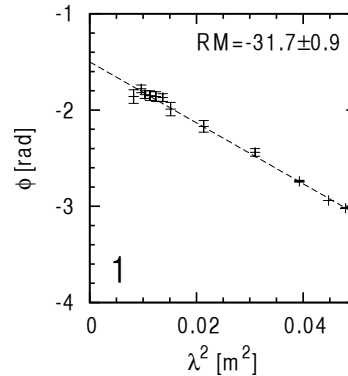
Faraday Rotation Measure



RM分布 (コンア: 2 GHz, 47")



RM頻度分布



❖ RMの平均値と分散

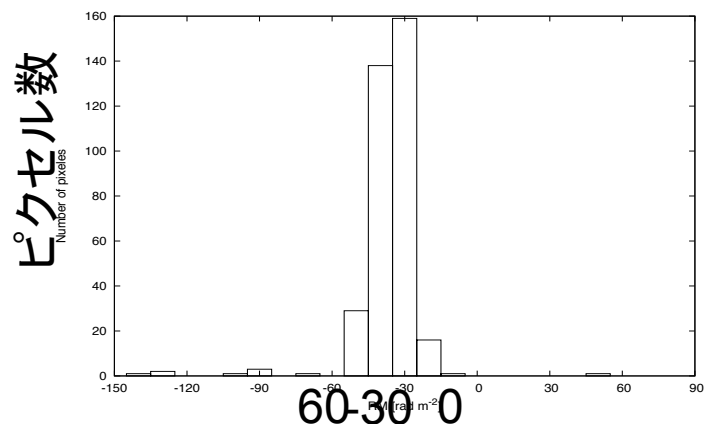
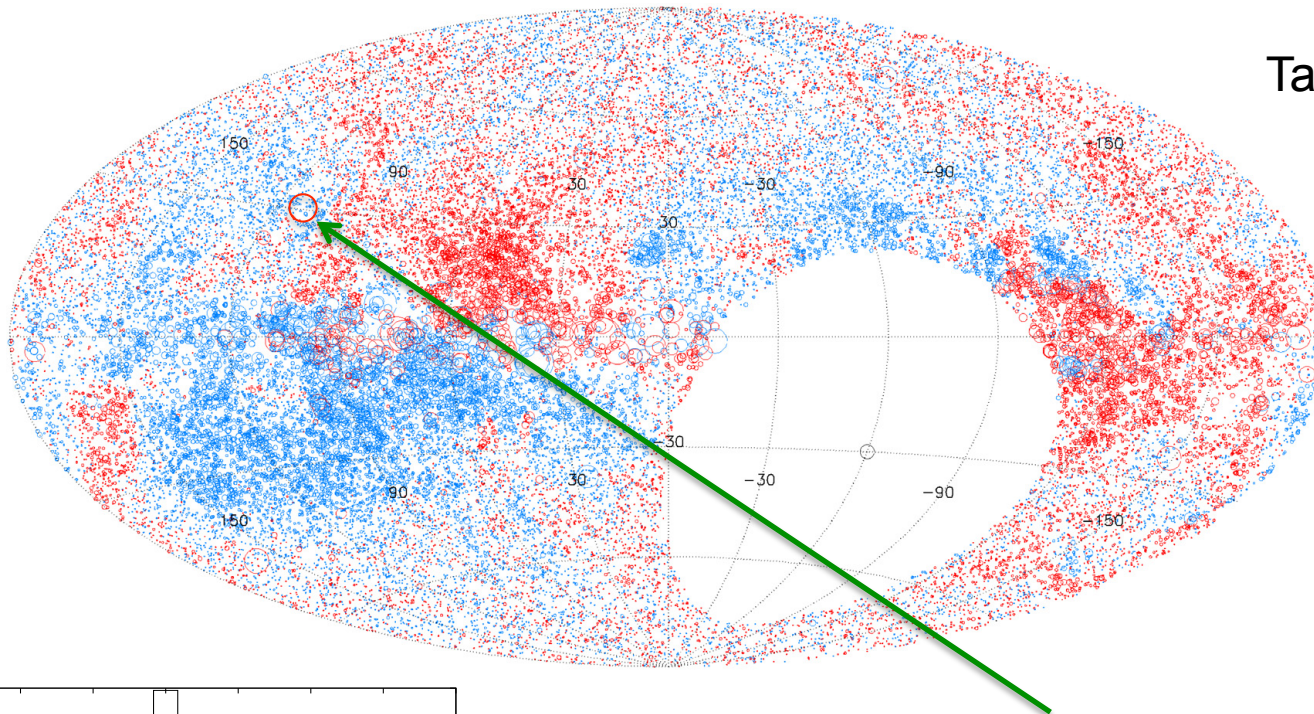
- レリック: $-34.5 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$ $\sigma = 6.2 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$
- A: $-24.9 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$ $\sigma = 65.5 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$
- B: $-34.1 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$ $\sigma = 10.5 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$

❖ 偏波角が偏波角=RM・波長²の関係にある

- 偏波源の外でファラデー回転が起きた

RM平均値の負方向へのシフト

Taylor + 2009



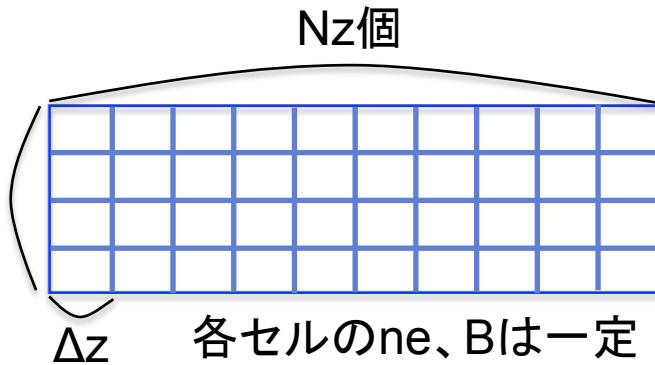
- ❖ **Abell 2256半径3°以内の28天体のRM**
 - 平均 = -30.0 [$\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$]
 - $\sigma = 16.7$ [$\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$]
- ❖ **負へのシフトは銀河系が原因？**

議論1 電波レリックの偏波率

- ❖ ビーム偏波解消のBurn則では電波レリックの階段状の偏波率の変化を再現できない
- ❖ 偏波解消の数値計算モデルを作成した



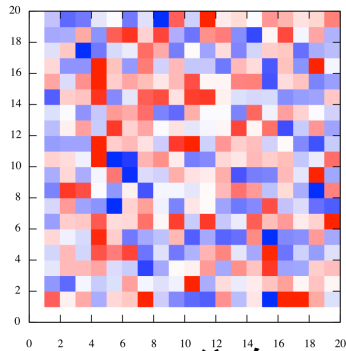
$N_x \times N_y$ 個



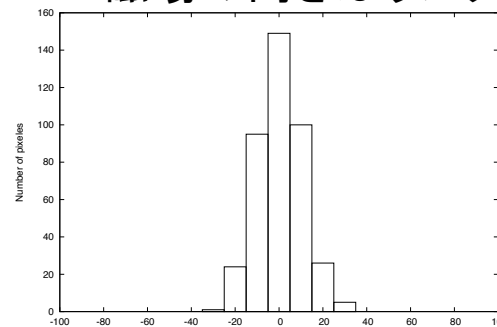
各セルの n_e 、 B は一定
磁場の向きはランダム



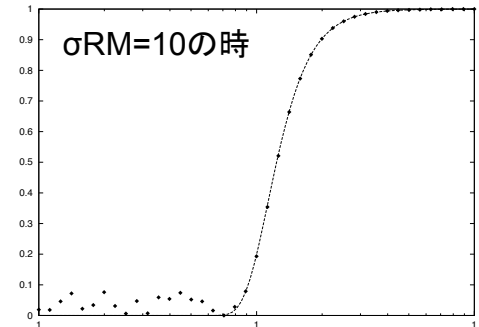
初期偏波角0度



RM分布



RM頻度分布

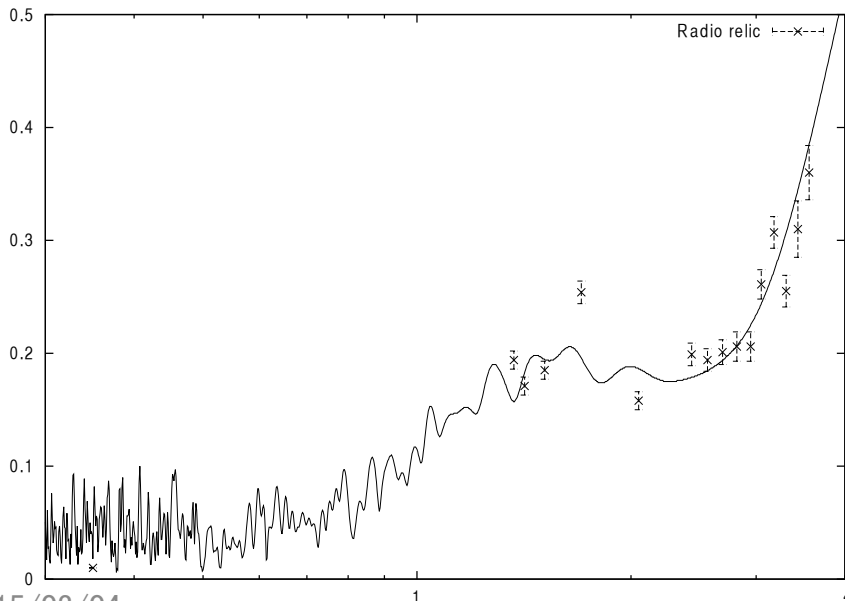
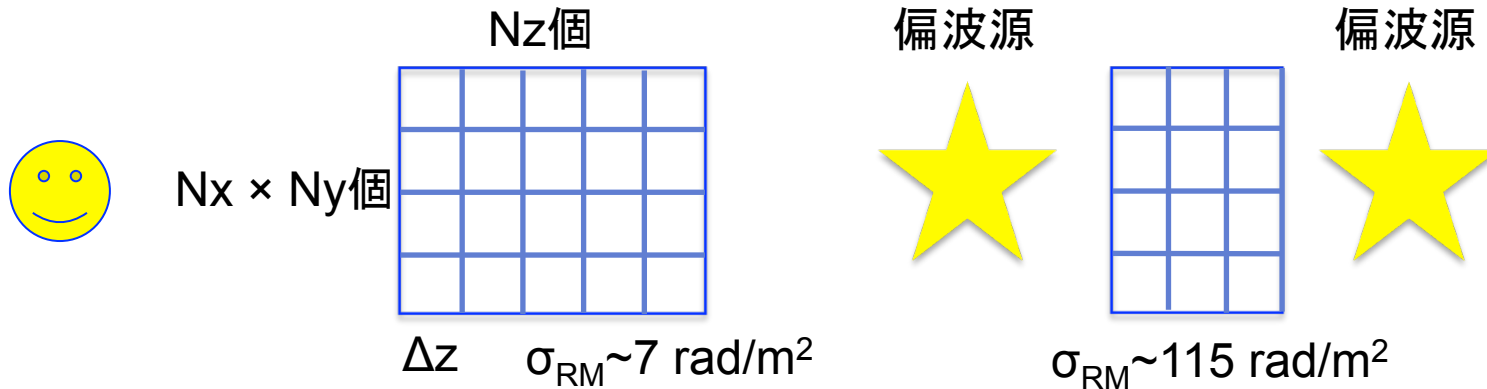


点:モデル 点線:解析的式

$\sigma_{RM}=10$ の時

議論1 電波レリックの偏波率

❖ 視線上に2つのスクリーンと2つの偏波源を配置



- ❖ 階段状の偏波解消は手前側のスクリーンのRMの分散が奥側の分散より小さい場合のみ見られる
- ❖ 視線方向上に2成分有り、手前側が銀河団磁場(か銀河系)、奥側がレリック?
- ❖ 電波レリックが偏波解消を起こしているならば、スクリーン内部で放射を行うモデルのほうが適切

議論1 電波レリックスの偏波率

❖ ファラードモグラフィ: RMの視線上の分布を得る

直線偏波強度

$$P(\lambda^2) = \int \epsilon(r) e^{2i\chi(r, \lambda^2)} dr$$

ϵ : 放射率 χ : 偏波角

$$\chi(r, \lambda^2) = \chi_0(r) + \phi(r)\lambda^2$$

$\Phi(r)$: 位置rまでのRM

積分変数をrから $\Phi(r)$ へ変換

$$P(\lambda^2) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\phi) e^{2i\phi\lambda^2} d\phi$$

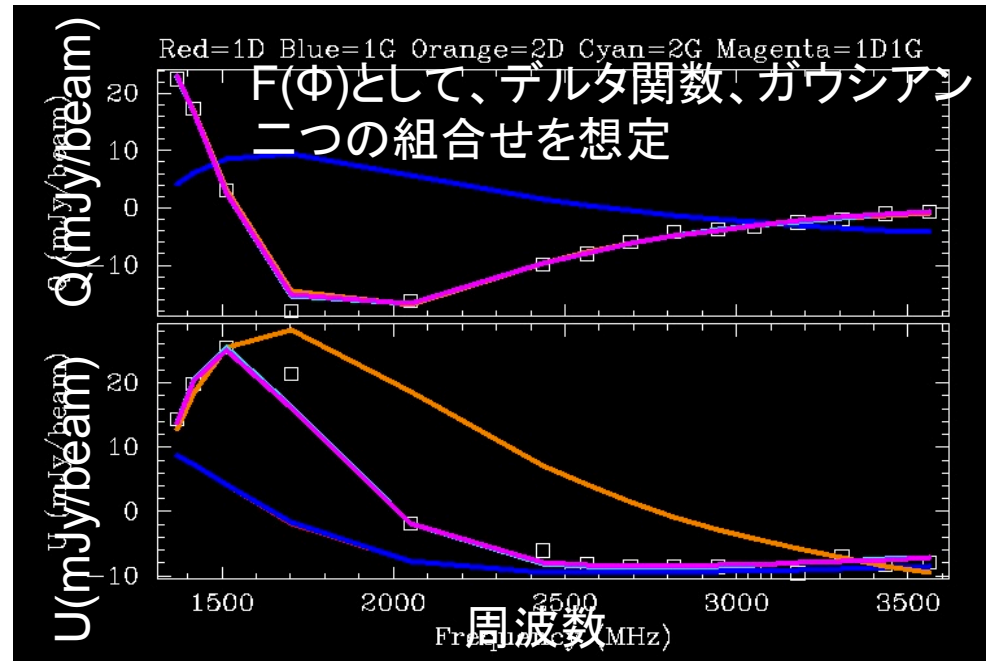
$$F(\phi) \equiv \epsilon(\phi) e^{2i\chi_0(\phi)}$$

$F(\Phi)$: ファラード分散関数、 Φ 空間での偏波強度分布

逆変換すると

$$F(\phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda^2) e^{2i\phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (\text{Burn 1966})$$

観測した偏波強度 $P(\lambda^2)$ から $F(\Phi)$ を推定できる



❖ 1成分では観測を再現できない

議論 銀河団の磁場強度

❖ 磁場強度が一定、単一の相関長 Λ_B 、向きがランダムな磁場

$$\sigma_{\text{RM}}^2 = \langle \text{RM}^2 \rangle = 812^2 \Lambda_B \int_0^L (n_e B_{\parallel})^2 dl. \quad \text{RMの分散は平均0の正規分布}$$

- β モデル(等温等圧電子分布モデル)を仮定すると

$$\sigma_{\text{RM}}(r) = \frac{KBn_0r_c^{1/2}\Lambda_B^{1/2}}{(1+r^2/r_c^2)^{(6\beta-1)/4}} \sqrt{\frac{\Gamma(3\beta-0.5)}{\Gamma(3\beta)}} \quad \text{RMの分散は}n_0, B, \sqrt{r_c}, \sqrt{\Lambda_B}\text{に依存}$$

- $\Lambda_B=5-20$ kpcと仮定して Abell 2256, Abell 401 ,Abell 2199の磁場強度は
(不規則) (規則) (クールコア)

不規則	規則	クールコア
A2256	A401	A2199
0.1 - 1.1 μG	1.6 - 3.8 μG	2.6 - 5.1 μG

- ❖ 3天体だが、乱流による磁場増幅を示す結果となった
- ❖ サンプル数を増やす必要あり

❖ JVLAの2-4GHz, 8-10GHzでAbell 2256を観測、リダクションと解析を行った

- S帯2GHz以上でフラックスの低下をみつけた
 - 最大角度スケールが原因？
- 電波レリックと銀河団内偏波源の偏波率、RMを求めた
 - 電波レリックは3GHzまでは20%程度の偏波率を持つが、3GHz以上では偏波率が上昇する
 - 偏波解消モデルの作成とファラデーモグラフィを行った結果、電波レリックの視線上には2成分の磁化プラズマが存在する
 - RMの分散からAbell 2256の磁場強度を0.1-1.1 μ Gと見積もった。規則銀河団Abell 401, 冷却コア銀河団Abell 2199よりも磁場強度が小さいことから、乱流によって磁場が増幅されている可能性がある