



SKA-Japanワークショップ2015@国立天文台三鷹

ファラデートモグラフィー： 広帯域偏波観測による新たな宇宙磁場探査法

日本が目指すサイエンス：「偏波解消とトモグラフィーで紐解く4次元宇宙磁場」

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(鹿児島大)、
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

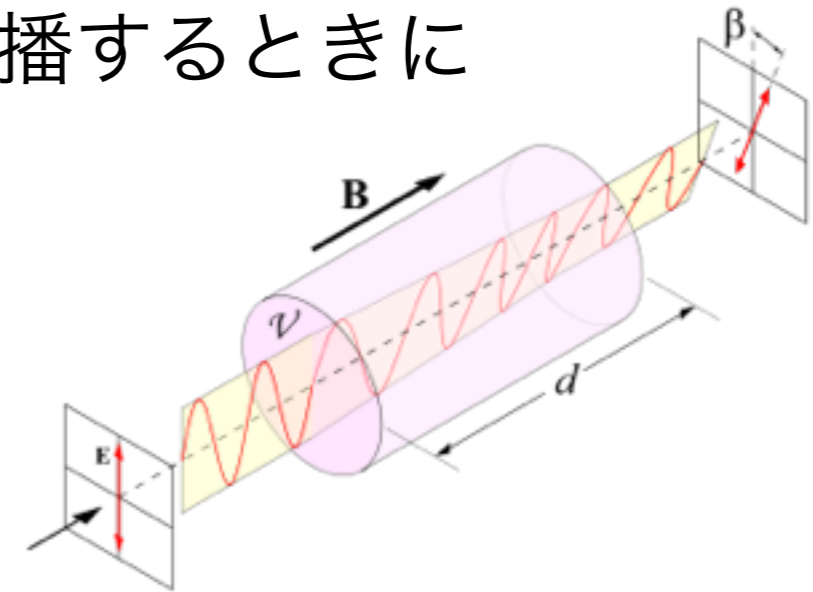
- イントロダクション
 - 宇宙磁場の観測
- トモグラフィーに関する活動報告
 - トモグラフィーの曖昧さ
 - 銀河間磁場の観測可能性
 - 銀河磁場の複雑さ
 - ASKAPとの活動
 - LOFARとの活動
- まとめ

宇宙磁場の観測法：ファラデー回転

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

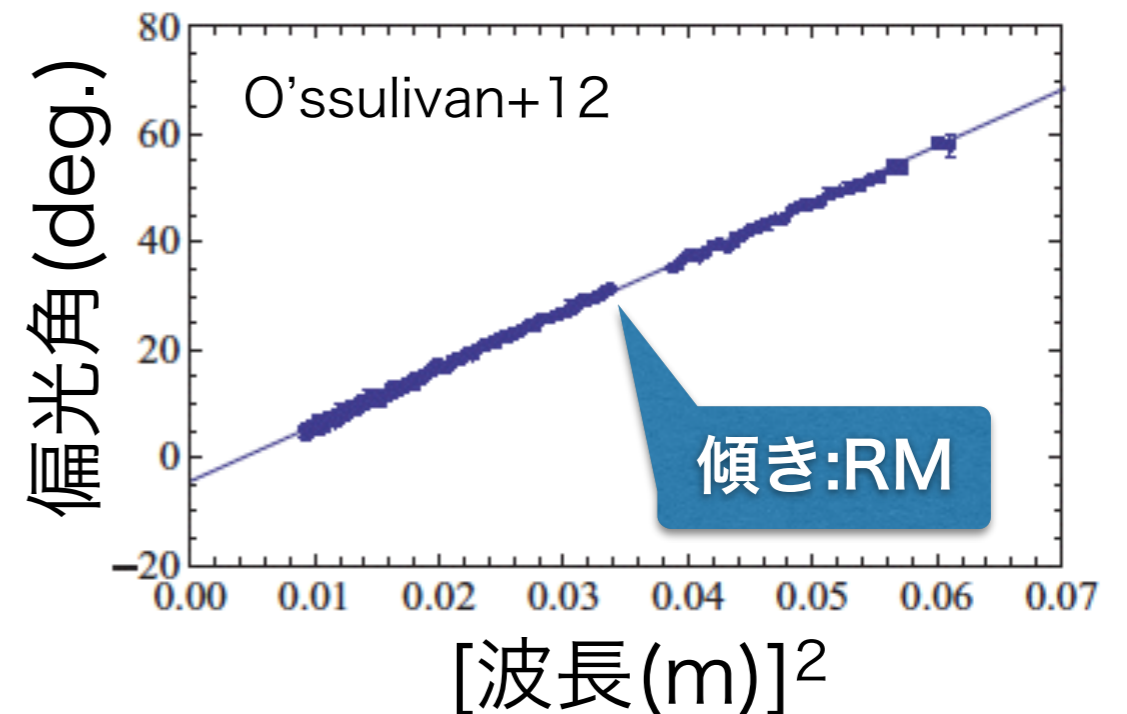
$$\chi = RM \lambda^2 + \chi_0$$



Rotation Measure

$$RM = \frac{e^3}{2\pi m_e^2 c^4} \int_x^0 n_e B_{\parallel} dx' \text{ rad m}^{-2}$$

偏光角 - 波長² プロットの傾きに
磁場の情報



視線方向に積分された磁場の情報

宇宙磁場の観測法：ファラデースペクトル

偏波の観測量

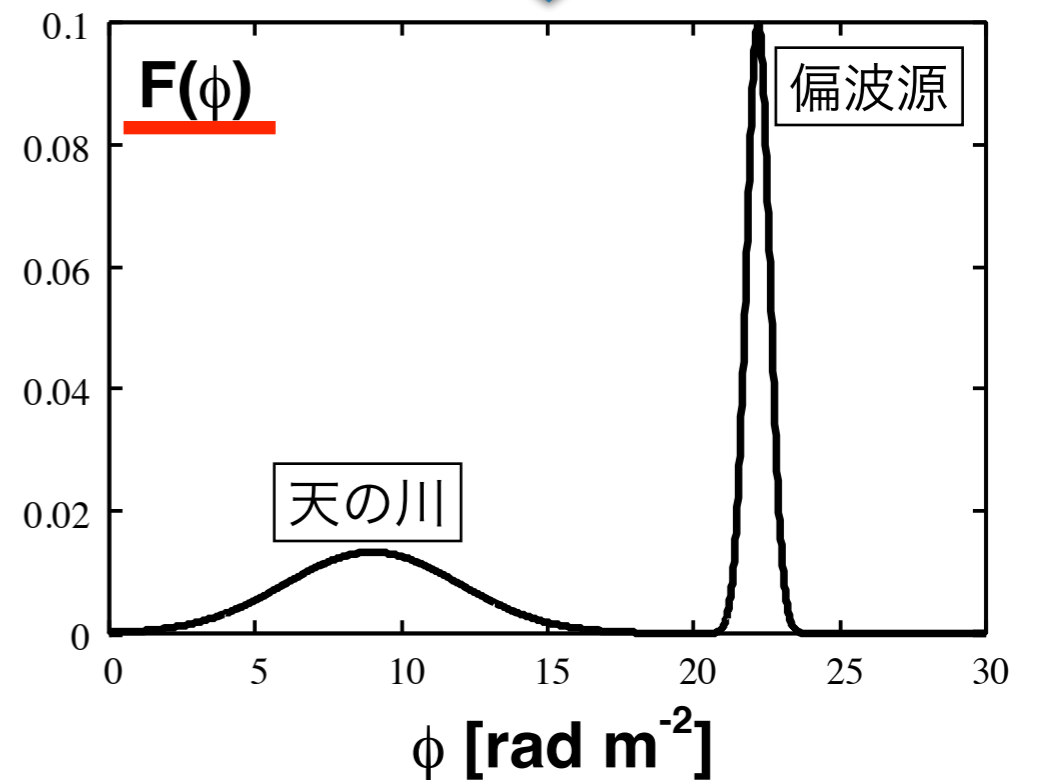
観測される偏波強度は視線上の全偏波源の積分

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

ファラデースペクトル F(φ)：偏波強度分布

ファラデー深度

$$\phi(x) = \frac{e^3}{2\pi m_e^2 c^4} \int_x^0 n_e B_{\parallel} dx' \text{ rad m}^2$$

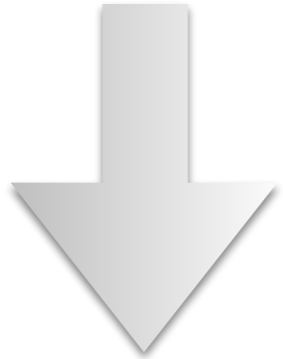


rotation measure：磁場の視線方向積分

ファラデースペクトル：磁場と偏波源の視線方向分布

二つの逆問題

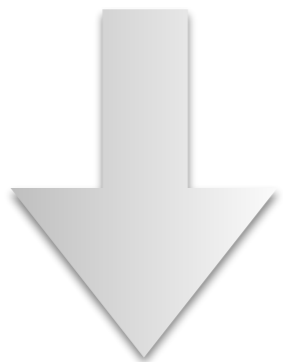
$P(\lambda^2)$



- ① 観測量からファラデースペクトル
「ファラデートモグラフィ」

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

$F(\phi)$



- ② ファラデースペクトルから実空間分布

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

ϕ と x は一対一対応していない

$F(x)$

$P(\lambda^2) \rightarrow F(\phi)$

ファラデーモグラフィ

～ ファラデースペクトル $F(\phi)$ の抽出 ～

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

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

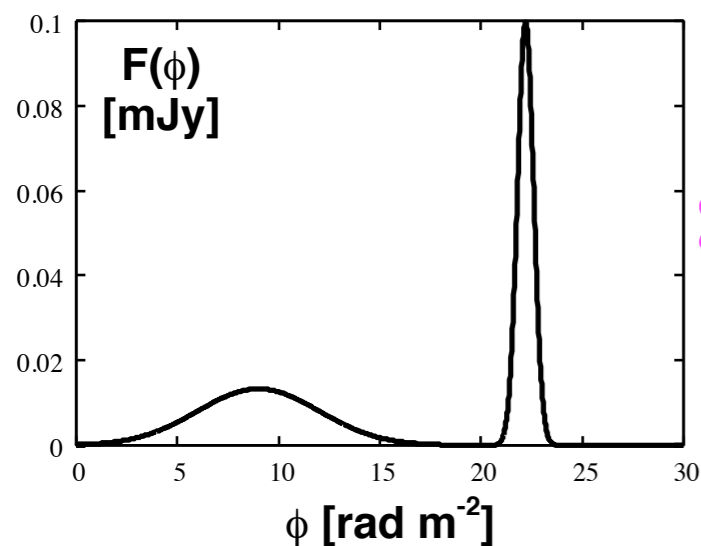
$$F(\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$

逆変換

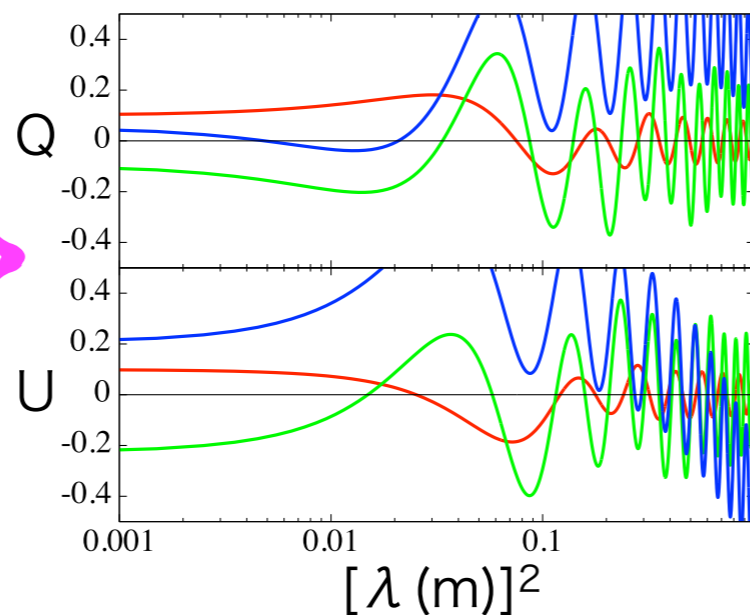
② QU-fitting

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

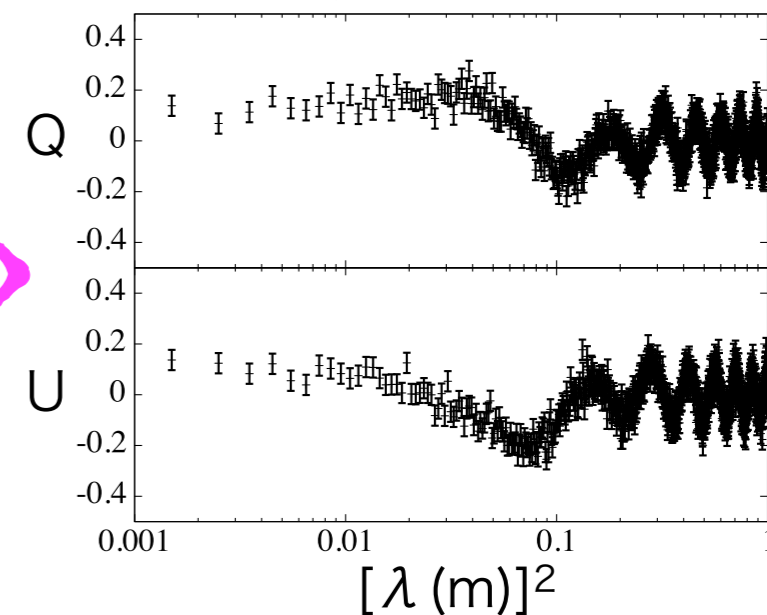
モデル FDF



モデル Q&U



観測量 Q&U



$$P(\lambda^2) \rightarrow F(\phi)$$

広帯域観測の重要性

RM synthesis

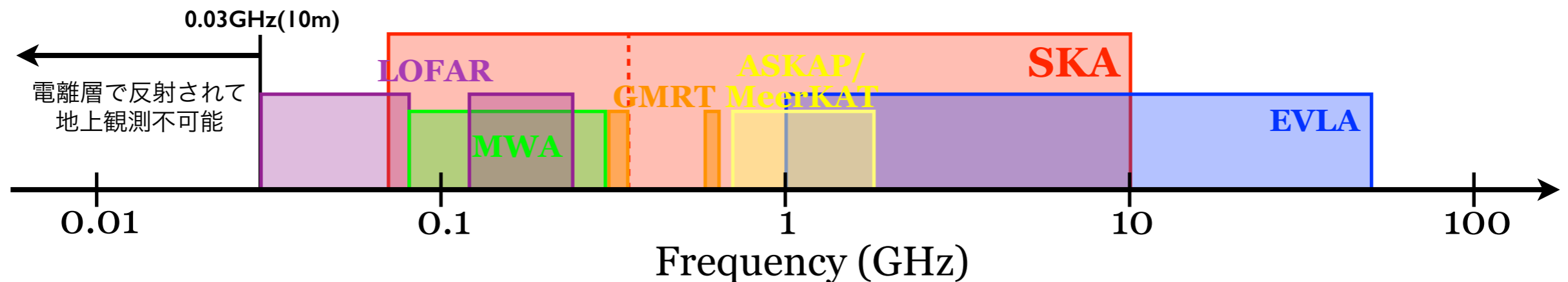
$$F(\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$

$\lambda^2 < 0$: 物理的に存在しない
 $\lambda^2 > 0$: 望遠鏡の観測帯域に依存

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 \rightarrow SKA, 試験機 (ASKAP, LOFAR)



$$P(\lambda^2) \rightarrow F(\phi)$$

RM synthesisの欠点

実際の観測では観測帯域に限界がある

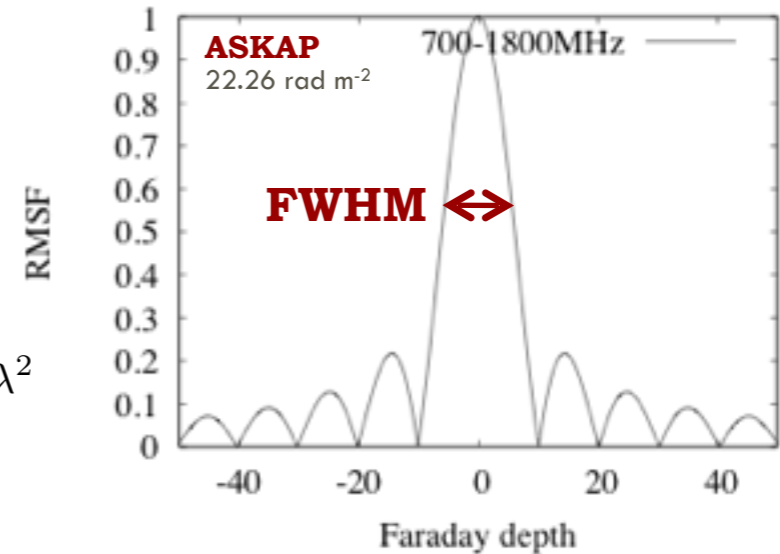
→ 窓関数の導入

$$\tilde{F}(\phi) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$

$$= R(\phi) * F(\phi)$$

W=1 (観測帯域)
W=0 (帯域外)

$$R(\phi) \propto \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$



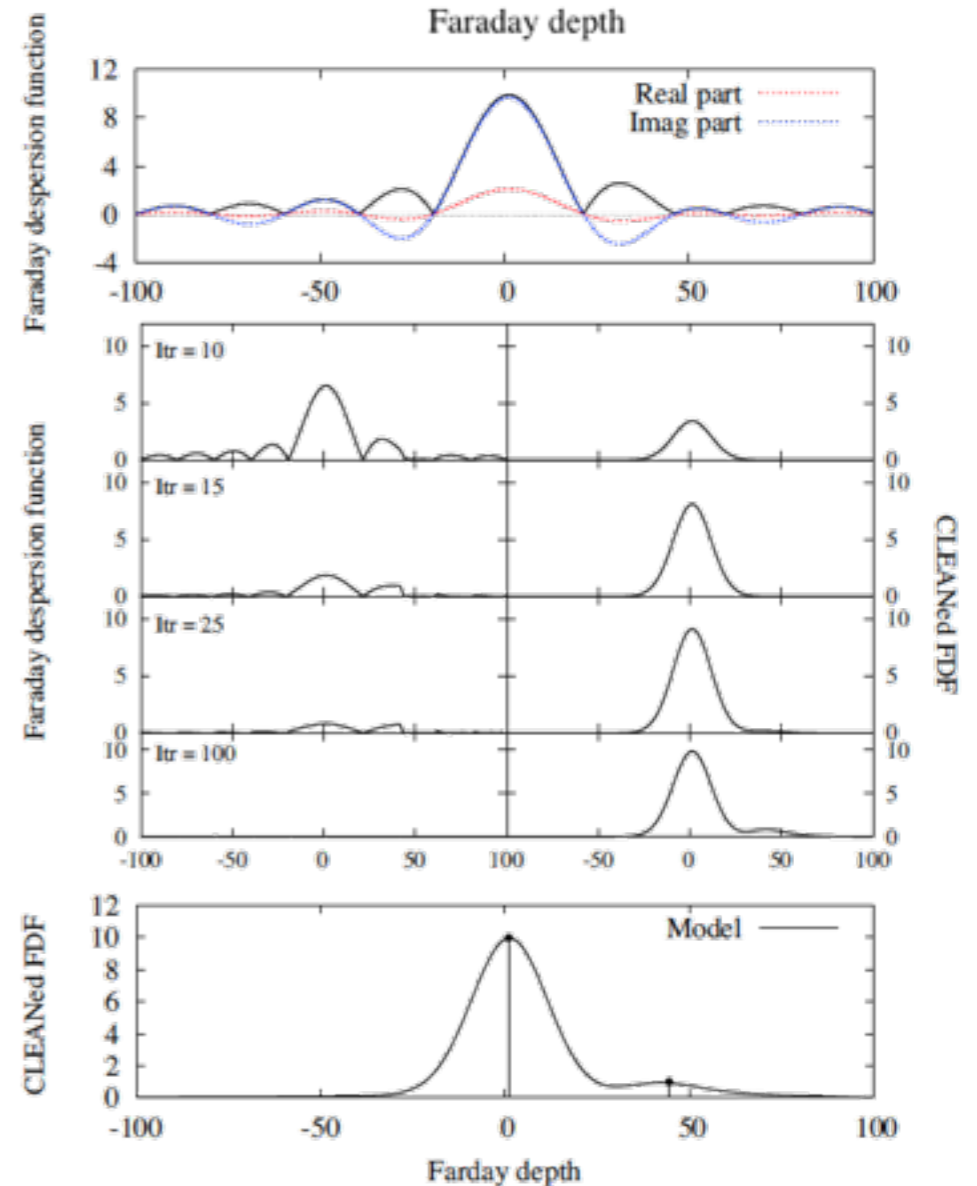
F(φ)を“ぼやかす”効果

RM CLEAN (Heald+09)

電波イメージングで用いられるCLEANを応用

- ① F(φ)の最大値を見つけ、
F(φ)からR(φ)を少しずつ引いていく
- ② 理想ビーム関数を
CLEANed F(φ)として足していく
- ③ ①, ②を残差がノイズレベル以下
になるまで続ける

サイドローブを除去できる

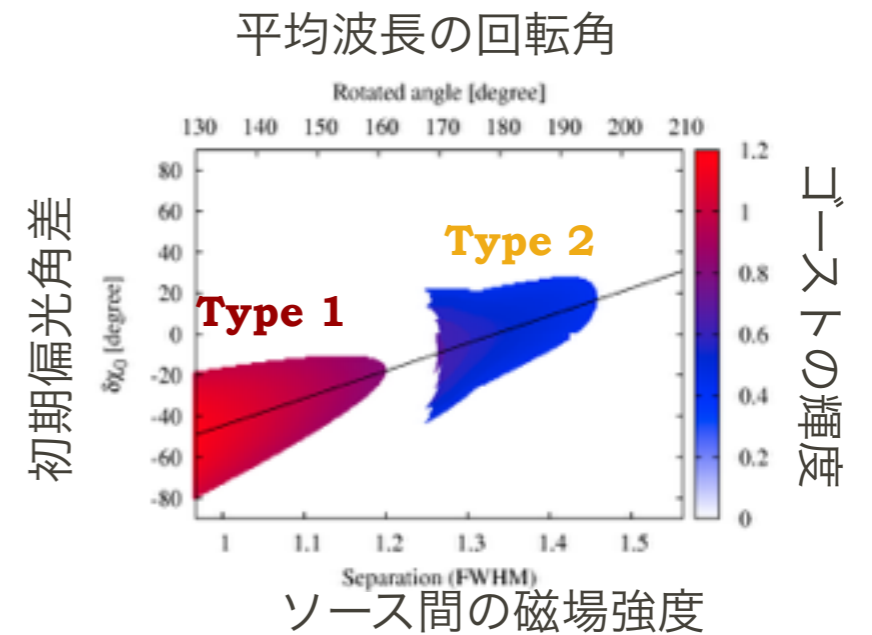
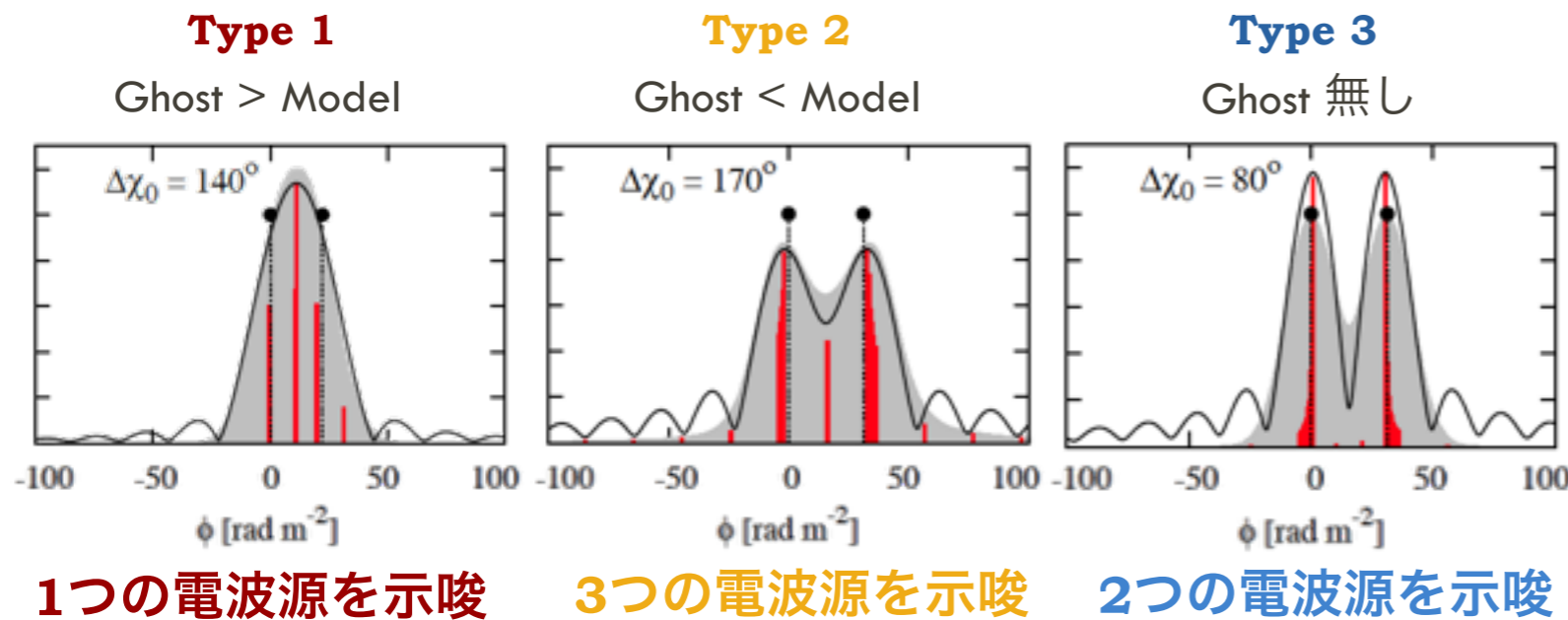


$$P(\lambda^2) \rightarrow F(\phi)$$

トモグラフィの曖昧さ (Kumazaki+14)

本来ソースの無いところに”ゴースト”が現れる (Farnsworth+11)

(Kumazaki+14)ゴースト発現の条件を究明



- 正解の $F(\phi)$ はデルタ関数2つ
- 2つのソースの初期偏波角差・ソース間距離 を変えて曖昧さを系統的に調べた

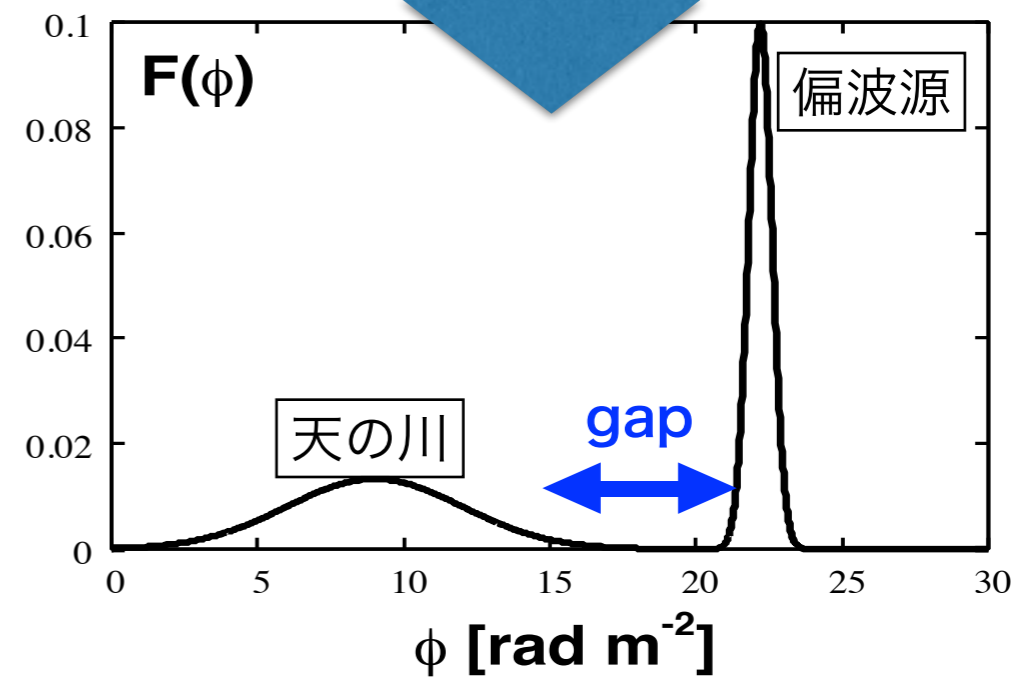
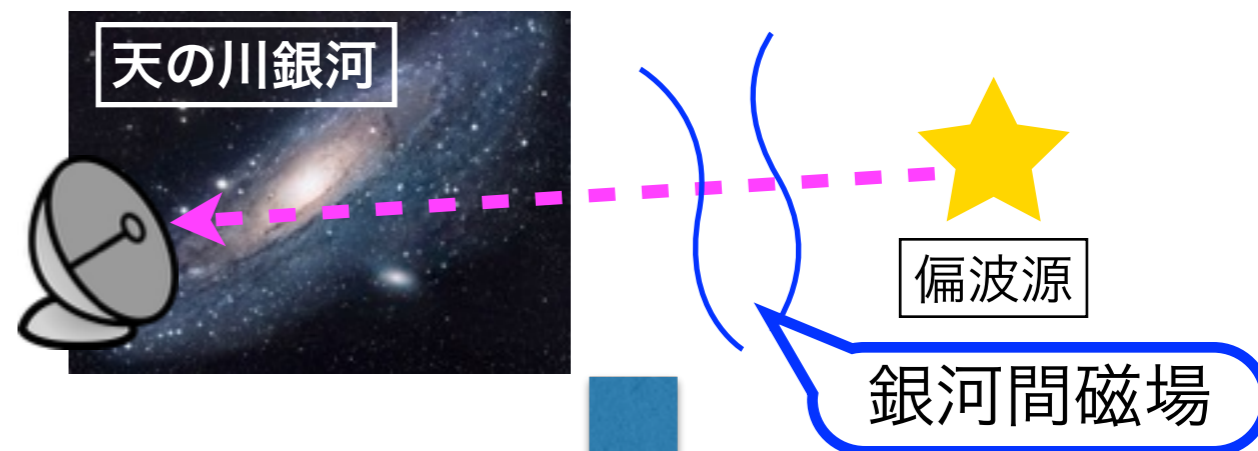
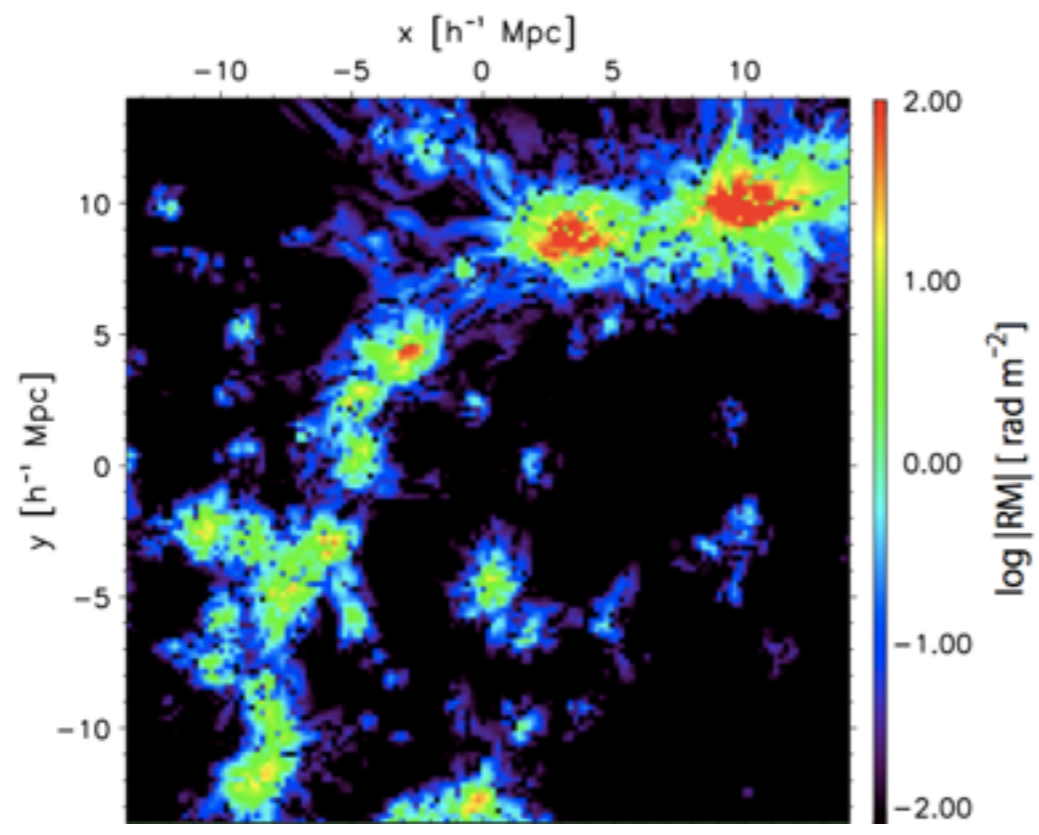
$P(\lambda^2) \rightarrow F(\phi)$

トモグラフィーを用いた 銀河間磁場の検出可能性

ターゲット：大規模構造フィラメントの銀河間磁場

- ・ フィラメントに付随する磁場は未発見
- ・ (Akahori & Ryu 11) フィラメント銀河間磁場のRM：数rad m⁻²

ファラデースペクトル → 銀河間磁場はソース間のgapとして現れる

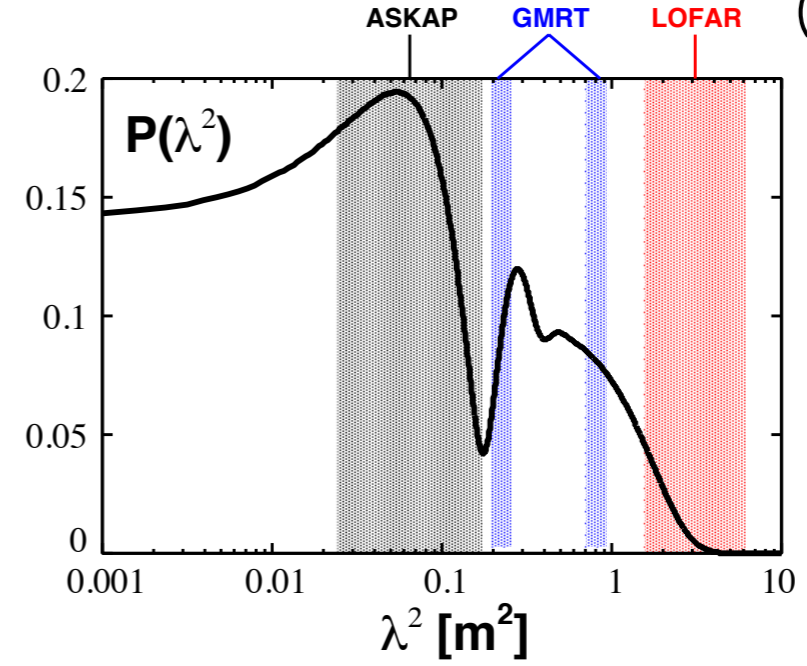
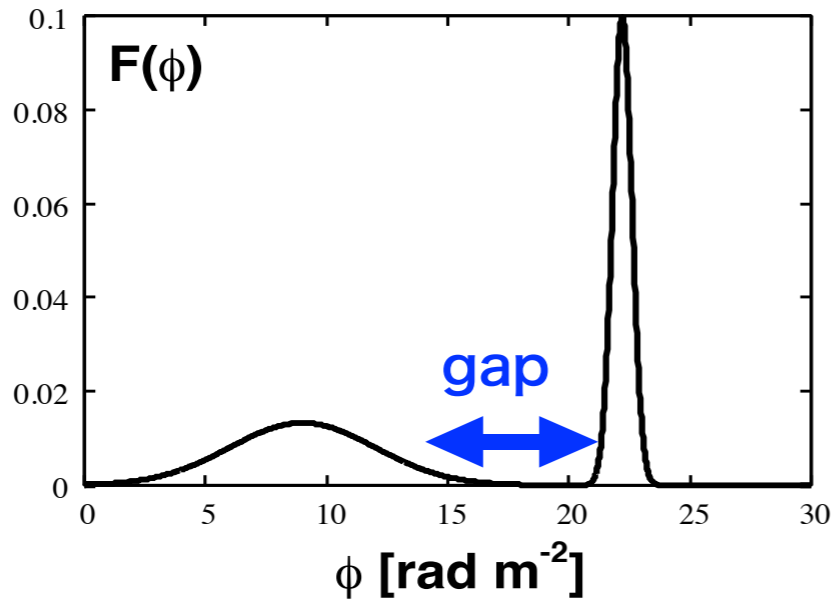


シミュレーションから得られる
大規模構造RMマップ(Akahori & Ryu10;11)

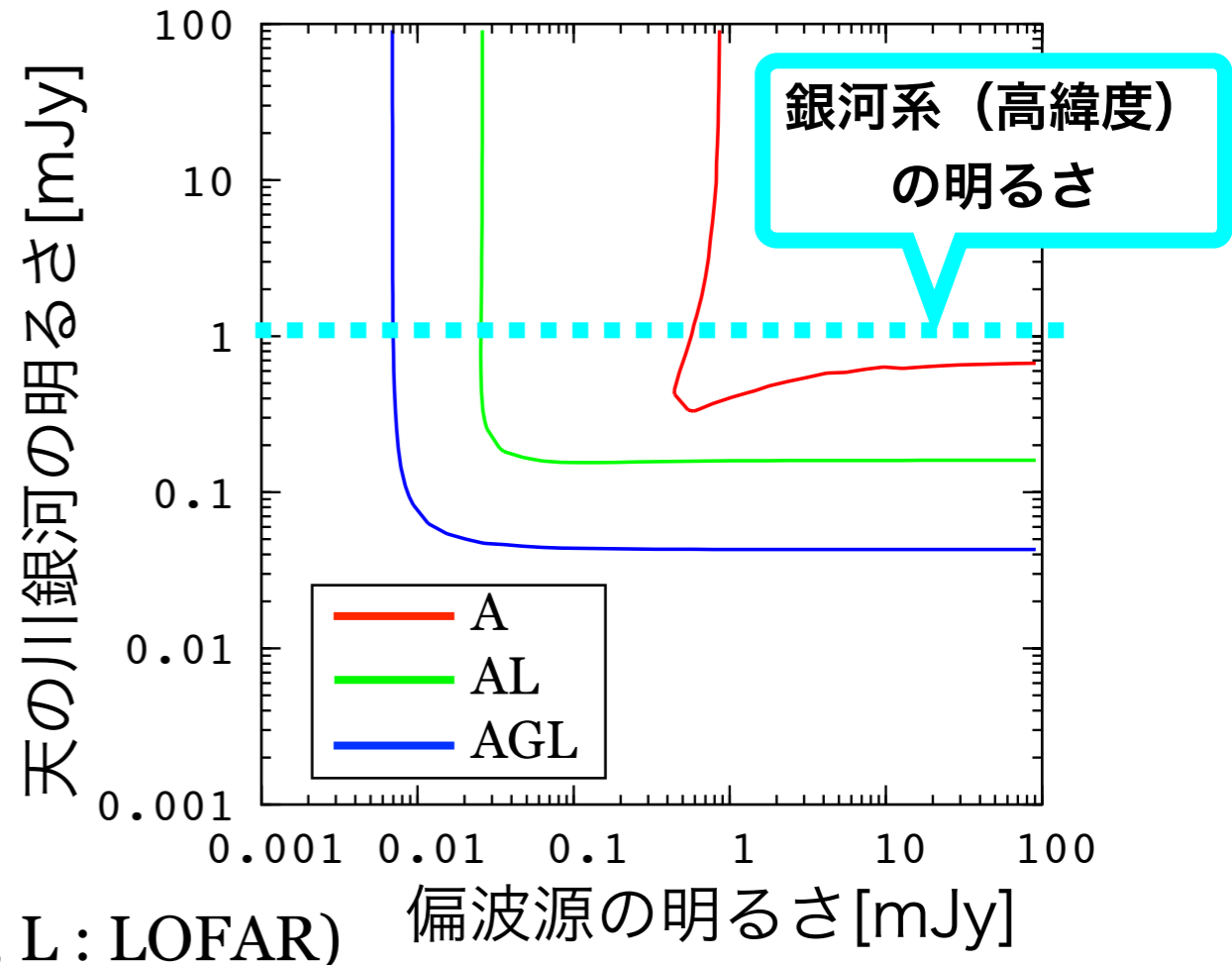
$P(\lambda^2) \rightarrow F(\phi)$

QU-fitによる銀河間磁場の検出可能性

(Ideguchi+14a)



- 簡単な $F(\phi)$ ~ガウシアンソース2つ~を仮定
- 電波望遠鏡ASKAP, LOFAR, GMRTによる観測を想定
- QU-fitによりgap ($RM=3\text{rad}/\text{m}^2$)を検出できるか
- Fisher解析を用いてパラメータエラーを見積もる

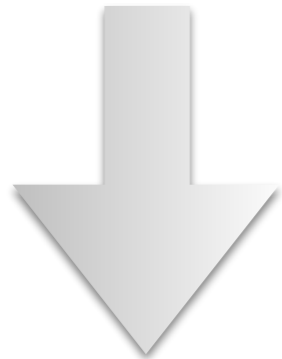


(A : ASKAP, G : GMRT, L : LOFAR) 偏波源の明るさ [mJy]

RM~3rad/m²の銀河間磁場は試験機でも検出できる

二つの逆問題

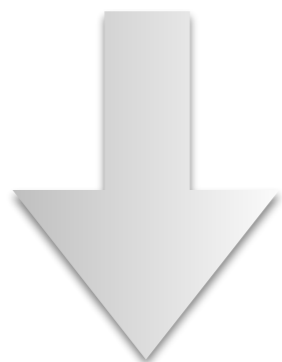
$P(\lambda^2)$



- ① 観測量からファラデースペクトル
「ファラデートモグラフィ」

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

$F(\phi)$



世界的に研究例が非常に少ない

- ② ファラデースペクトルから実空間分布

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

ϕ と x は一対一対応していない

$F(x)$

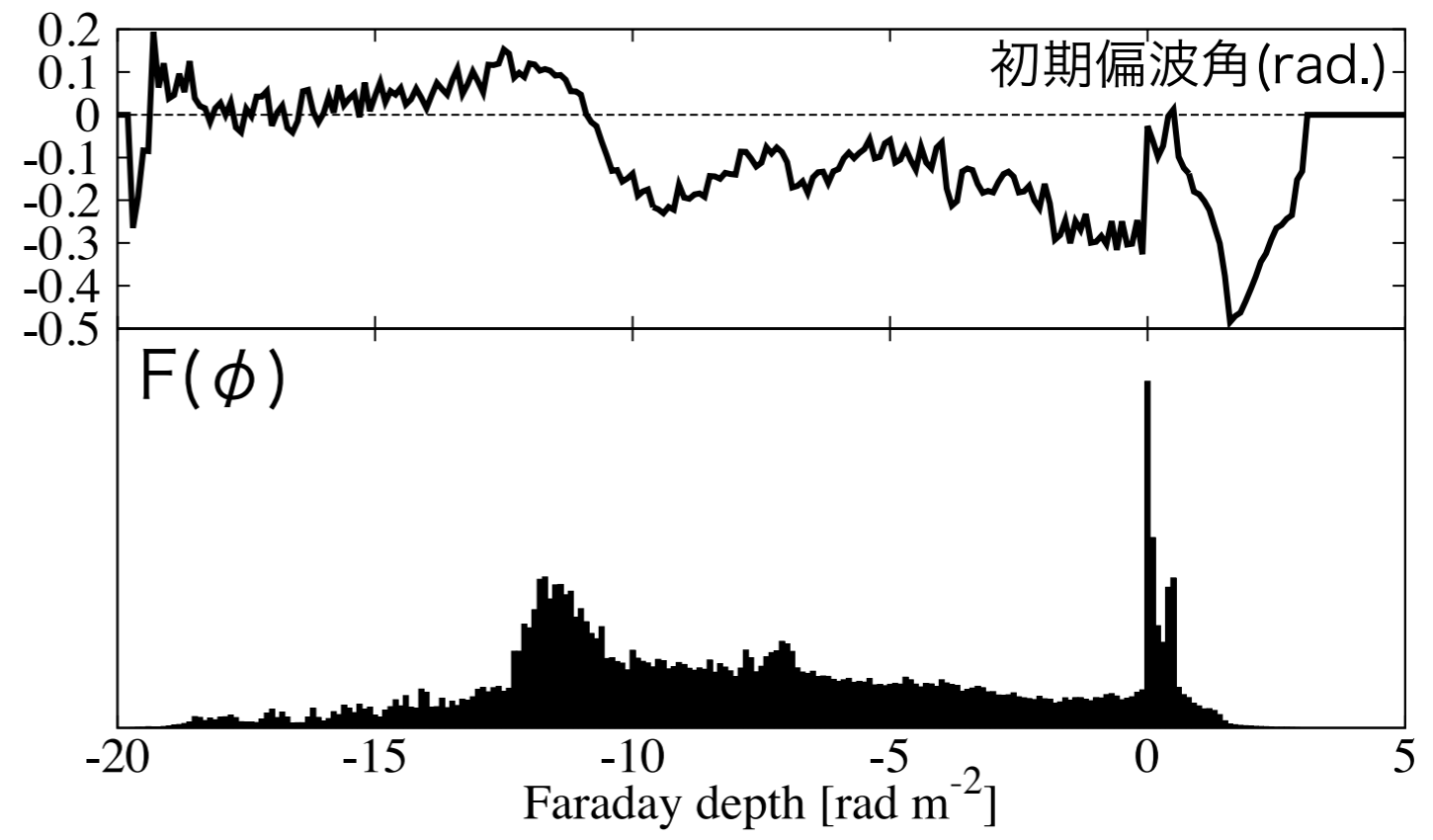
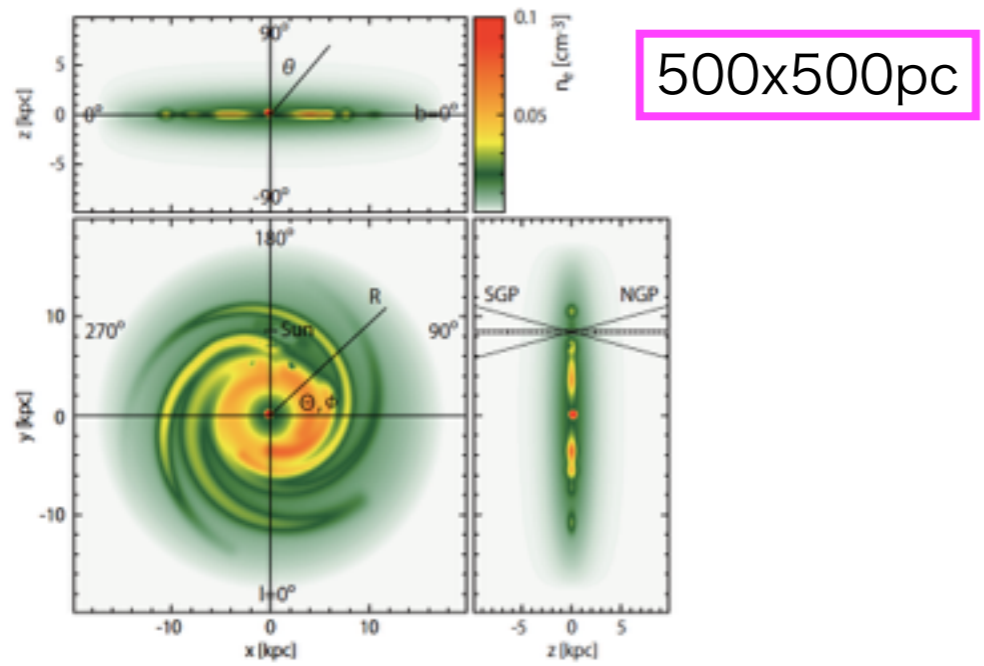
$$F(\phi) \rightarrow F(x)$$

ファラデースペクトルが持つ物理情報

銀河のファラデースペクトル (Ideguchi+14b)

銀河モデル(Akahori+13)を用いてface-on銀河のファラデースペクトルを予測

- 大局的な磁場・電子…観測値に基づく
- 乱流的な磁場・電子…MHD計算に基づく



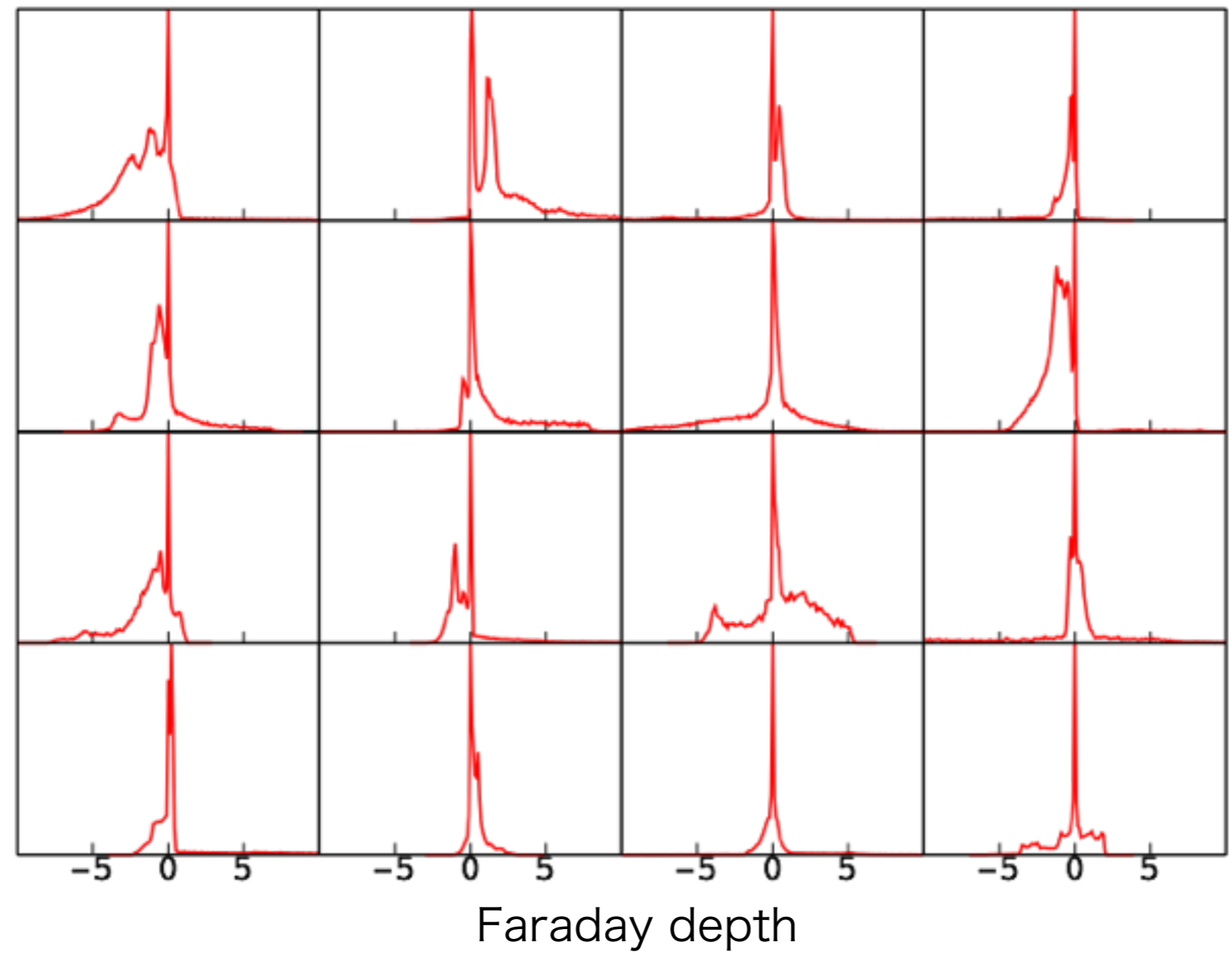
- これまでは漠然とデルタ関数、ガウシアン、トップハットなど簡単な関数が使われていた
- 銀河モデルを用いたより現実的な銀河の $F(\phi)$
 - ➔ 複数のピーク、簡単な関数では表せない

$$F(\phi) \rightarrow F(x)$$

ファラデースペクトルが持つ物理情報

銀河のファラデースペクトル (Ideguchi+14b)

乱流のリアライゼーションによる $F(\phi)$ の違い



- ・ 乱流により、 $F(\phi)$ は様々な形になりうる

$F(\phi) \rightarrow F(x)$

ファラデースペクトルが持つ物理情報

銀河のファラデースペクトル (Ideguchi+14b)

ファラデースペクトル $F(\phi)$

F: シンクロトロン放射

$$P(\nu) \propto N_e B_{\perp}^{(1+p)/2} \nu^{(1-p)/2}$$

宇宙線電子 + 垂直磁場

$\phi(x)$: ファラデー深度

$$\phi(x) = \frac{e^3}{2\pi m_e^2 c^4} \int_x^0 n_e B_{\parallel} dx' \text{ rad m}^2$$

熱的電子 + 平行磁場

ファラデースペクトルは本質的に様々な物理量の情報を含んでいる

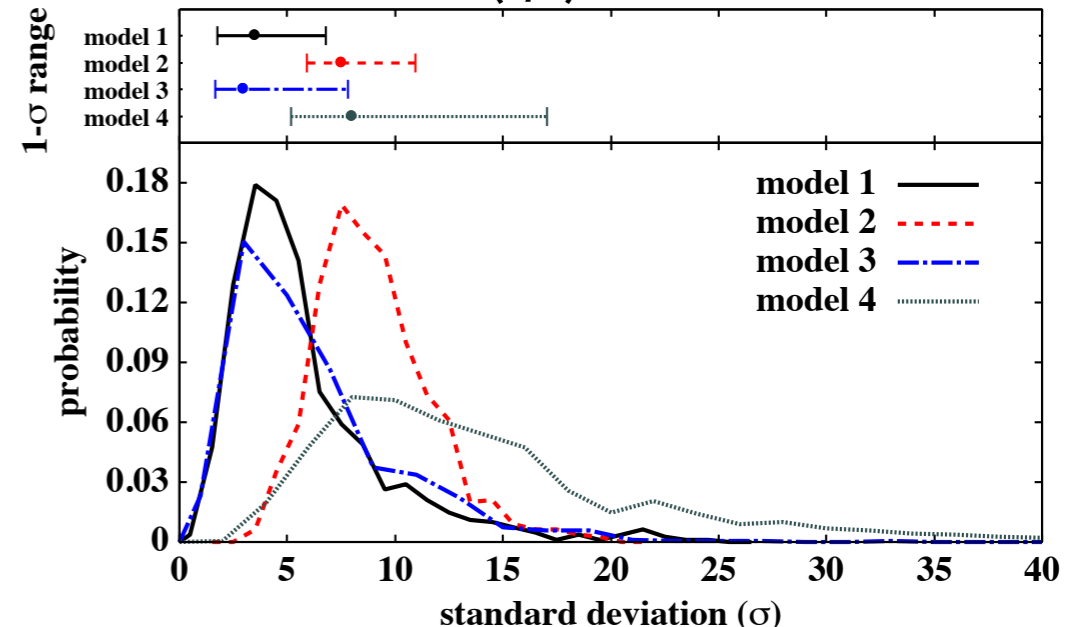
➡ どれほど引き出せるか？

- 銀河モデルにおいてこれらの物理量を変えたモデルを用意
- モデルの違いが $F(\phi)$ に反映されるか？
- $F(\phi)$ の形 (幅、skewness、kurtosis) を指標とする

宇宙線電子スケールハイト
熱的電子スケールハイト
垂直磁場

銀河の物理は $F(\phi)$ に反映される

モデルごとの $F(\phi)$ の“幅”の確率分布



$$F(\phi) \rightarrow F(x)$$

ファラデースペクトルが持つ物理情報

(Tashiro+ in prep.)

現実的な銀河モデルから作った $F(\phi)$ は複雑で、理解は容易でない

➔ より簡単なモデルで手がかりをつかむ

モデル

乱流磁場：一様乱数

電子分布：一様

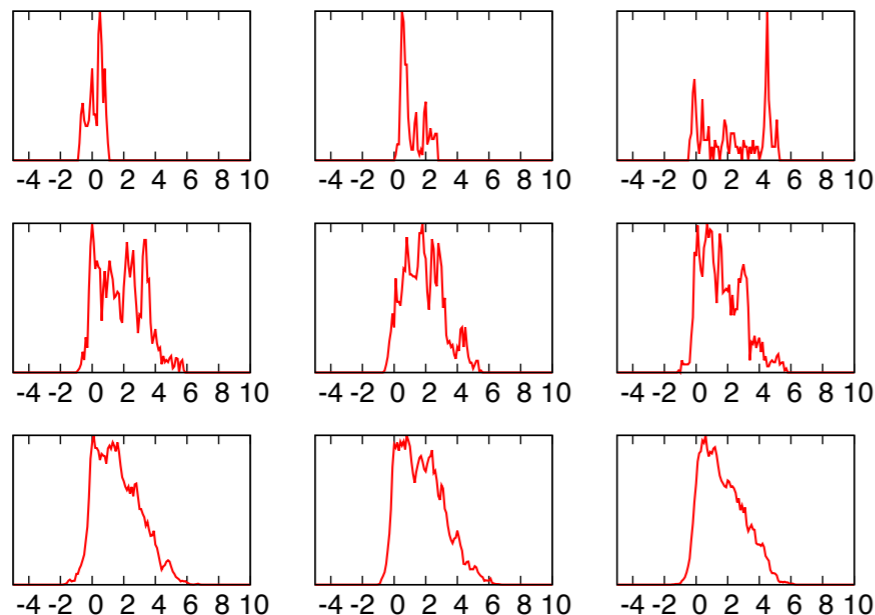
←放射も一様

ファラデースペクトル

ビームサイズ/乱流スケール

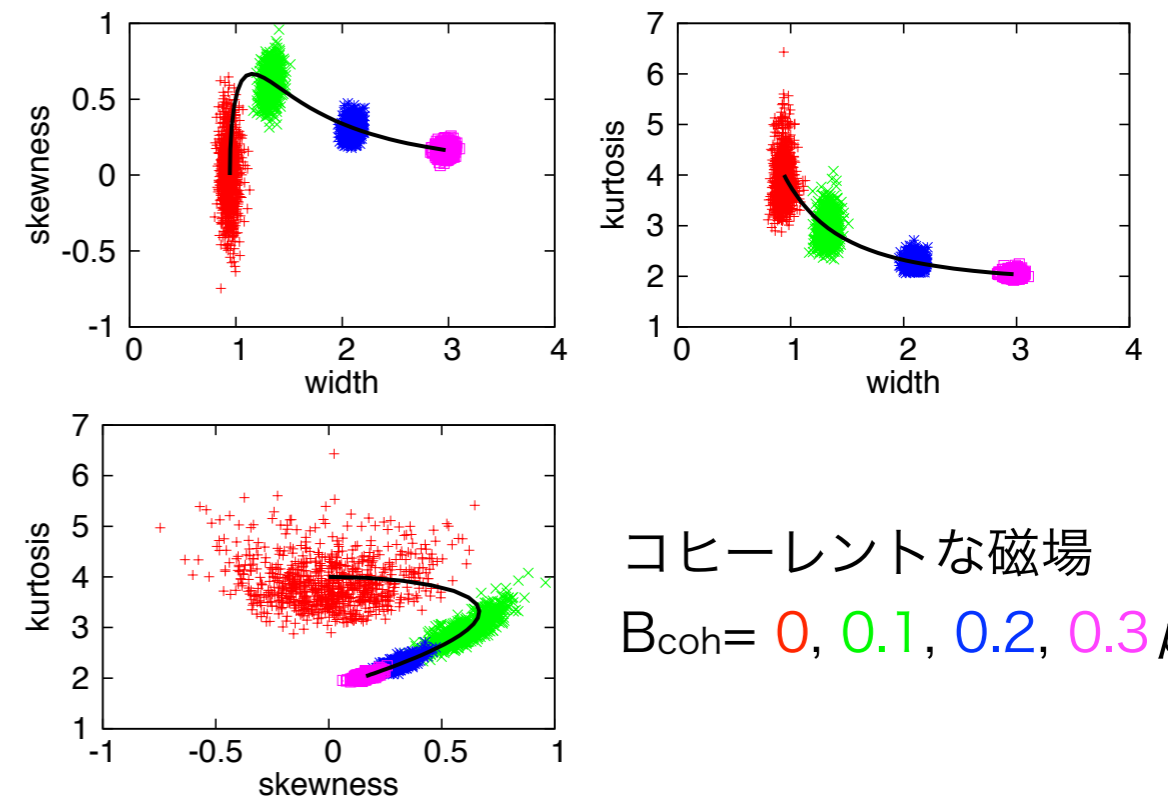
小
↓
大

リアライゼーションの違い



Faraday depth

“形”の統計量



コヒーレントな磁場
 $B_{\text{coh}} = 0, 0.1, 0.2, 0.3 \mu\text{G}$

田代くんポスター

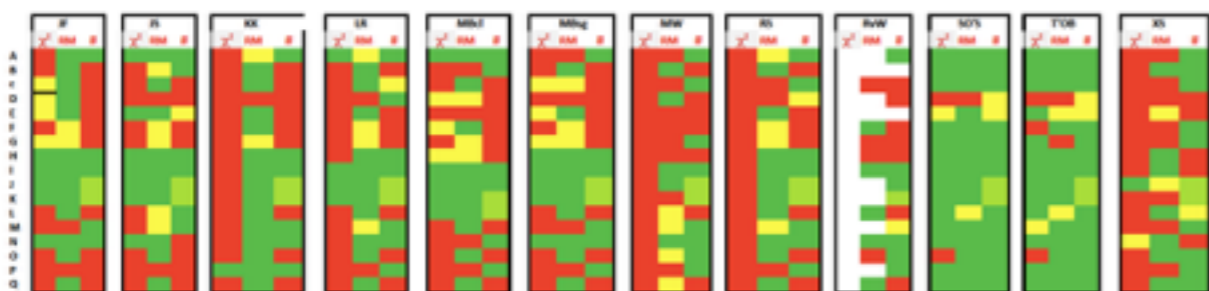
ASKAPとの活動

シドニー大に長期滞在、研究交流 (2013年2月、2014年2,8,11,12月)

(POSSUM : ASKAPの全天偏波観測計画)

data challenge I (Sun+14)

模擬観測データ $P(\lambda^2)$ から $F(\phi)$ を見積もる



	RM synthesis	QU-fitting
初期モデル	○ (必要なし)	× (必要あり)
$F(\phi)$ の見積もり	△	○
エラーの推定	×	○

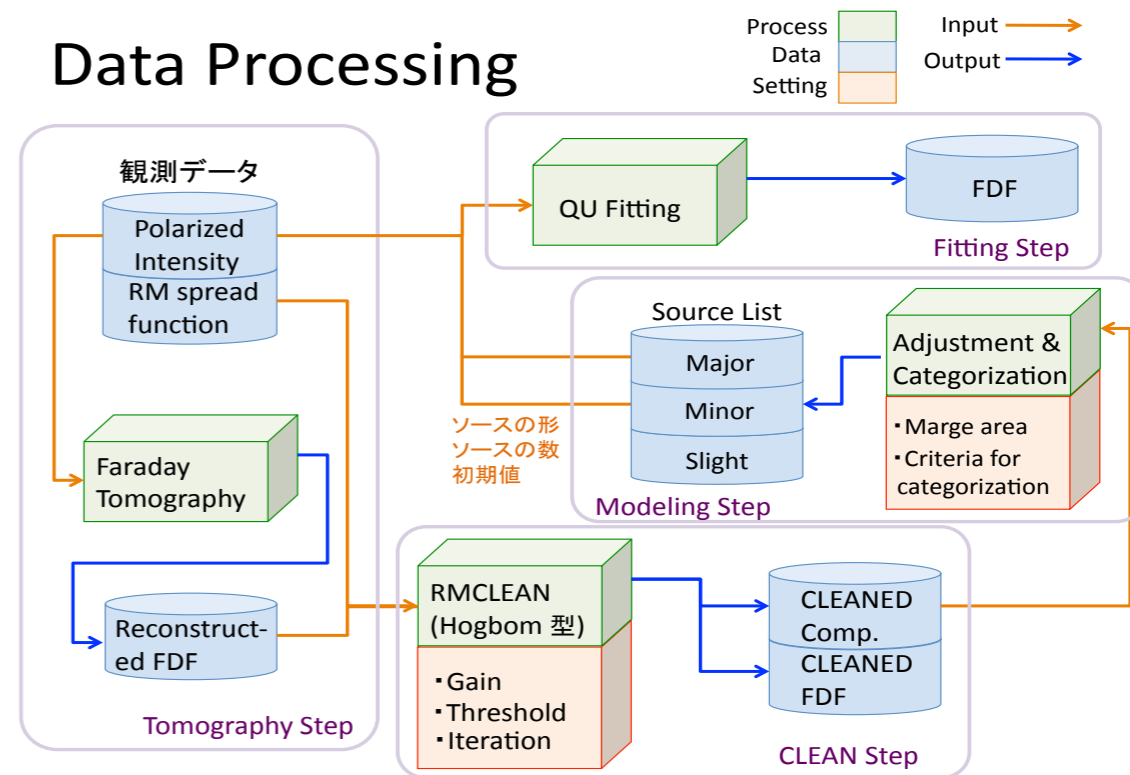


data challenge II (2015年3月予定)

偏波解析ソフトウェア

- ・ハイブリッド : RM synthesis + QU-fitting
- ・POSSUMパイプラインに実装済

Data Processing



LOFARとの活動

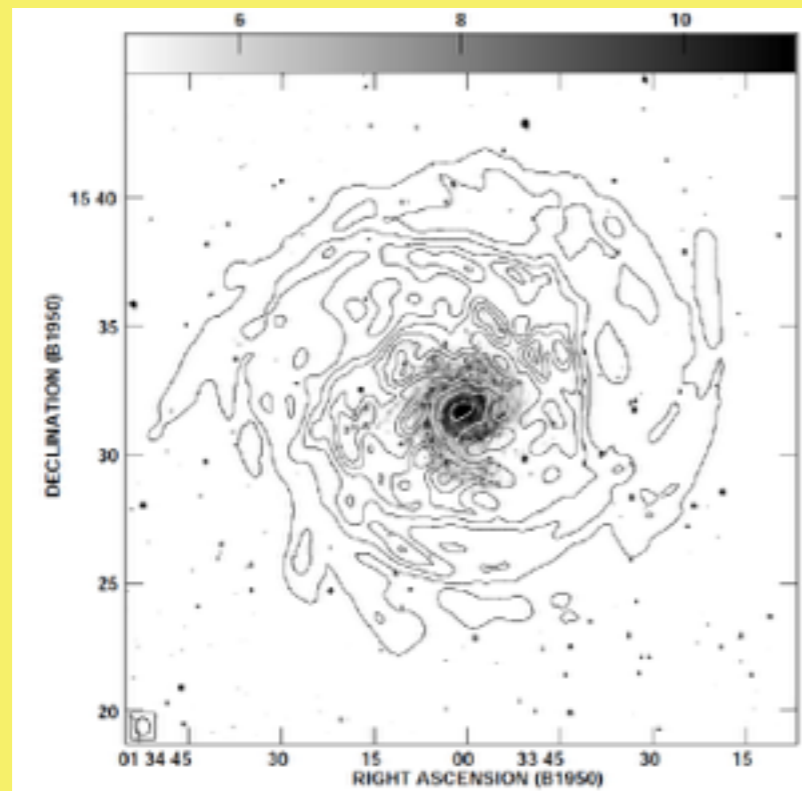
LOFAR Cycle1 (2013/11~2014/5)に
3件のproposalが採択された(高橋, 出口)



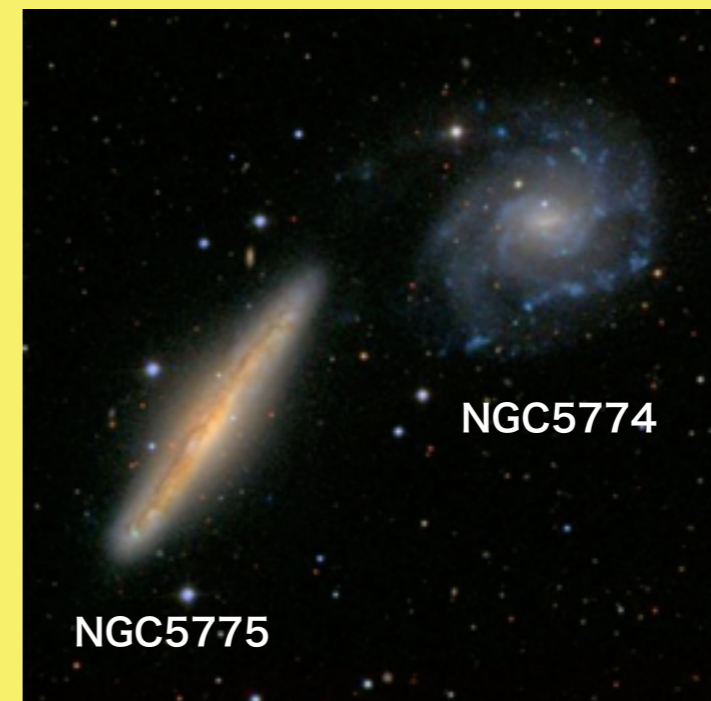
我々は偏波データ解析・トモグラフィを担当

- 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, 試験機
- 銀河間磁場探査の強力な手段： $F(\phi)$ 上でソース間の“gap”を検出できればよい

観測量 $P(\lambda^2)$ ⇒ ファラデースペクトル $F(\phi)$

- 簡単な $F(\phi)$ のモデルでは、近い将来の望遠鏡の観測で銀河間磁場を検出できる
- トモグラフィーの曖昧さの系統的研究

ファラデースペクトル $F(\phi)$ ⇒ 実距離分布 $F(x)$

- ファラデースペクトルは本質的に様々な物理を含んでいる
- $F(\phi)$ の形に注目：銀河の $F(\phi)$ は銀河の特性を反映する

ASKAPとの活動

- 開発したトモグラフィーソフトウェアがPOSSUMパイプラインに実装
- 第一回に引き続き、第二回データチャレンジに参加予定

近い将来LOFAR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