



宇宙電波懇談会シンポジウム2013@国立天文台三鷹

# ファラデートモグラフィー： 広帯域電波観測による新たな宇宙磁場観測法

日本SKAコンソーシアム「宇宙磁場」科学検討班  
// 「トモグラフィー」技術検討班

出口真輔(熊本大)、高橋慶太郎(熊本大)、赤堀卓也(シドニー大)、  
倉山智春(帝京科学大)、熊崎亘平(名古屋大)、田代雄一(熊本大)

# アウトライン

- イントロダクション
  - 宇宙磁場の観測
- トモグラフィー班の活動報告
  - 銀河間磁場の観測可能性
  - 銀河磁場の複雑さ
  - ASKAPへの貢献
  - LOFARへの貢献
- まとめ

# イントロ：Faraday rotation

偏波が磁化したプラズマを伝播するときに  
その偏波面が回転

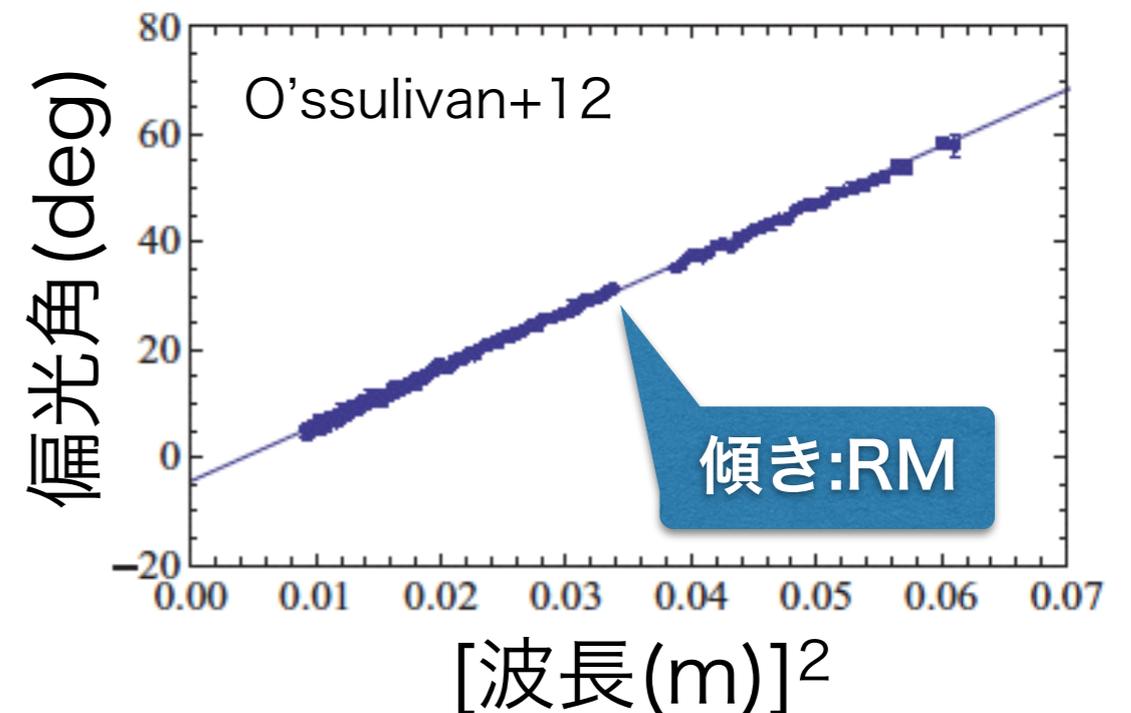
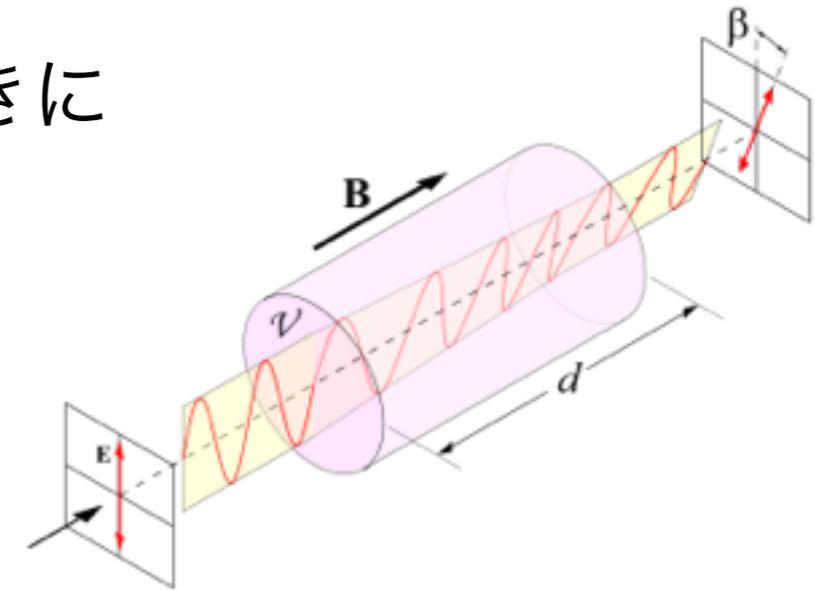
回転角

$$\chi = RM \lambda^2 + \chi_0$$

偏光角 - 波長<sup>2</sup> プロットの傾きに  
磁場の情報

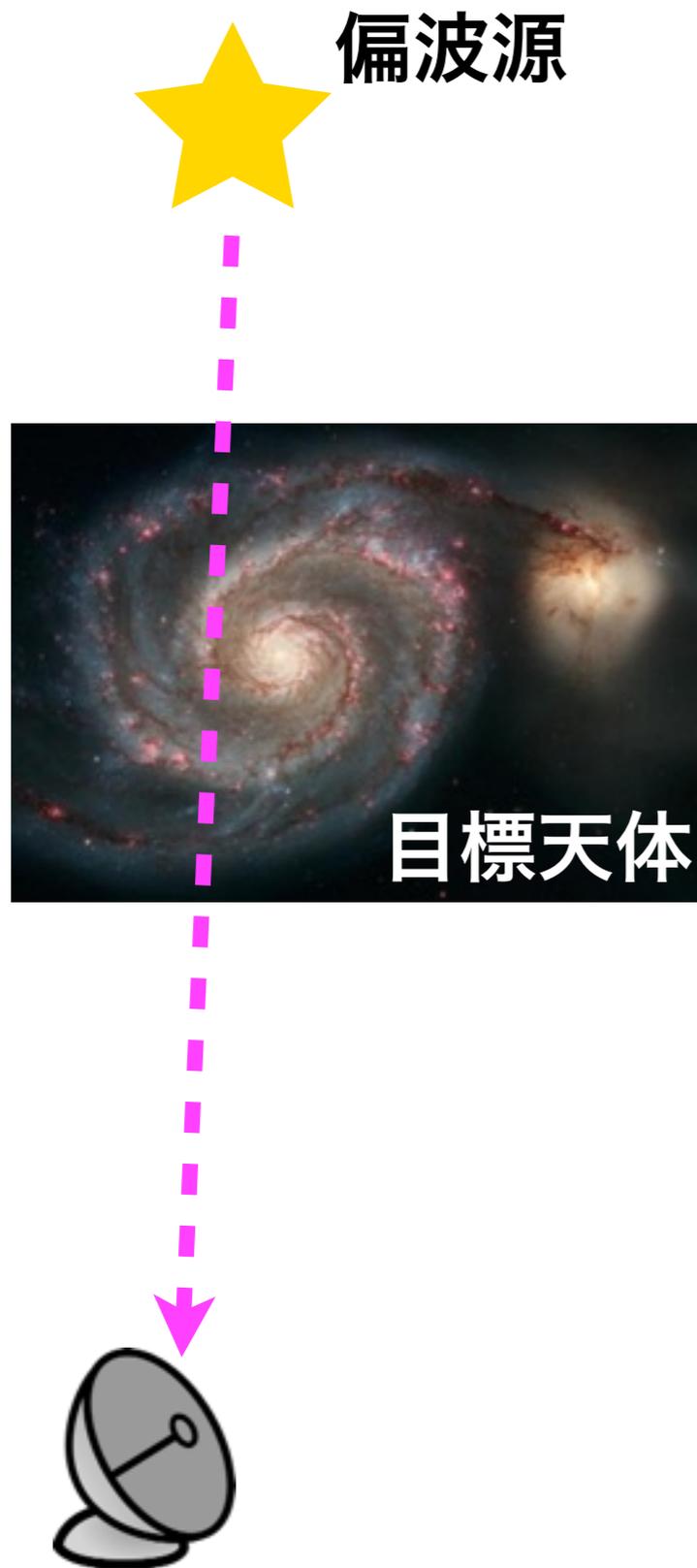
Rotation Measure

$$RM = K \int n_e \mathbf{B}_{\parallel} dl$$

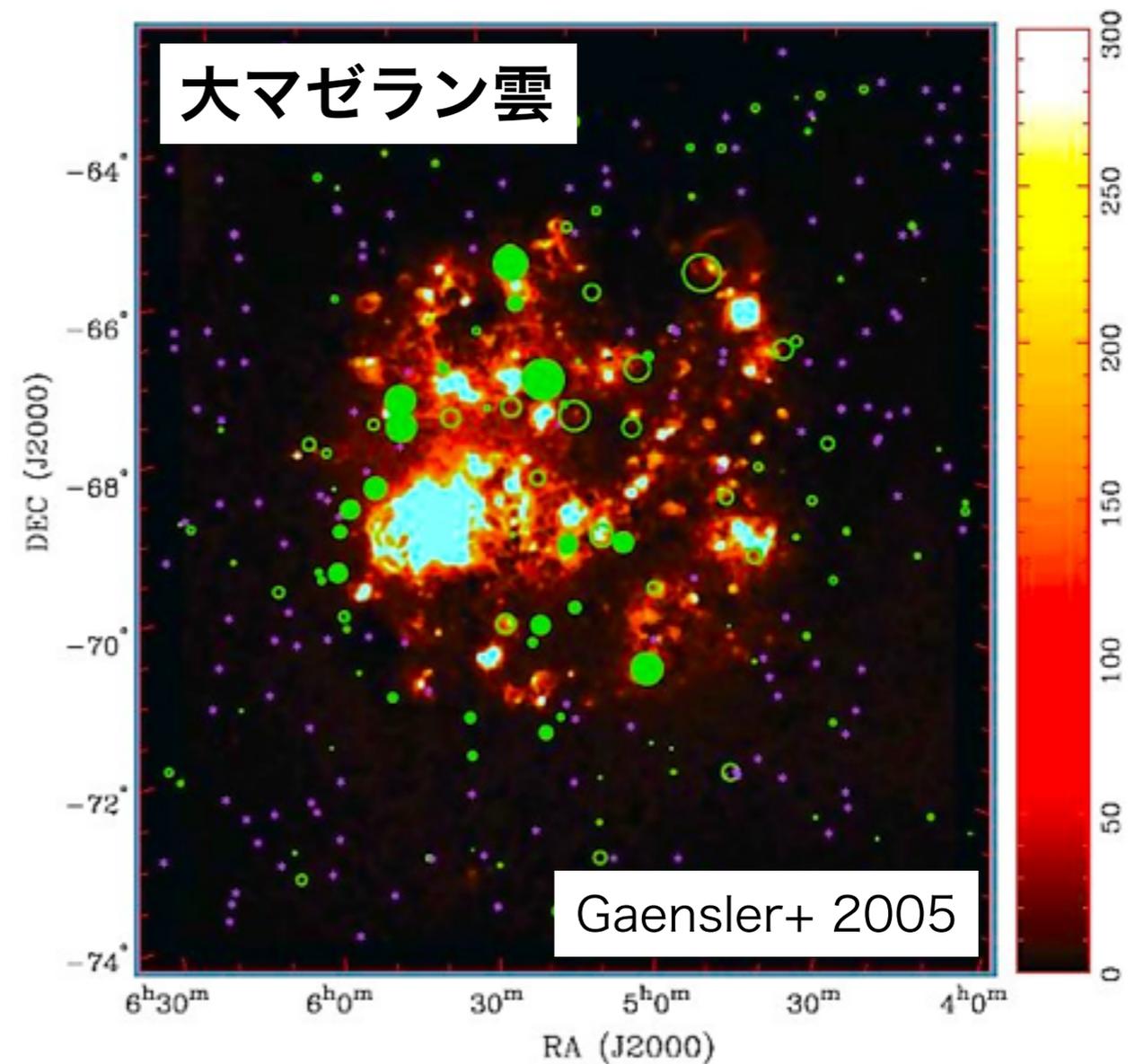


視線方向に積分された磁場の情報

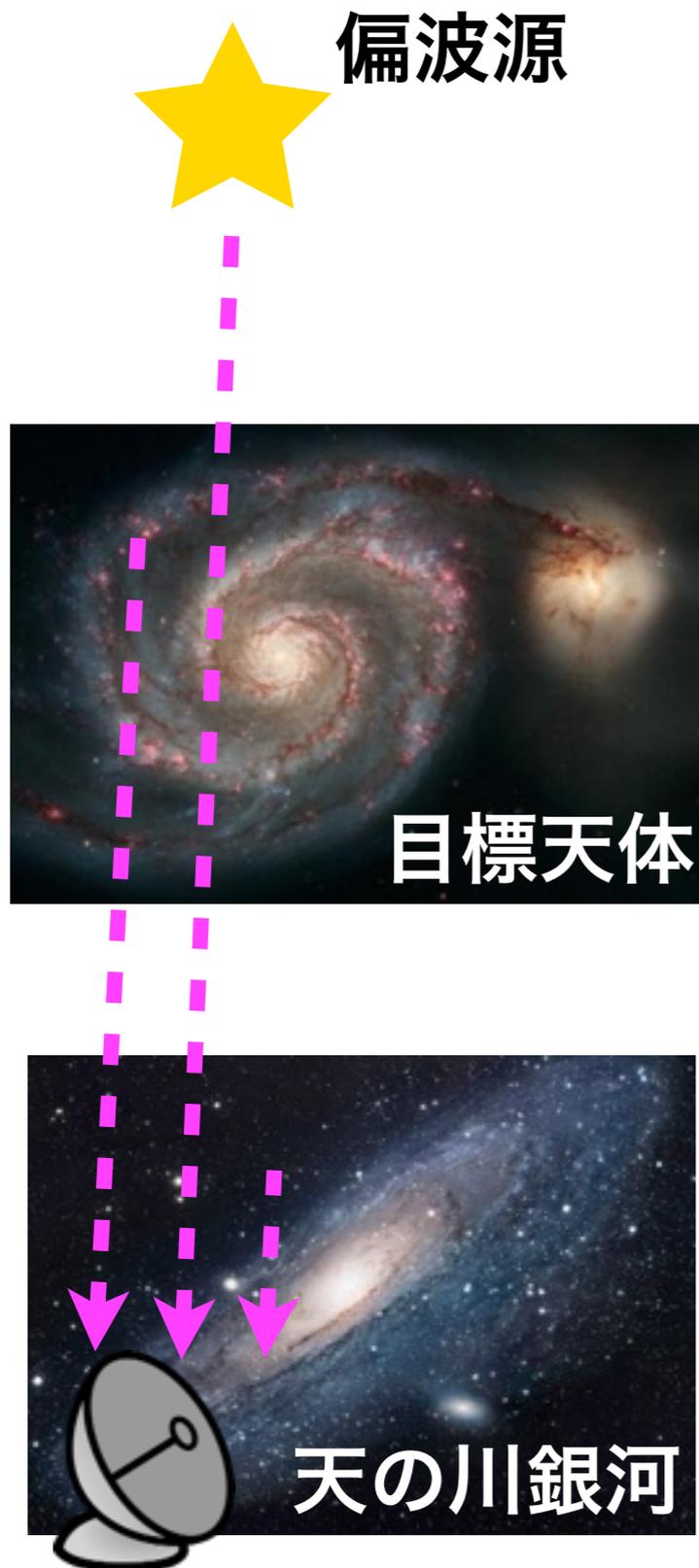
# イントロ：Faraday rotation



目標天体の背景にある偏波源を  
観測することで磁場を測定

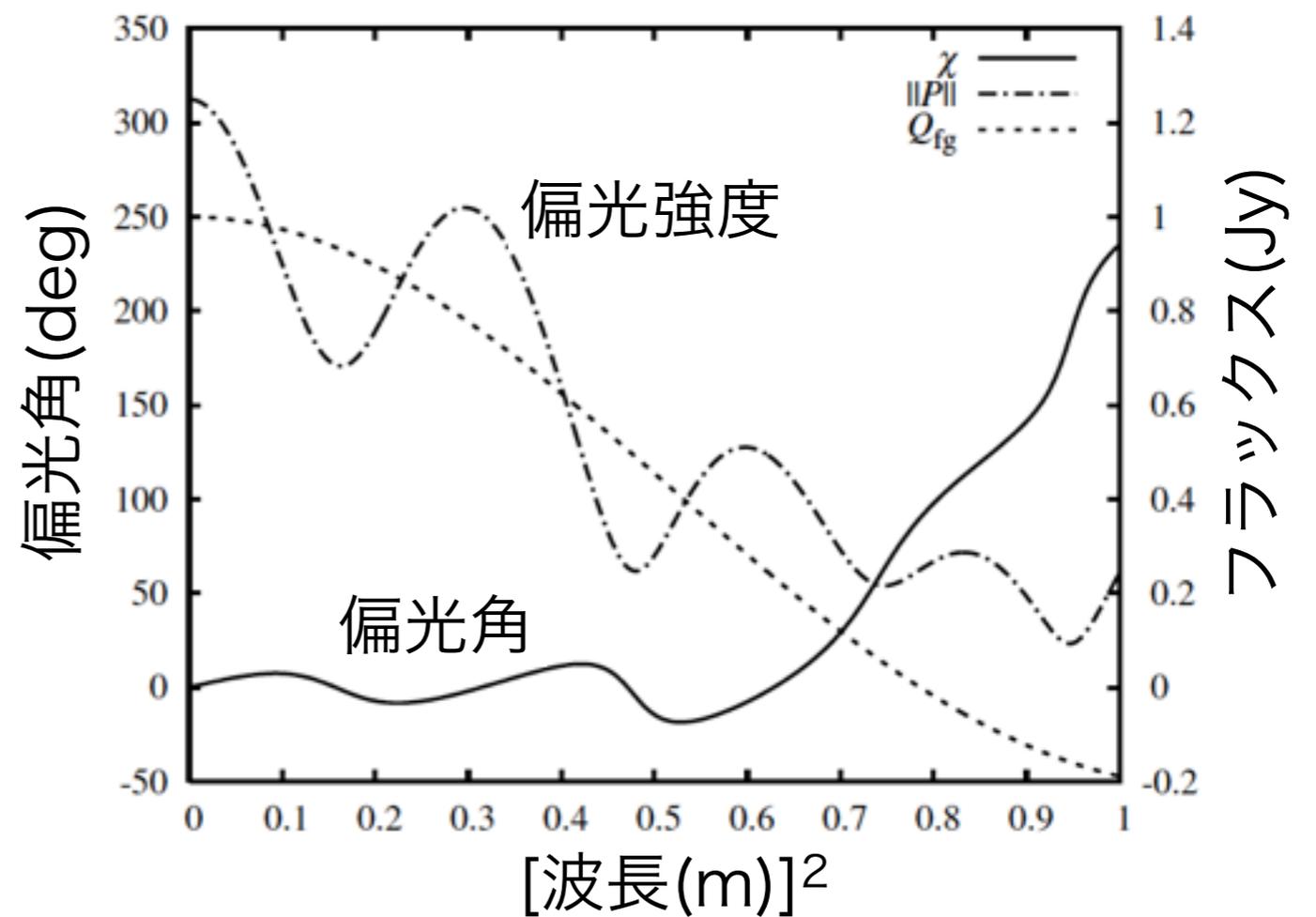


# イントロ：Faraday rotationの問題点



実際はより複雑

- 目標天体の放射
- 天の川銀河の放射、磁場



Brentjen&de Bryun (2005)

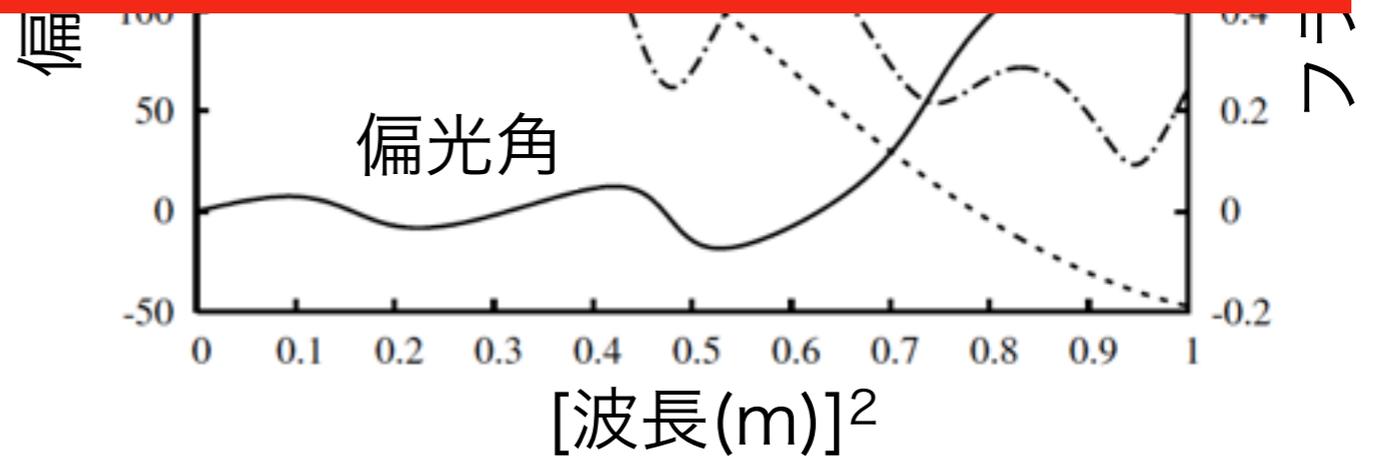
# イントロ：Faraday rotationの問題点



実際はより複雑

- 目標天体の放射
- 天の川銀河の放射、磁場

## ファラデートモグラフィ の出番！



Brentjen&de Bryun (2005)

# イントロ：ファラデートモグラフィ

## 偏波の観測量

観測される偏波強度は  
視線上の全偏波源の積分

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

Q,U: ストークスパラメータ

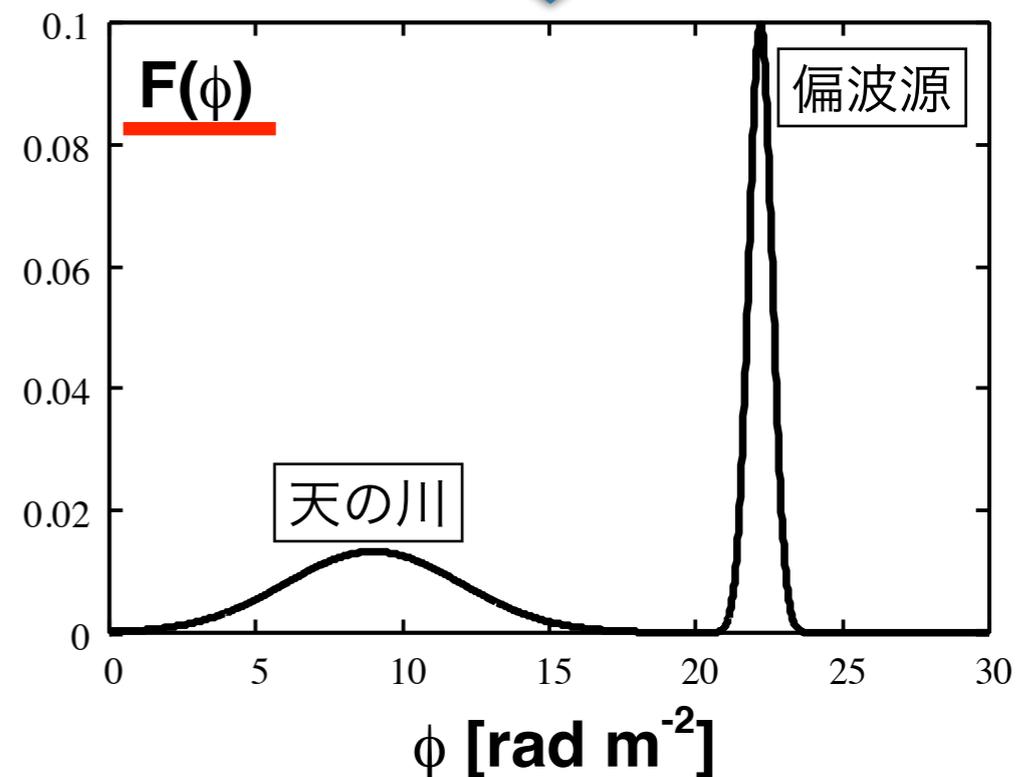
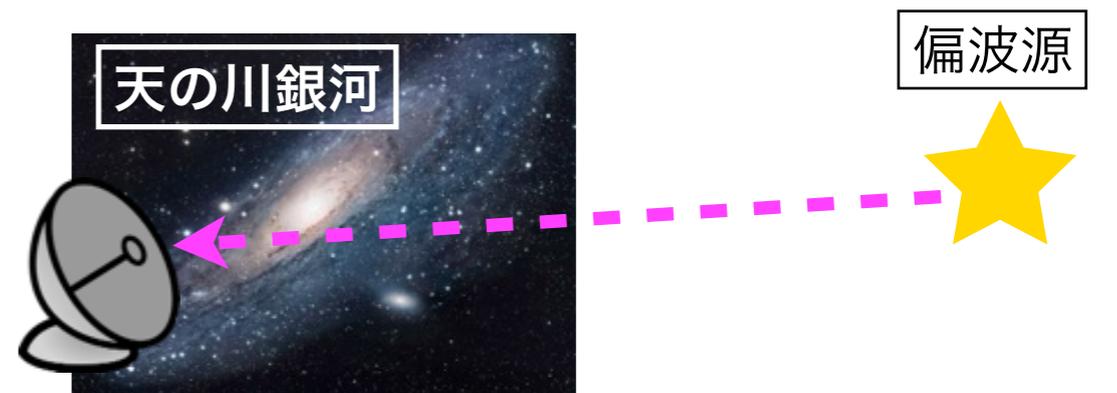
F(φ): FDF (Faraday dispersion function) ⇒ 偏波源分布

φ: Faraday depth ⇒ ~磁場で測った距離

$$\phi(x) = 0.81 \int_x^0 n_e(x') B_{\parallel}(x') dx'$$

ファラデー回転：磁場の視線方向積分

ファラデートモグラフィ：磁場と偏波源の視線方向分布



# イントロ：観測量 $P(\lambda^2)$ からFDFを知る方法

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

① Faraday RM synthesis (Burn 1966; Brentjen & de Bryun 2005)

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

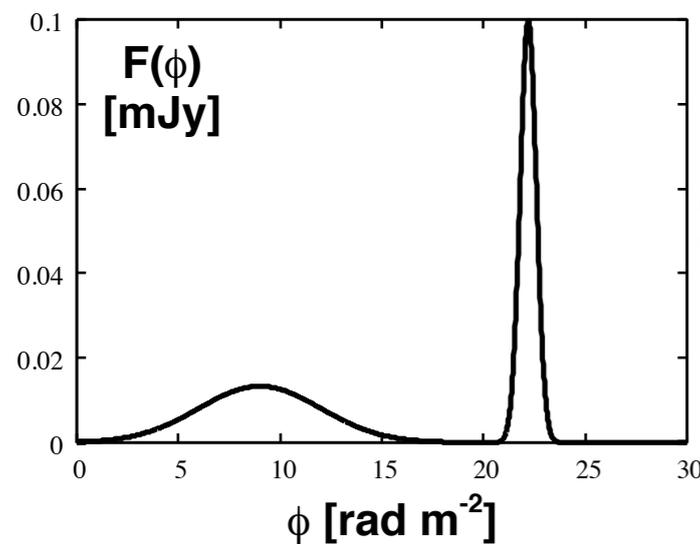
逆変換

② QU-fitting

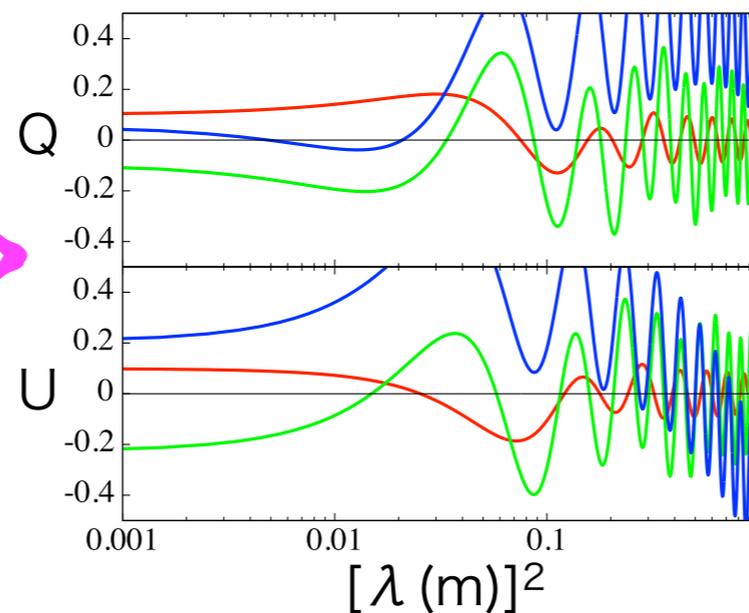
Burn (1966); Brentjen & de Bryun (2005)

モデルFDFを与え $P(\lambda^2)$ に変換し、観測量とfitting

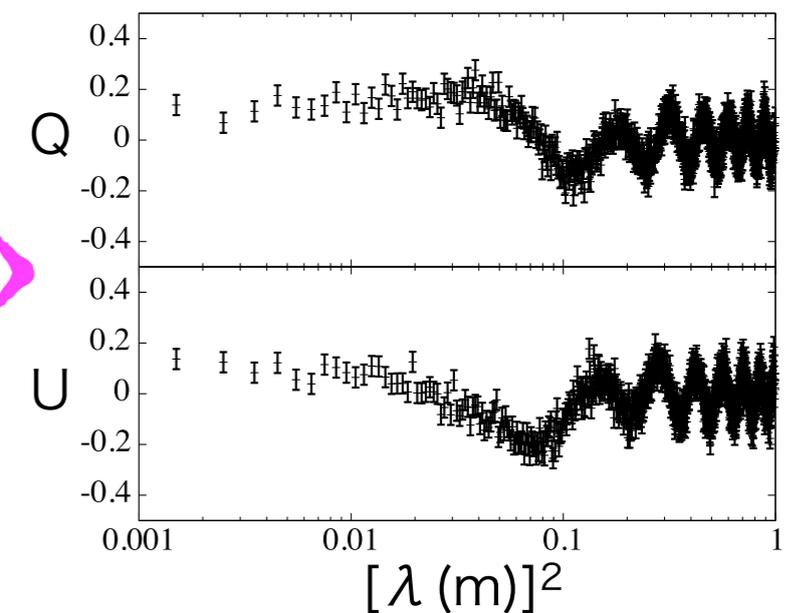
モデルFDF



モデルQ&U



観測量Q&U



# イントロ：広帯域観測の重要性

Faraday tomography

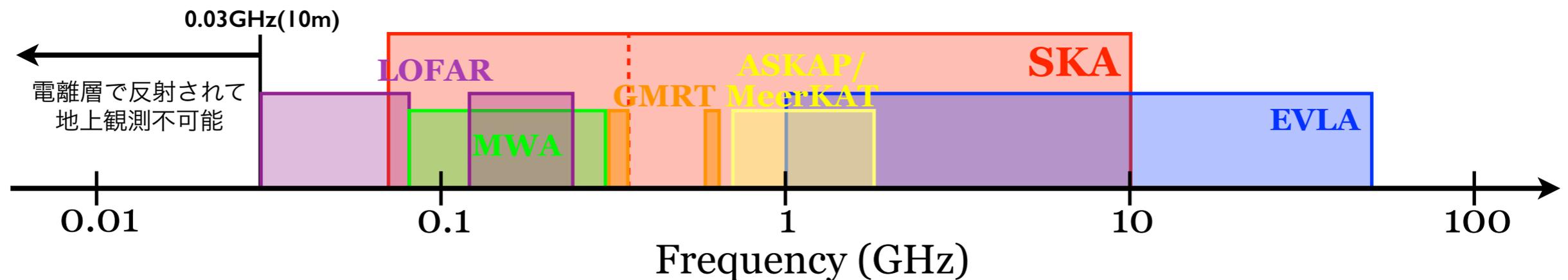
$$F(\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$

積分範囲 = 観測帯域

QU-fitting

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

広帯域の観測が必要 ⇒ SKA, pathfinder



# イントロ：ファラデーモグラフィの適用

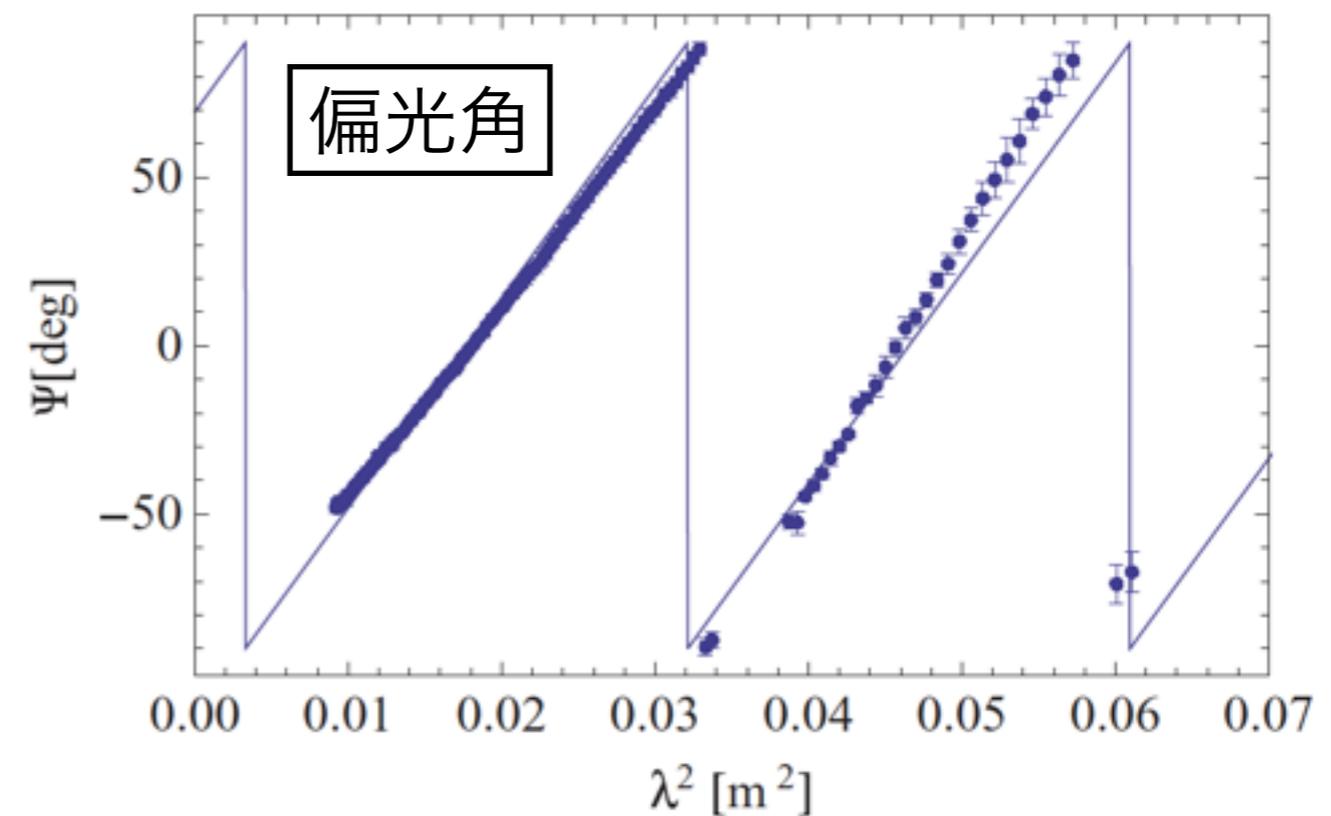
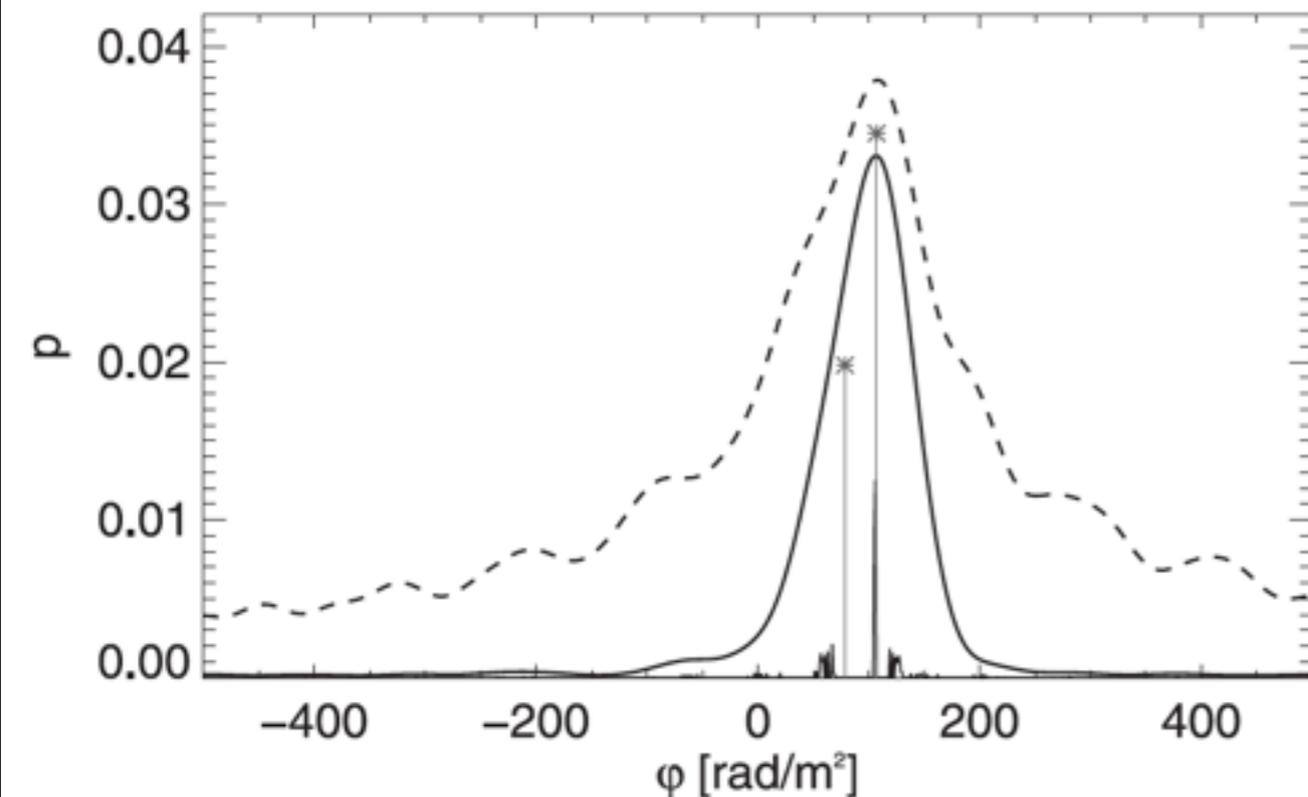
O' Sullivan+ (2012)

4つの電波源をATCAで観測し、ファラデーモグラフィを行った

- ・観測帯域：1.1-3.1GHz
- ・4つとも電波イメージでは分解できない電波源

PKS B1610-771

ソース1つでfitting



# イントロ：ファラデーモグラフィの適用

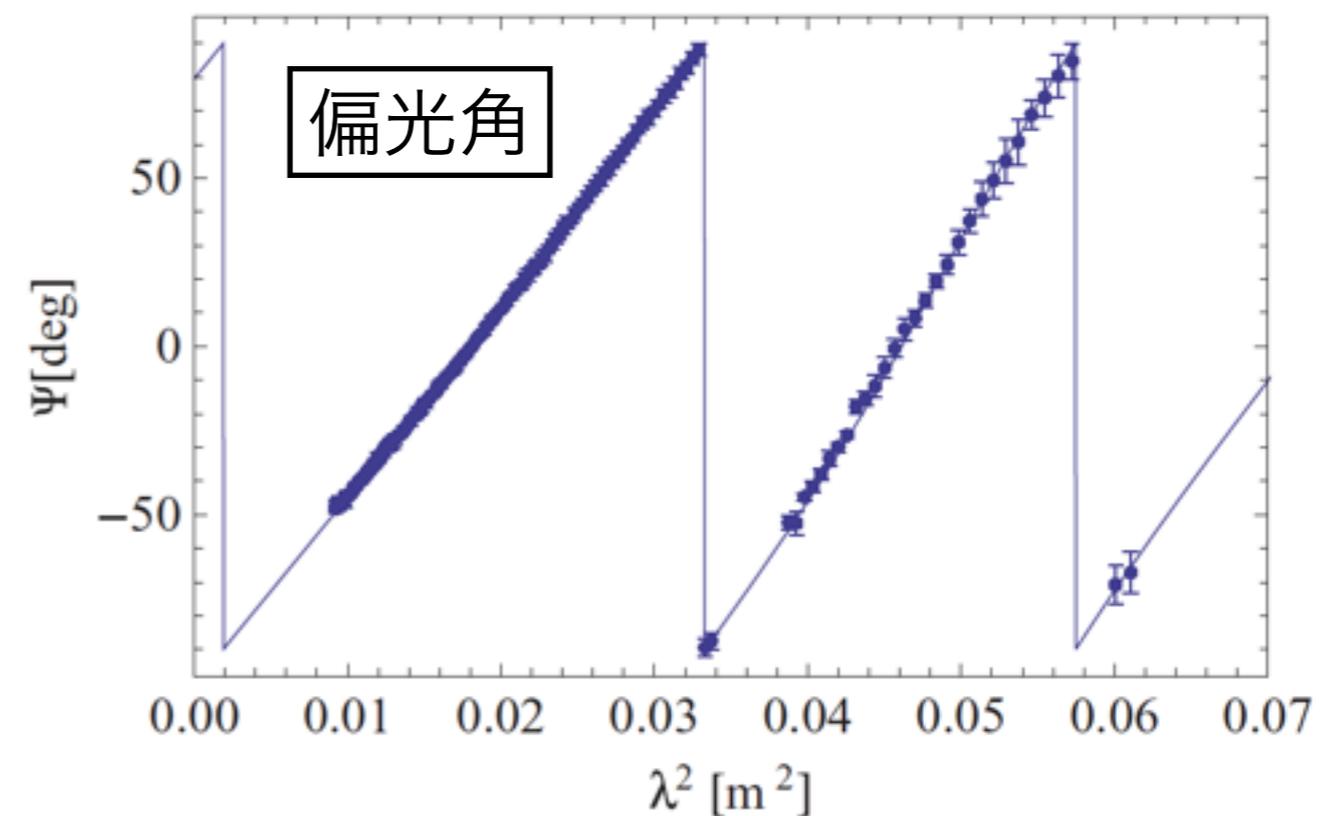
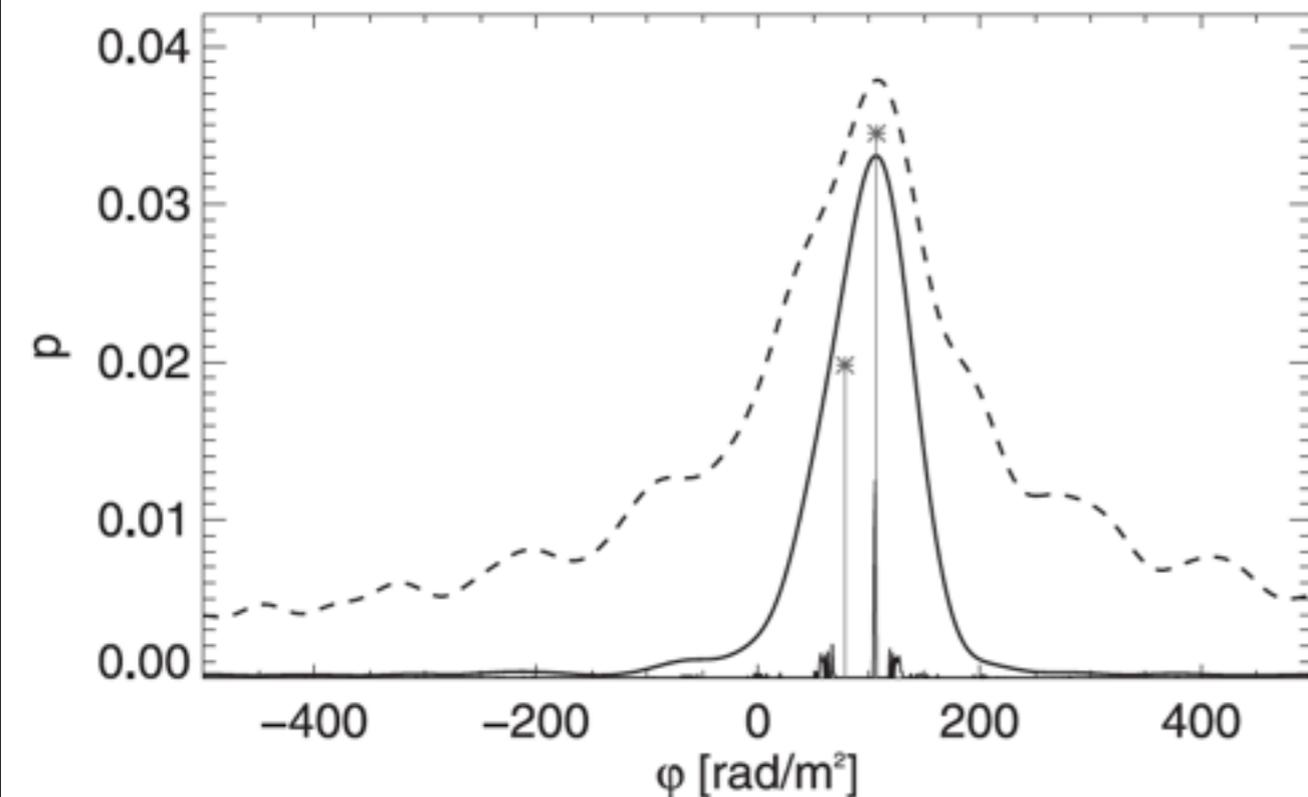
O' Sullivan+ (2012)

4つの電波源をATCAで観測し、ファラデーモグラフィを行った

- ・ 観測帯域：1.1-3.1GHz
- ・ 4つとも電波イメージでは分解できない電波源

PKS B1610-771

ソース2つでfitting



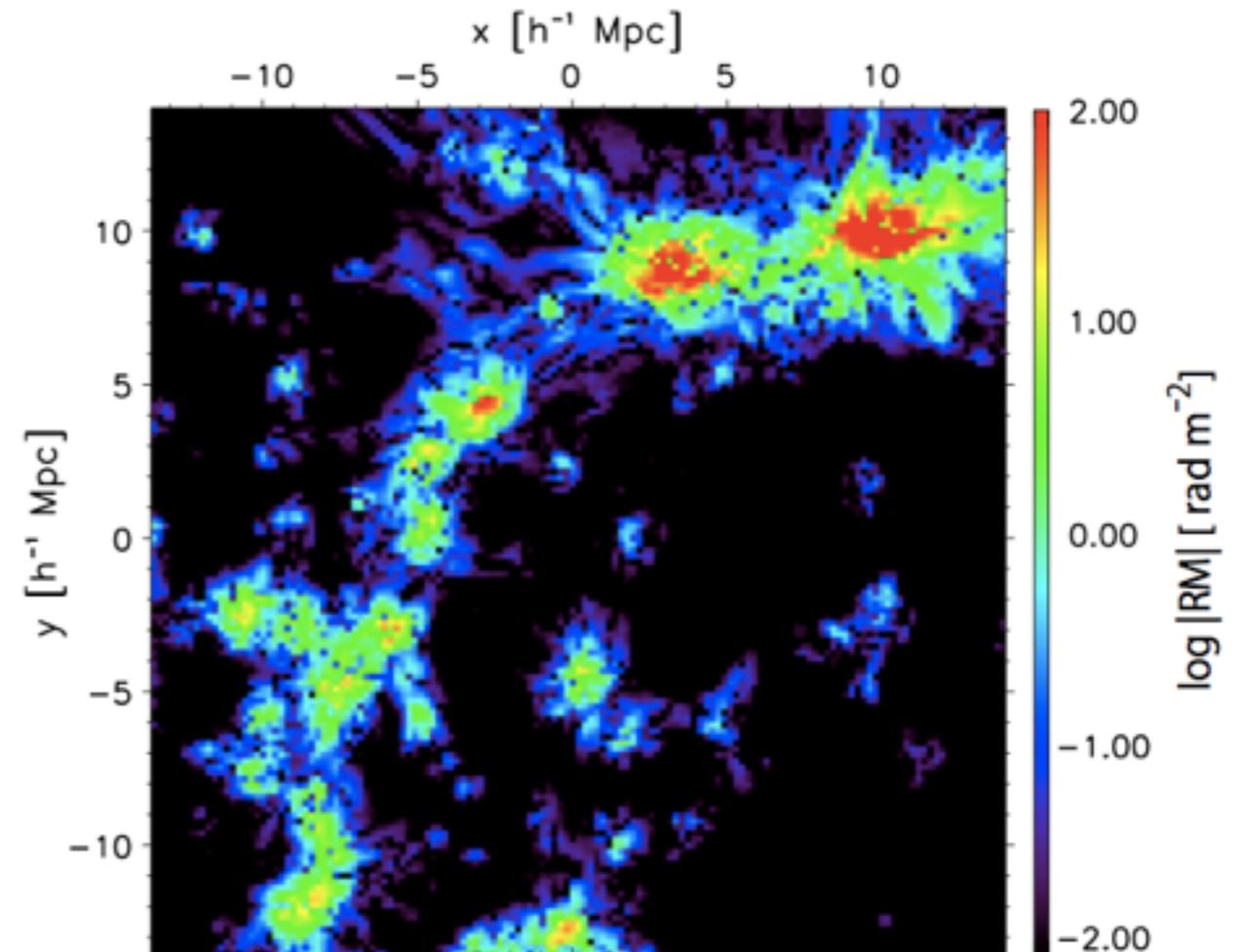
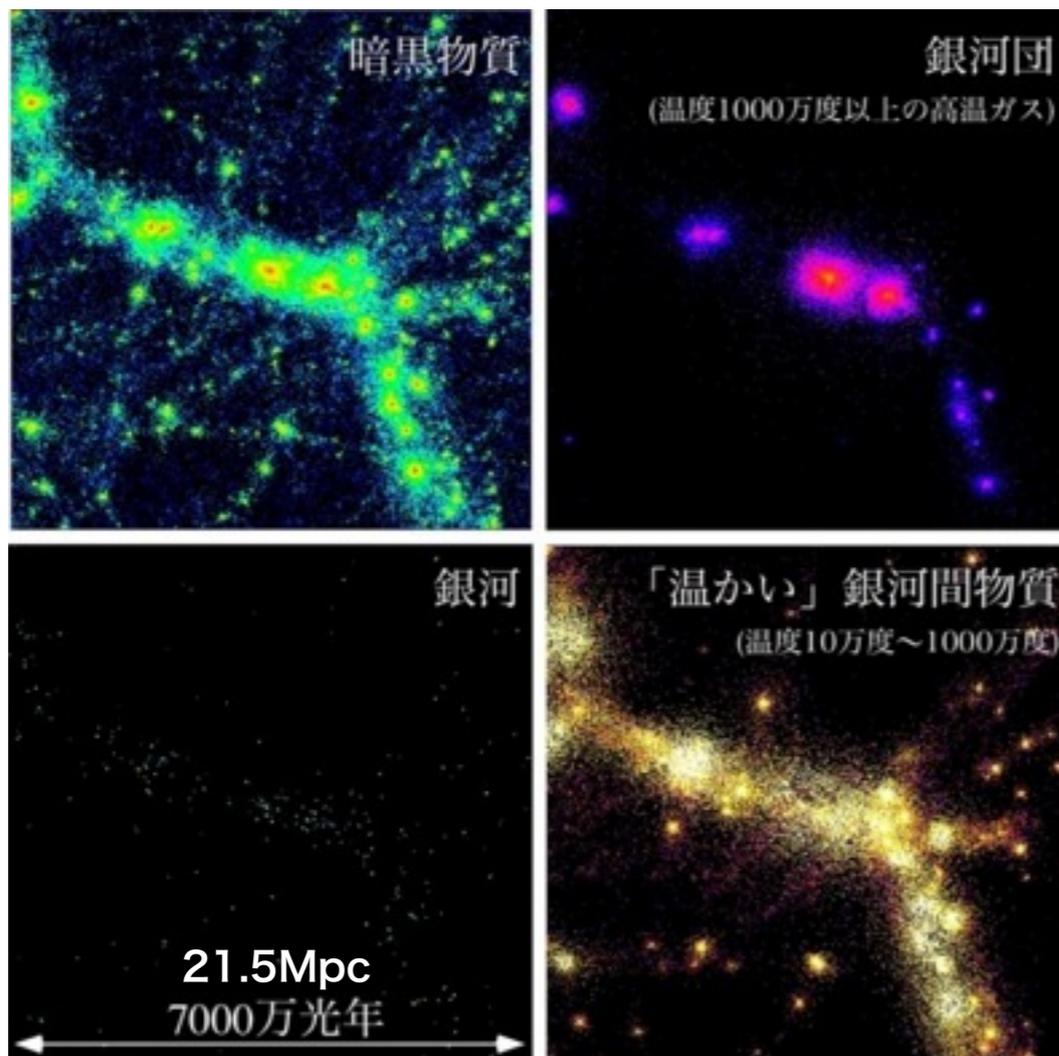
ファラデーモグラフィを使うと  
イメージでは分解できないソースを分解することもできる

# イントロ：銀河間磁場

## 我々のターゲット

大規模構造磁場 [銀河間磁場 (InterGalactic Magnetic field, IGMF)]

- ▶ フィラメントに付随する磁場は未発見
- ▶ 程よく増幅か？ [10-100nG,  $RM = \text{数rad m}^{-2}$ ] (Akahori & Ryu 10;11)
- ▶ どうやったら観測できるか？ 戦略の構築が急務！

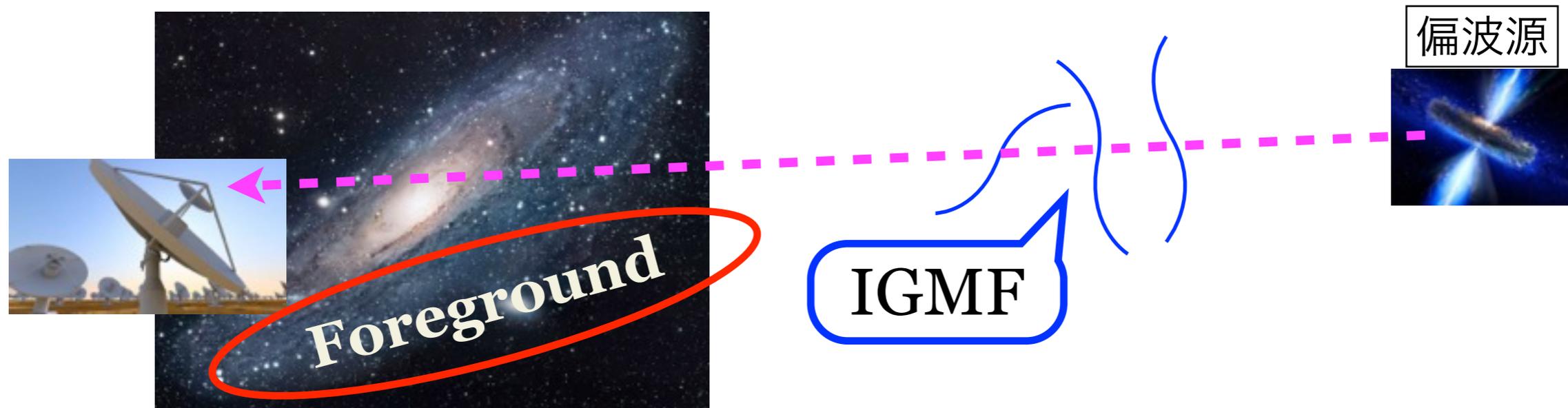


(Akahori & Ryu10;11)

# 活動：QU-fittingによる銀河間磁場の観測可能性

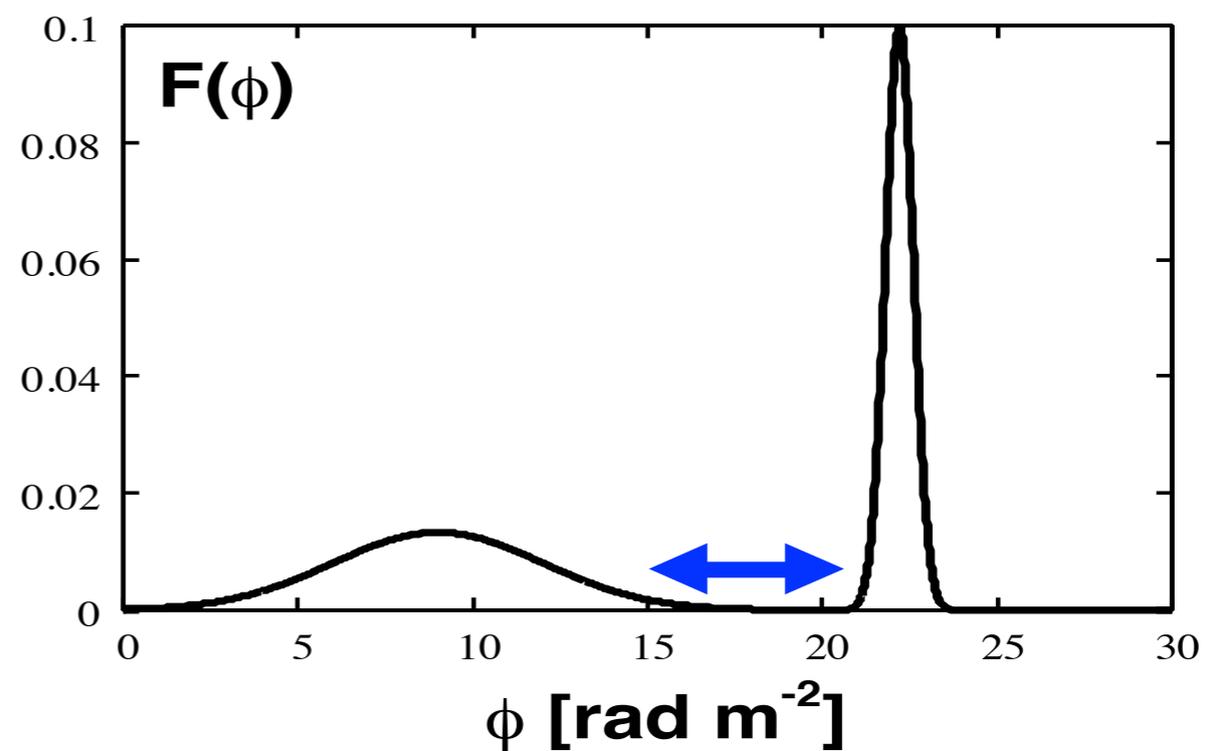
SI, Takahashi, Akahori, Kumazaki, Ryu 2013, PASJ accepted

想定する観測のイメージ (Akahori, Kumazaki, Takahashi, Ryu submitted)



モデルFDF：ガウシアン2つ

- 位置 (Faraday depth,  $\phi$ )
- 幅
- 偏光角
- 明るさ
- IGMFの大きさ

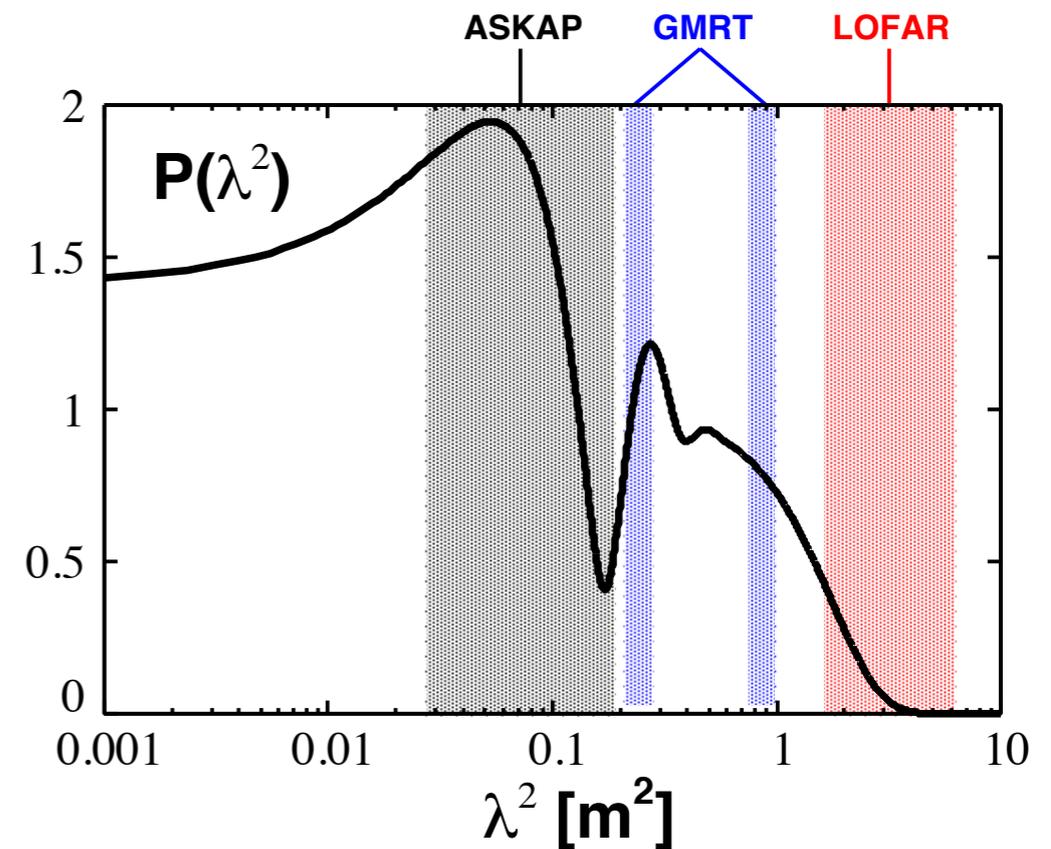
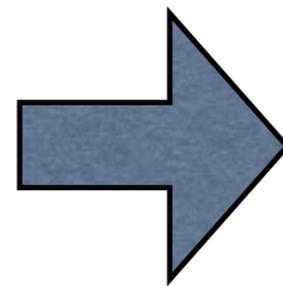
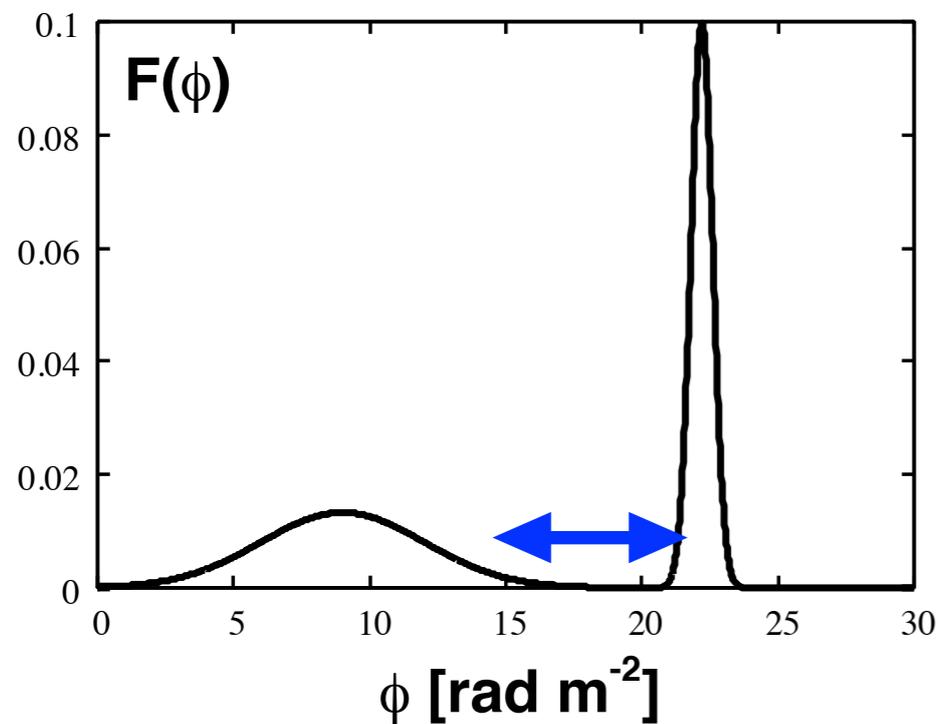


# 活動：QU-fittingによる銀河間磁場の観測可能性

SI, Takahashi, Akahori, Kumazaki, Ryu 2013, PASJ accepted

## 仮定

- 天の川銀河を通してコンパクトな偏波源を観測
- フィラメントのIGMFは数rad/m<sup>2</sup> (Akahori & Ryu10:11)
- 電波望遠鏡ASKAP, GMRT, LOFARの帯域を考慮
- 観測時間は1時間を考慮



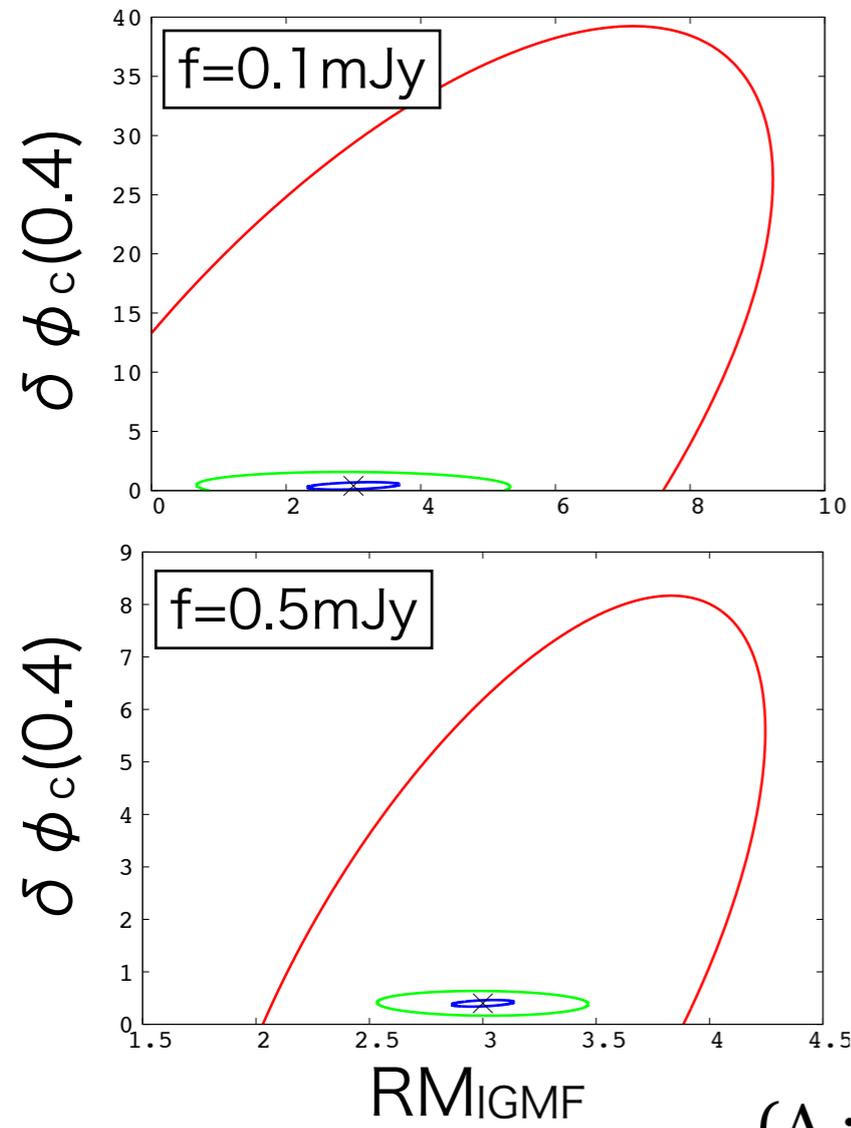
Fisher解析によりモデルパラメータのエラーを見積もることができる

# 活動：QU-fittingによる銀河間磁場の観測可能性

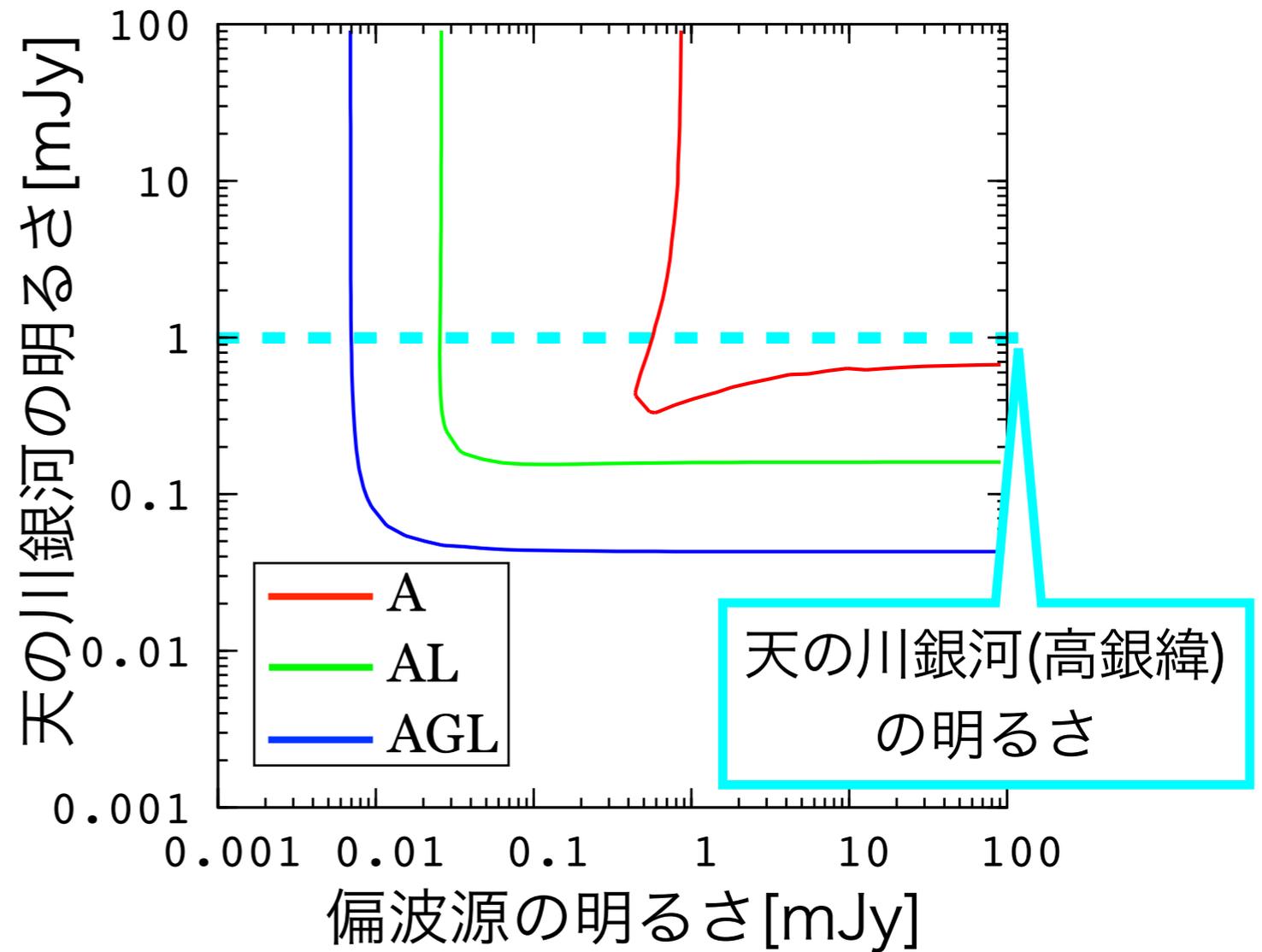
SI, Takahashi, Akahori, Kumazaki, Ryu 2013, PASJ accepted

$$RM_{IGMF} = 3.0 \text{ rad m}^{-2}$$

パラメータエラーの  
Confidence region ( $1\sigma$ )



IGMFを検出するのに必要な明るさ ( $3\sigma$ )  
線より右上の領域の明るさであれば検出可能

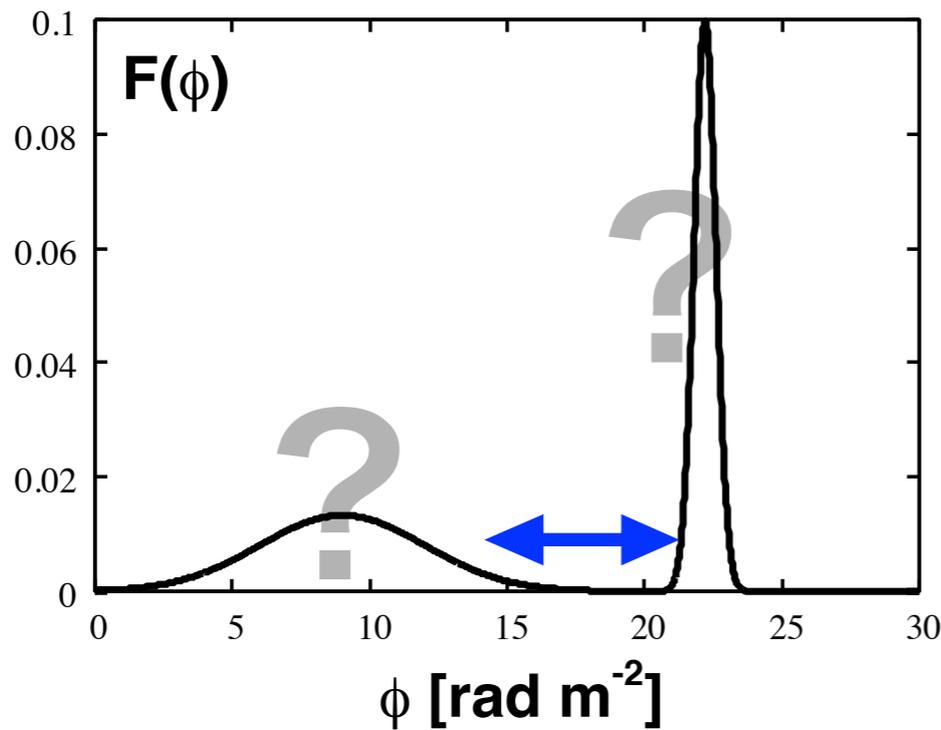


天の川銀河(高銀緯)  
の明るさ

(A : ASKAP, G : GMRT, L : LOFAR)

**RM~3rad/m<sup>2</sup>のIGMFは試験機でも検出できる**

# 活動：銀河磁場の複雑さ

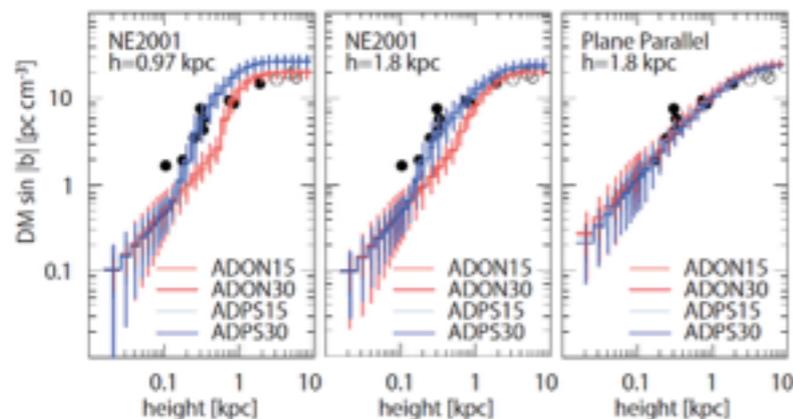


- 銀河間磁場の観測のためには銀河の理解が必要不可欠。
- 実際の銀河のFDFの形は？

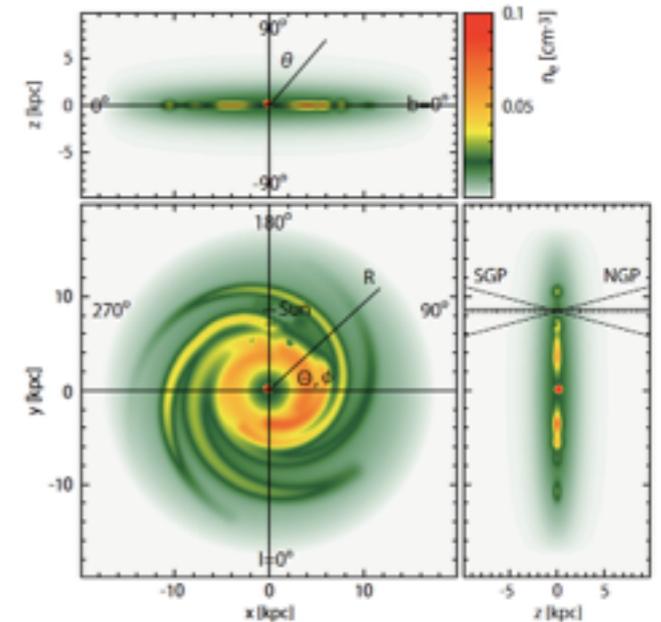
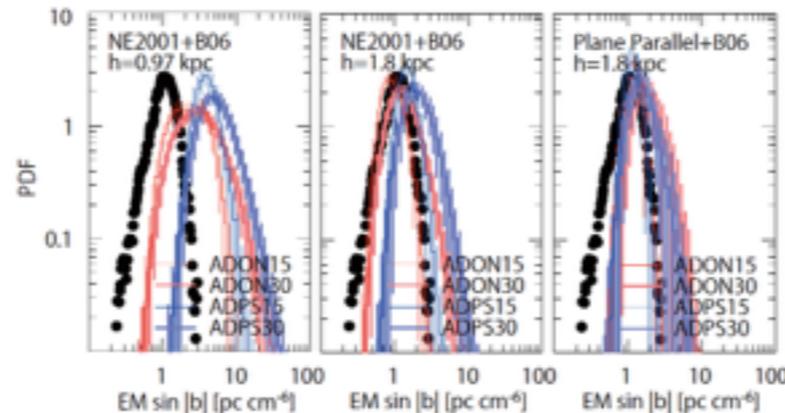
## 銀河モデル(Akahori+13)

大局的な密度・磁場・宇宙線の分布…観測値に基づく  
 乱流的な密度・磁場…MHD乱流の計算値に基づく

Dispersion Measure



Emission Measure

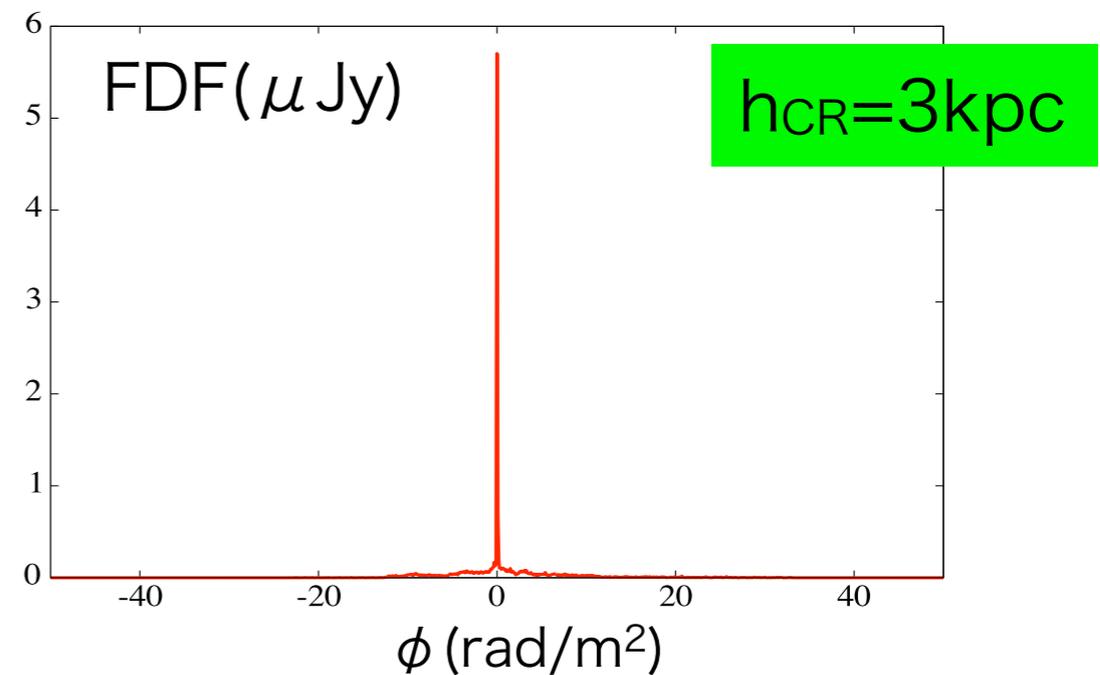
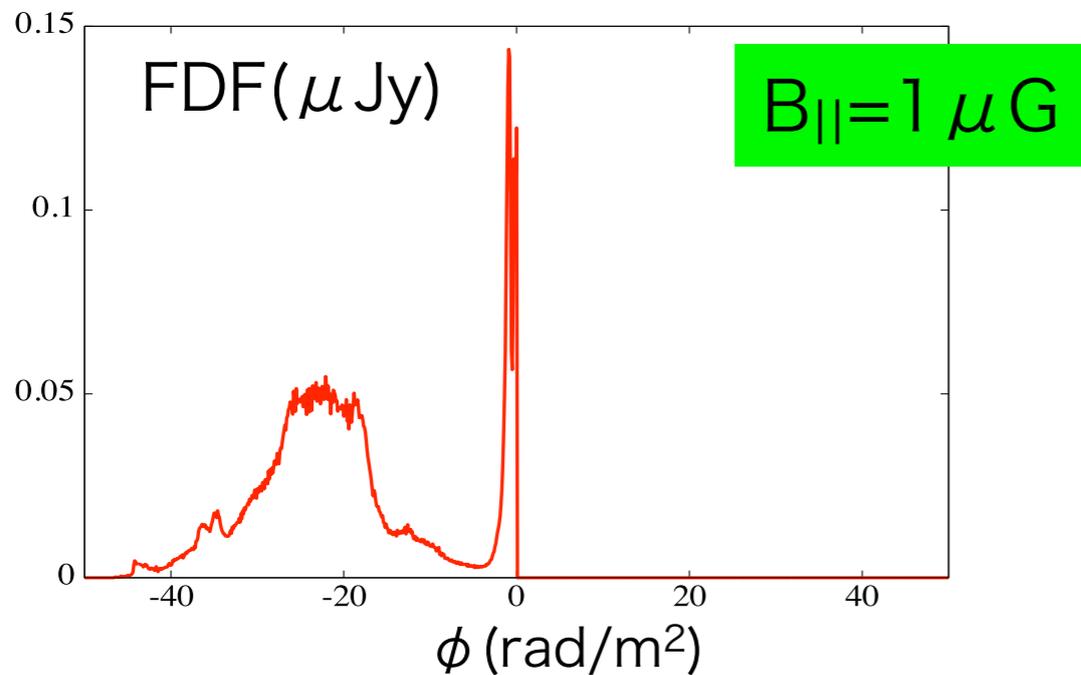
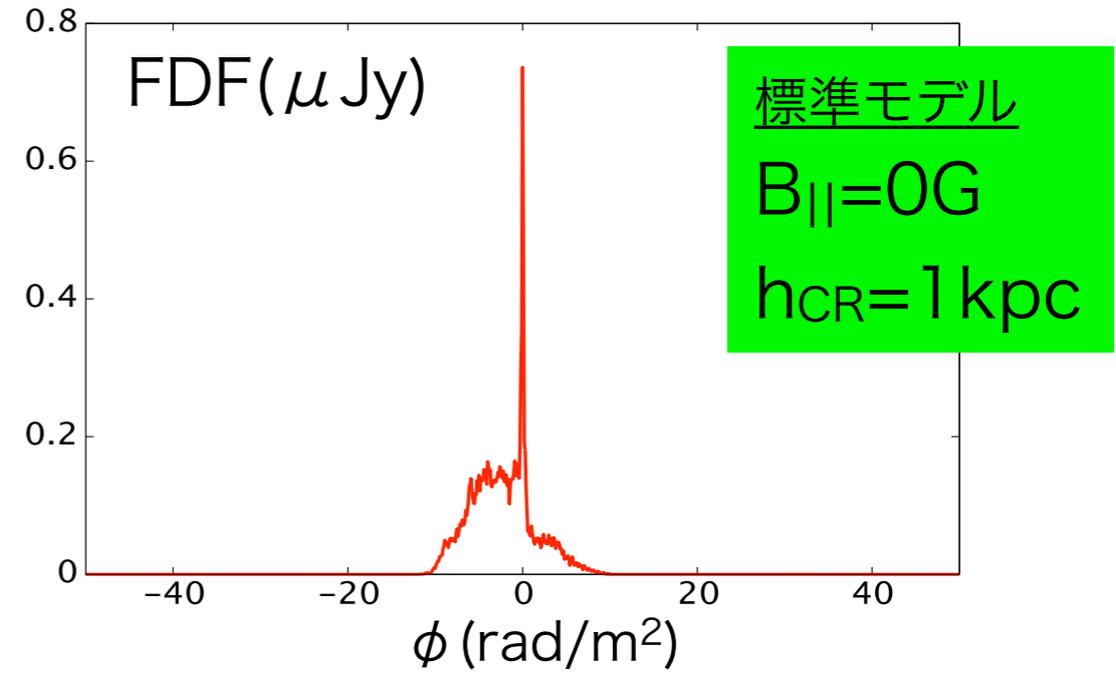


# 活動：銀河磁場の複雑さ

渦巻銀河の500pc×500pcの領域を  
face-onで観測した時のFDF

銀河の特性はFDFに反映される

- 銀河面に垂直な磁場
- 宇宙線電子の分布
- 熱的電子の分布
- 乱流磁場



ファラデーモグラフィにより磁場だけでなく  
熱的電子や宇宙線、乱流の様子を調べることも可能

田代くん  
ポスター

# 活動：ASKAPへの貢献

## ASKAPの初期科学運用の策定に大きく貢献

1- $\sigma$  confidence

ASKAP-12

1 hour

1 mJy source

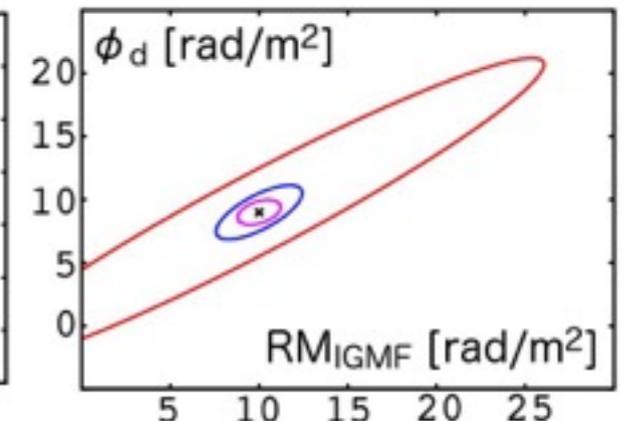
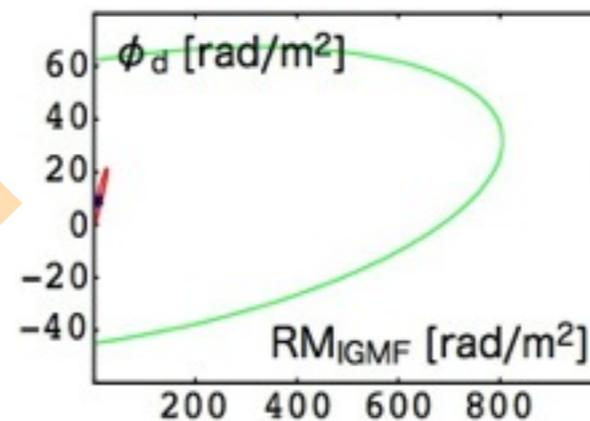
RM<sub>IGMF</sub>=10 rad/m<sup>2</sup>

— 1150-1450MHz

— 700-1000MHz

— (700-1000+1150-1450) MHz

— 700-1800MHz



- POSSUM(ASKAP計画:RM map)ベンチマークテスト参加
  - 2012年9月、2013年11月
- シドニー大に長期滞在、研究交流
  - 2013年2月、2014年2月
- ソフトウェア仮実装
  - このソフトウェアはSKAに自然とつながる

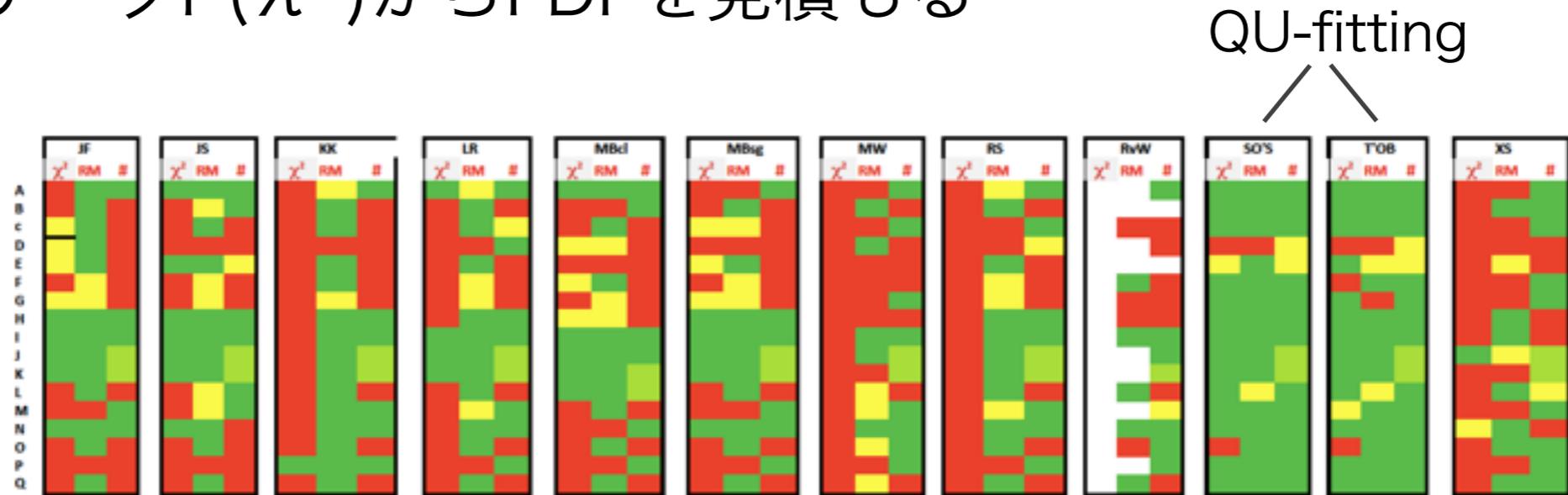


# 活動：ASKAPへの貢献

## POSSUM ベンチマークテスト

模擬観測データ  $P(\lambda^2)$  から FDF を見積もる

緑：良い  
黄：まあまあ  
赤：悪い



|          | tomography | QU-fitting |
|----------|------------|------------|
| 初期モデル    | ○ (必要なし)   | × (必要あり)   |
| FDFの見積もり | △          | ○          |
| エラーの推定   | ×          | ○          |

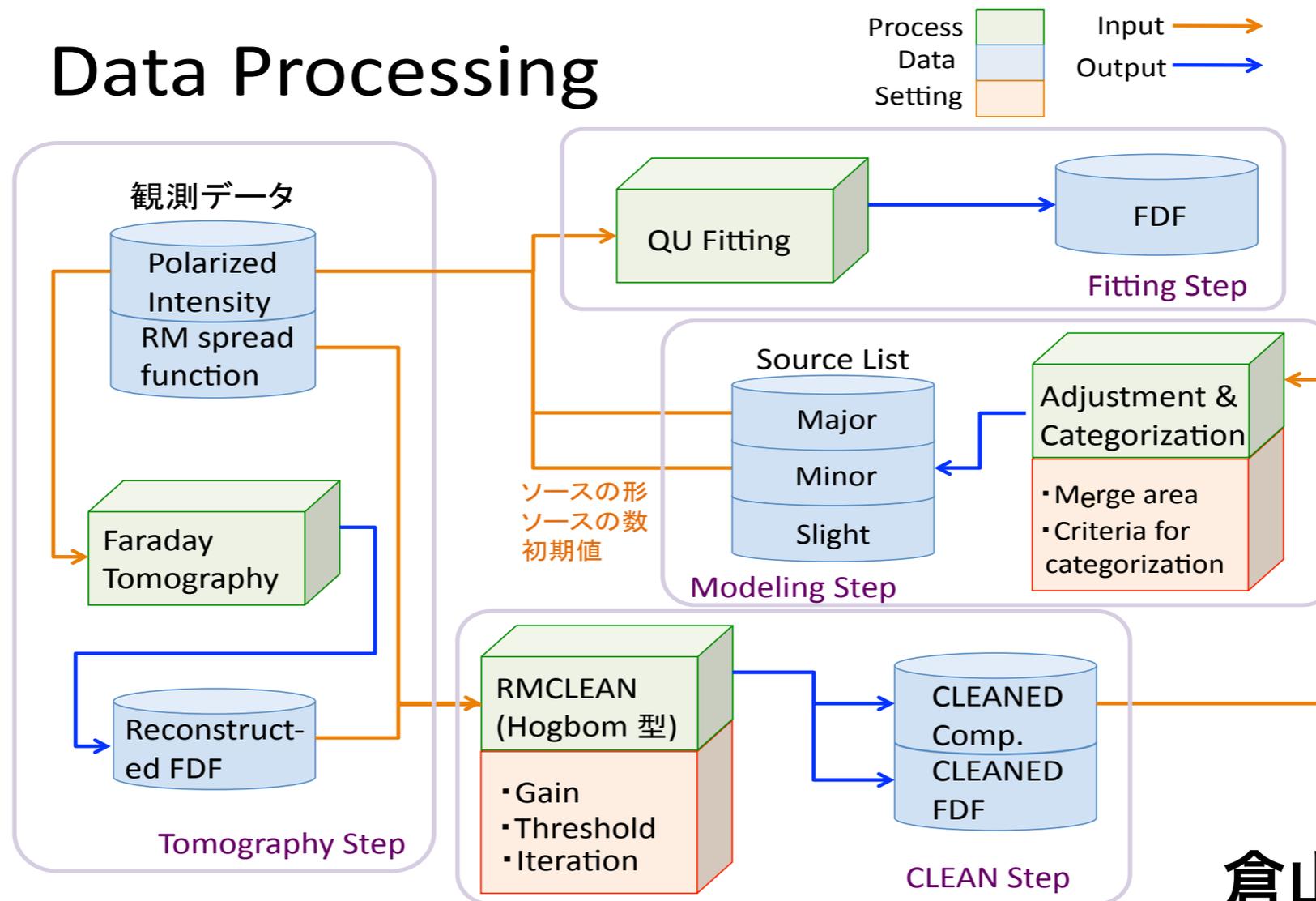
**tomography, QU-fitting 両方の長所を生かす**

# 活動：ASKAPへの貢献

## 偏波解析ソフトウェア開発

- 従来のトモグラフィとQU-fittingのハイブリッド (“tomography→modeling→QU-fitting”を自動化)
- MCMCを導入してパラメータ推定を高速化

### Data Processing



倉山さんポスター

# 活動：LOFARへの貢献

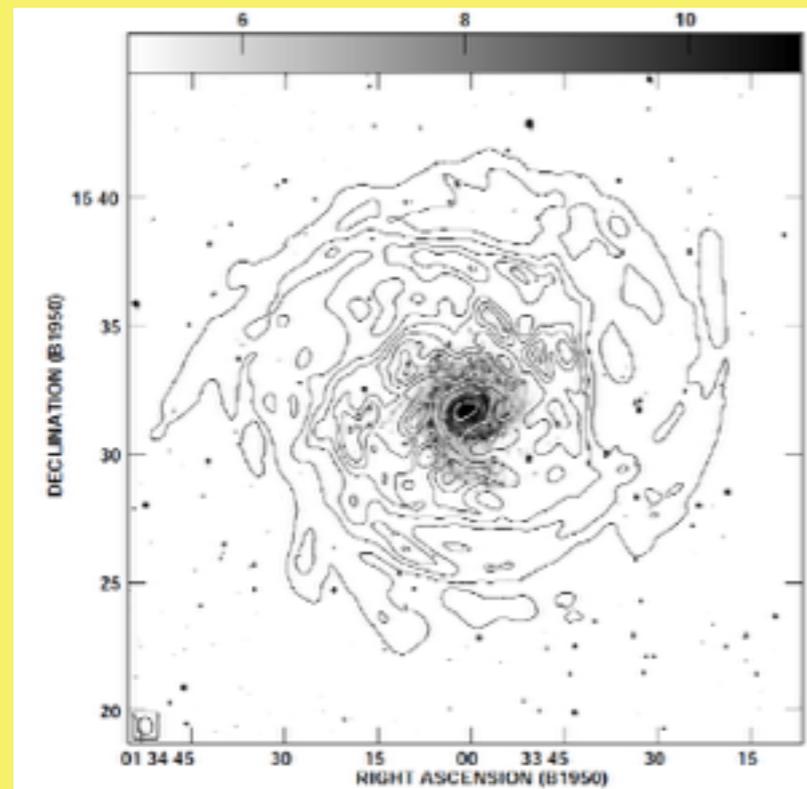
LOFAR Cycle1 (2013/11~2014/5)に  
3件のproposalが採択された(高橋, 出口)



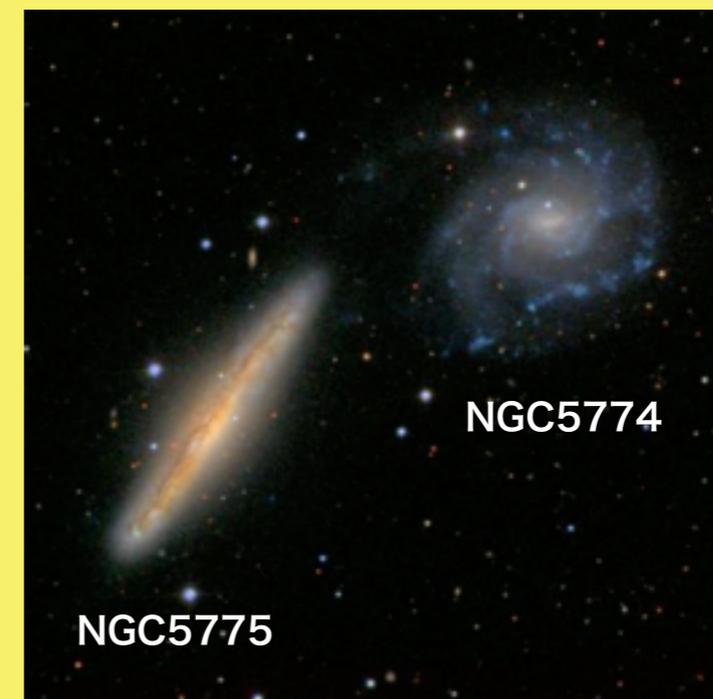
## 我々は偏波データ解析・トモグラフィーを担当

- Detection of the extended disk of the nearly face-on galaxy NGC628 (2013/11/22-23)
- Magnetization of the universe -- the case of the starbursting dwarf NGC4449 (2014/2/16-17)
- The large scale magnetic field of NGC 5775 (2014/5/9-11)

## 銀河の広がったシンクロトロン放射と磁場を調べる



NGC628  
濃淡：optical  
コントア：HI  
(Dutta et al. 2008)



(SDSS image)

# まとめ

## 磁場の情報：2次元から3次元へ

- 新たな宇宙磁場観測法：ファラデートモグラフィー
- 広帯域観測が必須 ⇒ SKA, pathfinder
- 銀河間磁場探査の強力な手段

## 乱流磁場により銀河のFDFは非常に複雑に

- 銀河間磁場を調べるには個々の銀河のFDFの形が重要
- 銀河のFDFから銀河の特性を知ることができる

## 磁場解析ソフトウェア

- トモグラフィーとQU-fittingそれぞれの特性を生かした
- ASKAP/POSSUM計画 偏波解析パイプラインに仮実装

## 来年にもLOFARによる偏波観測データの入手

- 上記ソフトウェアを用いた解析, トモグラフィーを行う