

# 偏波解消とトモグラフィー で紐解く4次元宇宙磁場

日本版SKAサイエンスブック第6章



**赤堀卓也**

鹿児島大学 / SKA機構

日本&国際SKA「宇宙磁場」科学検討班



SKA-Japan Workshop 2015

2015/3/3-5 @ 三鷹

## 1. 執筆者の情報(国際・国内の組織と活動)

## 2. サイエンスブックの紹介

### – 未解決の課題

- 宇宙磁場の魅力とSKA視点での謎

### – 国際的な戦略

- 最先端の話題を実現性の視点から

### – 日本独自の戦略

- 独自性(偏波解消とトモグラフィ)
- サイエンス、エンジニアリング、シナジー

## 3. まとめ

### – 期待される成果、科学・技術要求の一覧

# 国際SKA「宇宙磁場」科学検討班 メンバーとこれまでの活動

代表2名 コアメンバー17名 連携メンバー18名

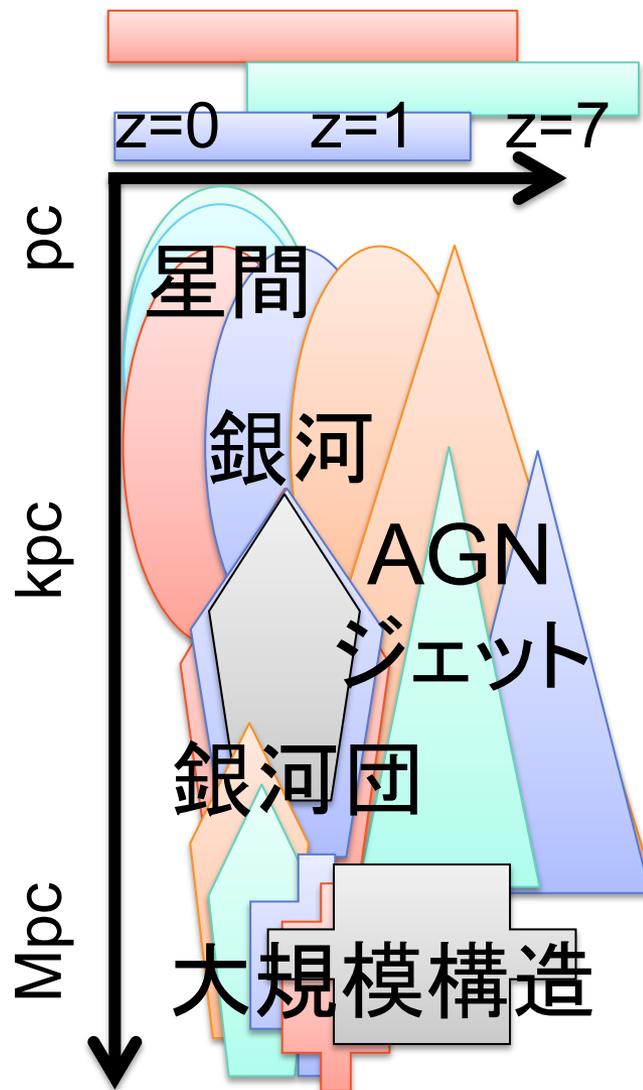


I. Agudo (NL)	☆ L. Feretti (IT)	G. Heald (NL)	A. Scaife (UK)
M. Alves (FR)	K. Ferriere (FR)	C. Horellou (SE)	D. Schleicher (DE)
<u>T. Akahori (JP)</u>	A. Fletcher (UK)	☆ M. Johnston-Hollitt (NZ)	D. Schnitzeler (DE)
E. Battaner (ES)	★ B. Gaensler (CA)	H. Junklewitz (DE)	J. Stil (CA)
R. Beck (DE)	F. Govoni (IT)	A. Mao (DE)	X. Sun (AU)
A. Bonafede (DE)	J. Green (SKA)	J. Macquart (AU)	<u>K. Takahashi (JP)</u>
T. Bourke (SKA)	M. Langer (FR)	R. Pizzo (NL)	R. Taylor (ZA)
T. Carozzi (SE)	J. Han (CN)	T. Robishaw (CA)	
S. Colafrancesco (ZA)	L. Harvey-Smith (AU)	L. Rudnick (US)	計37名
J. Farnes (AU)	M. Haverkorn (NL)	D. Ryu (KR)	☆SKA-Board ★SEAC

- ❖ 科学評価書の作成・科学評価会議への出席(2013)
- ❖ SKA1の科学データ処理の仕様変更 (2013)
- ❖ 再ベースラインのための科学優先順位付け (2014)

## ❖ 19論文

- All Sky (M. Johnston-Hollitt, TA+)
- Deep field (R. Taylor, TA+)
- Broad band (B. Gaensler, TA+)
- Interstellar (C. Dickinson+)
- Interstellar (T. Robishaw+)
- Milky Way (M. Haverkorn, TA+)
- Nearby galaxies (R. Beck+)
- Nearby galaxies (G. Heald, KT+)
- ▲ Distant galaxies (J. Stil+)
- ▲ AGN Jets (I. Agudo+)
- ▲ AGN Jets (R. Laing+)
- ◆ Galaxy clusters (F. Govoni+)
- ◆ Galaxy clusters (M. Johnston-Hollitt+)
- ◆ Galaxy clusters (S. Colafrancesco+)
- ◆ Galaxy clusters (A. Bonafede, TA+)
- ◆ Galaxy clusters (G. Giovannini+)
- ⊕ Cosmic web (B. Peng+)
- ⊕ Cosmic web (F. Vazza+)
- ⊕ Cosmic web (V. Vacca, SI+)



- ❖ 2010.3設立, 30名(院生10名)
- ❖ 月例定例会議(68回)
- ❖ 国内研究会(3回)
- ❖ 論文出版(多数)
- ❖ 日本版DRM (2013)
- ❖ JVLAマニュアル(2014)
- ❖ ATCAマニュアル(2014)
- ❖ ASKAPソフトウェア開発(1件)



Design Reference Mission  
—宇宙磁場—



日本 SKA コンソーシアム  
宇宙磁場科学検討班  
2013年12月4日

JVLA 観測マニュアル



日本 Square Kilometre Array コンソーシアム  
宇宙磁場科学検討班

2014

ATCA 観測マニュアル



日本 Square Kilometre Array コンソーシアム  
宇宙磁場科学検討班

2014

## ❖ 14著者、56ページ、12課題

1. 星間磁場の起源と進化
2. 系外銀河の4次元磁場構造
3. 介在銀河の偏波特性
4. AGNジェットの磁場構造
5. 銀河団乱流の形成と進化の解明
6. 銀河団電波ハローの多波長観測
7. 銀河団電波レリックの多波長観測
8. 宇宙大規模構造磁場の探査
9. 宇宙論的な磁場生成
10. 宇宙磁場の宇宙論的進化
11. トモグラフィーの諸問題の改善
12. さらなるシナジーを求めて



### 執筆者(所属)

- 赤堀卓也(鹿児島大)  
 赤松弘規(SRON)  
 市來淨與(名古屋大)  
 出口真輔(熊本大★)  
 岩井一正(国立天文台◆)  
 小澤武揚(鹿児島大★)  
 木戸英治(東京大◆)  
 工藤哲洋(国立天文台)  
 熊崎亘平(名古屋大★)  
 高橋慶太郎(熊本大)  
 滝沢元和(山形大)  
 中西裕之(鹿児島大)  
 藤田裕(大阪大)  
 町田真美(九州大)
- ◆外部寄稿者 ★大学院生

## 1. 国際・国内の組織と活動

## 2. サイエンスブックの紹介

### – 未解決課題

- 宇宙磁場の魅力とSKA視点での謎

### – 国際的な戦略

- 最先端の話題を実現性の視点から

### – 日本独自の戦略

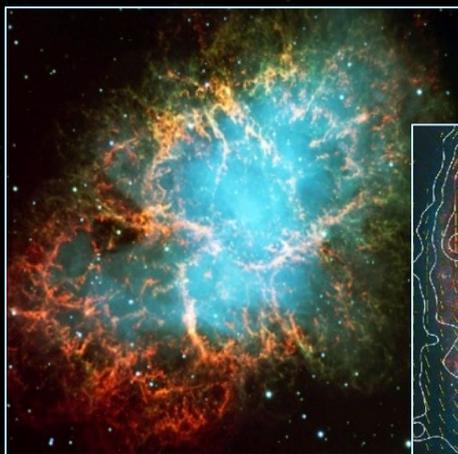
- 独自性(偏波解消とトモグラフィ)
- サイエンス、エンジニアリング、シナジー

## 3. まとめ

### – 期待される成果、科学・技術要求の一覧

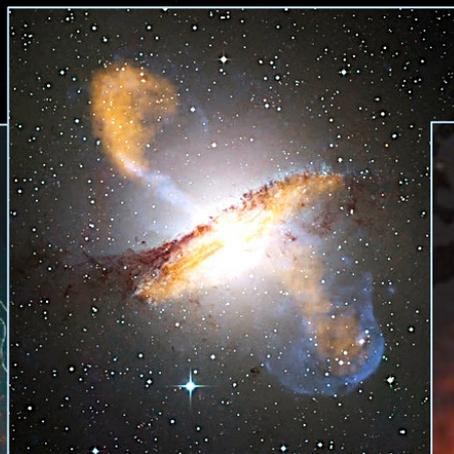
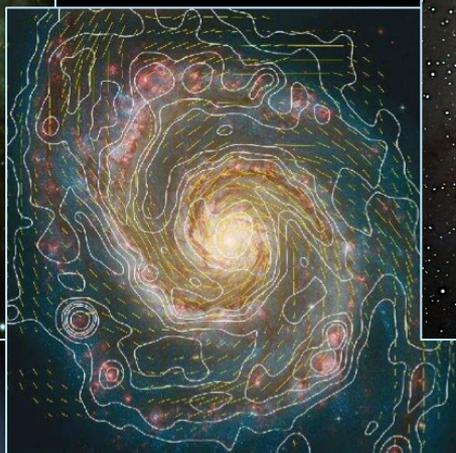
# 宇宙磁場の魅力

磁場 – 宇宙の**多様性**を作る**普遍性**を持った物理<sup>8</sup>



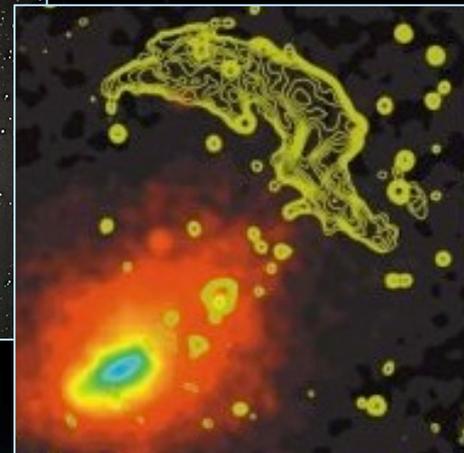
超新星残骸・  
星形成

ダイナモ・  
銀河形態



ジェット・  
フィードバック

粒子加速・  
ミッシングバリオン



磁場 – 宇宙の謎に立ちふさがる**前景・背景**

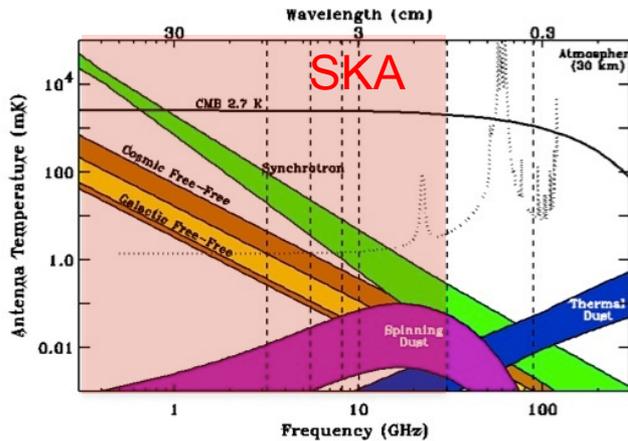
21cm輝線  
宇宙暗黒時代の解明

CMB偏光  
インフレーション理論の実証

高エネルギー宇宙線  
宇宙線の起源

ポイント: 様々な天体の磁場を**包括的に**理解するのが重要

❖ シンクロトロン放射(I,Q,U,V)とファラデー回転測度(RM)を多くの天体で観測できる唯一無二の帯域



NASA HPから

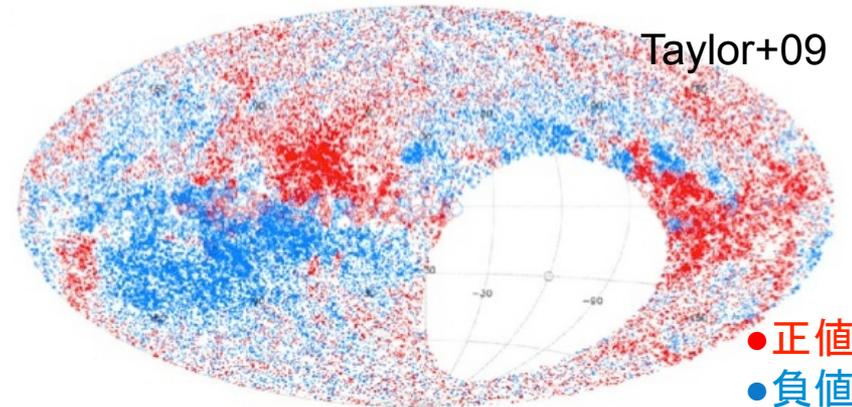
- シンクロトロン放射
- 自由-自由放射
- 回転ダスト放射
- 熱的ダスト放射

天の川銀河の典型的な電波放射の成分

$$I = \int_L^0 C_1(p) n_c B_{\perp}^{(1+p)/2} (2\pi c/\lambda)^{(1-p)/2} dl$$

$$Q + iU = \int_L^0 C_2(p) n_c B_{\perp}^{(1+p)/2} (2\pi c/\lambda)^{(1-p)/2} e^{-2i\chi} dl$$

## 磁場の視線垂直成分



約4万の系外偏波源の全天RM分布

$$\chi = \chi_0 + \text{RM} \times \lambda^2$$

$$\text{RM} = \int_L^0 n_e B_{\parallel} dl$$

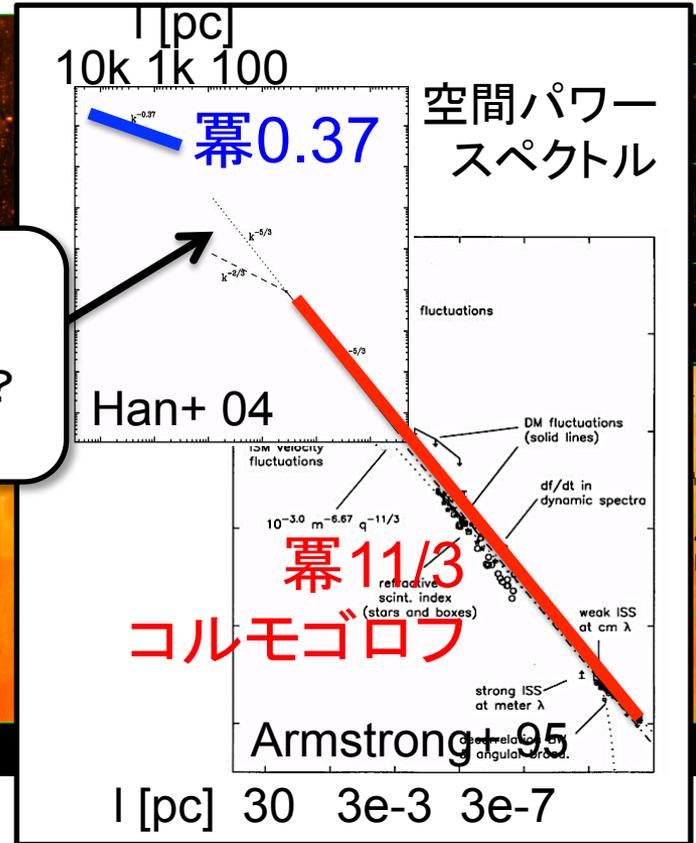
## 磁場の視線平行成分

- 正值
- 負値

# 星間空間の未解決課題： 星間ガスの乱流と磁場の謎



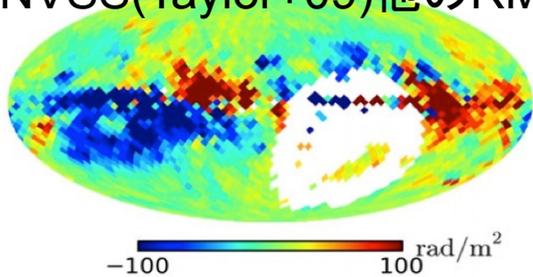
**駆動源サイズ**  
腕~1pc、腕間~100pc?  
円盤内とハローで異なる?  
(Heverkorn+08, Stil+11)



- ❖ 磁場は分子雲形成 & 星形成の効率を決める未知パラメータ
- ❖ 系内の乱流特性(M,  $\beta$ , Reなど)の分布は全くの謎
- ❖ そもそも駆動力は何？(星風・超新星・MRI・伴銀河?)

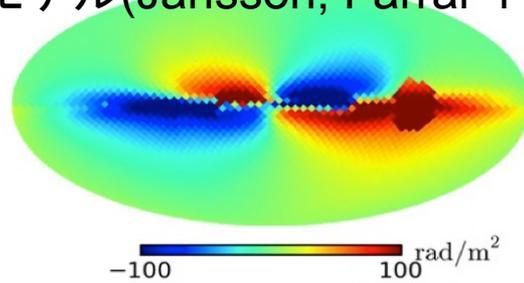
# 銀河の未解決課題： 銀河構造と大局磁場の謎

NVSS(Taylor+09)他のRM

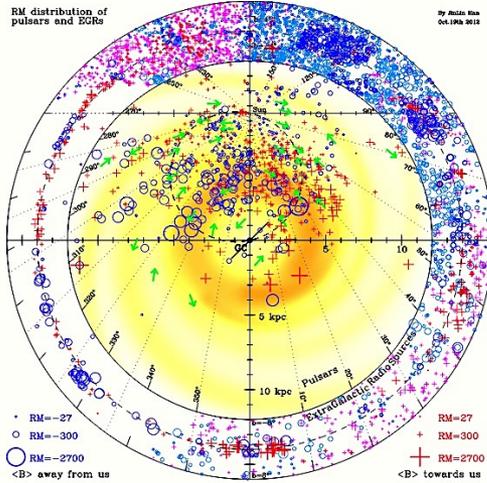
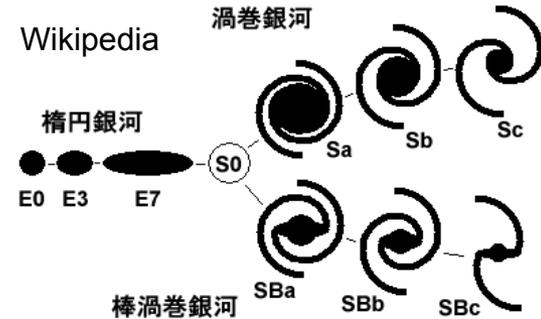


解釈

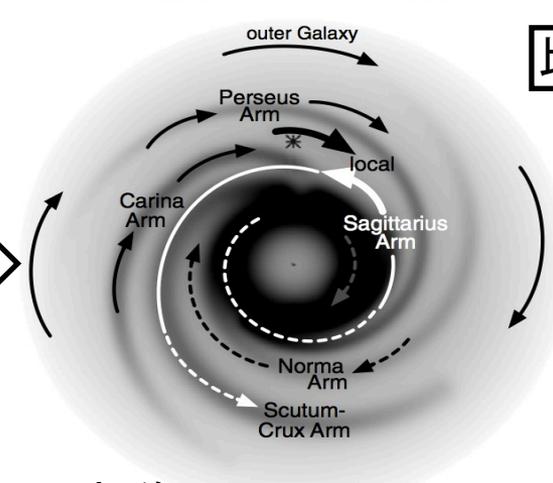
モデル(Jansson, Farrar 11)



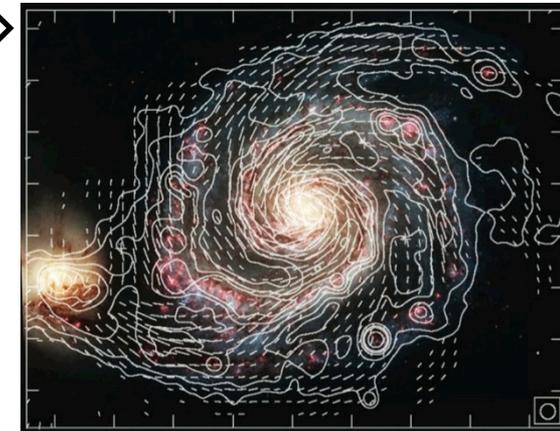
Wikipedia



解釈



比較



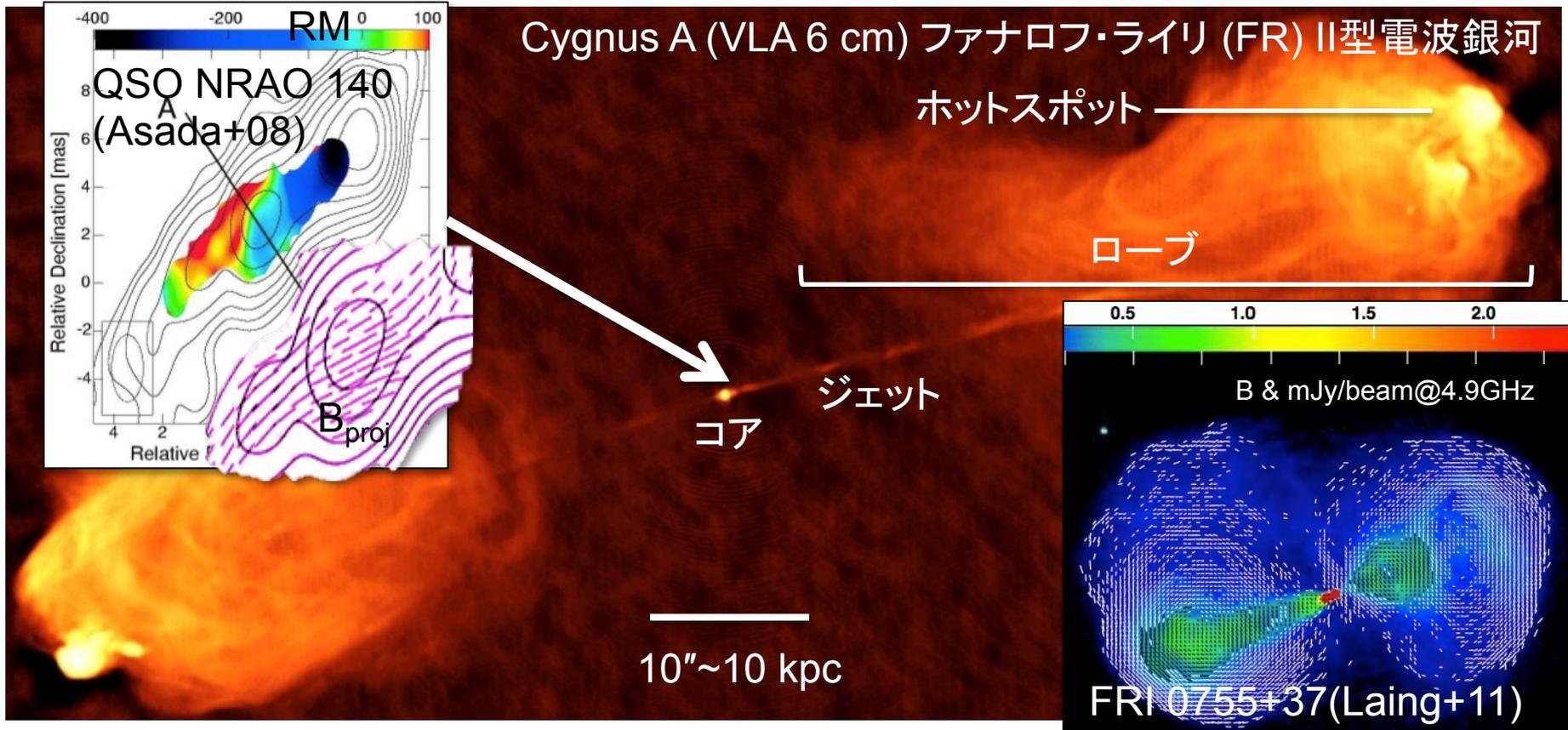
$|b| < 8^\circ$  の RM (Han+15)

想像図 (Van Eck+11)

M51 (Fletcher+11)

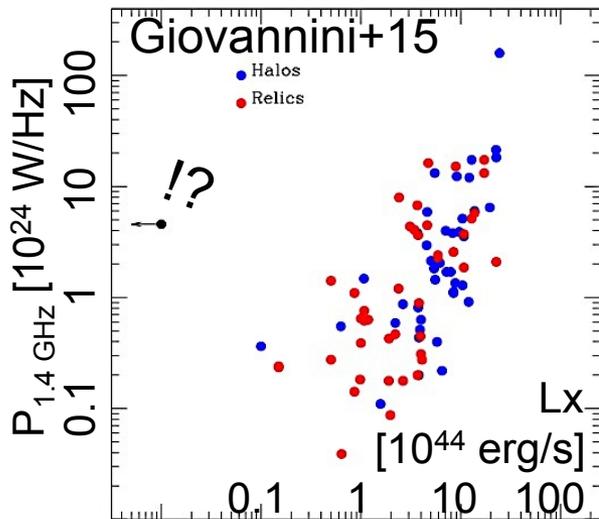
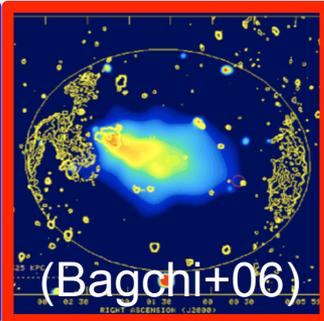
- ❖ 磁場は電離ガスの構造とダイナミクスを決める未知パラメータ
- ❖ 銀河腕・腕間との対応、トポロジー、垂直磁場構造は謎
- ❖ 形態との相関、電波-遠赤外線相関(SN率)、起源と進化は？

# AGN・ジェットの未解決課題： ジェット進化と磁場の謎

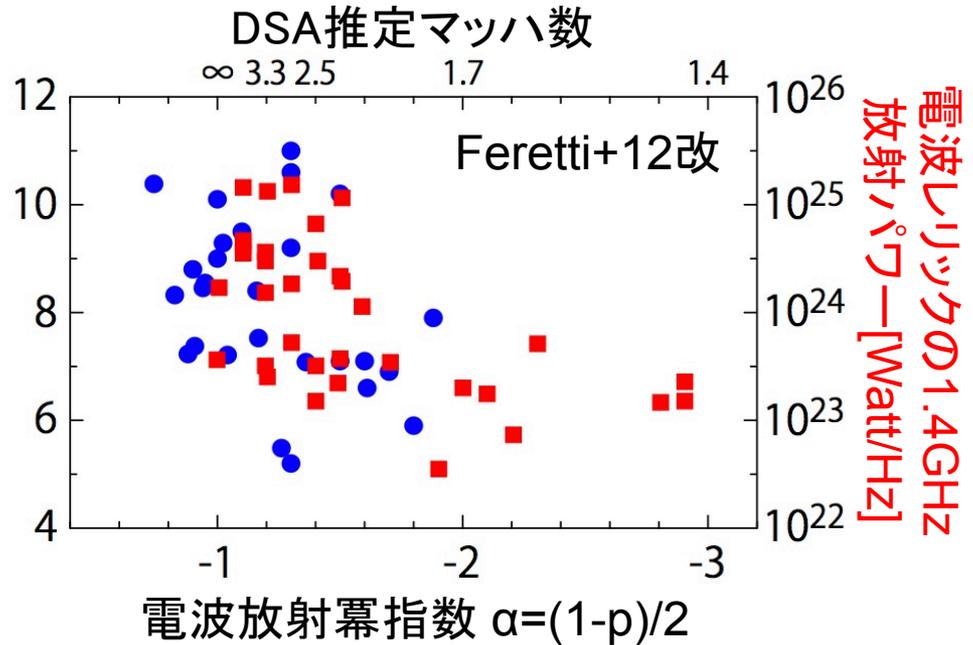


- ❖ 磁場はジェットの基本的(かつおそらく不可欠)な未知パラメータ
- ❖ エンジン、形成維持機構、粒子加速、フィードバックは長年の謎
- ❖ ジェットのパワー、FRI,IIの原因と宇宙論的な分布は？

# 銀河団の未解決課題： 巨大電波放射と磁場の謎



電波ハロー—銀河団  
のガス温度 [keV]

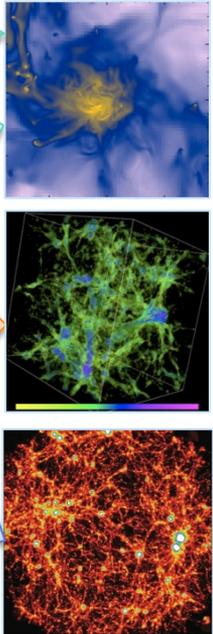
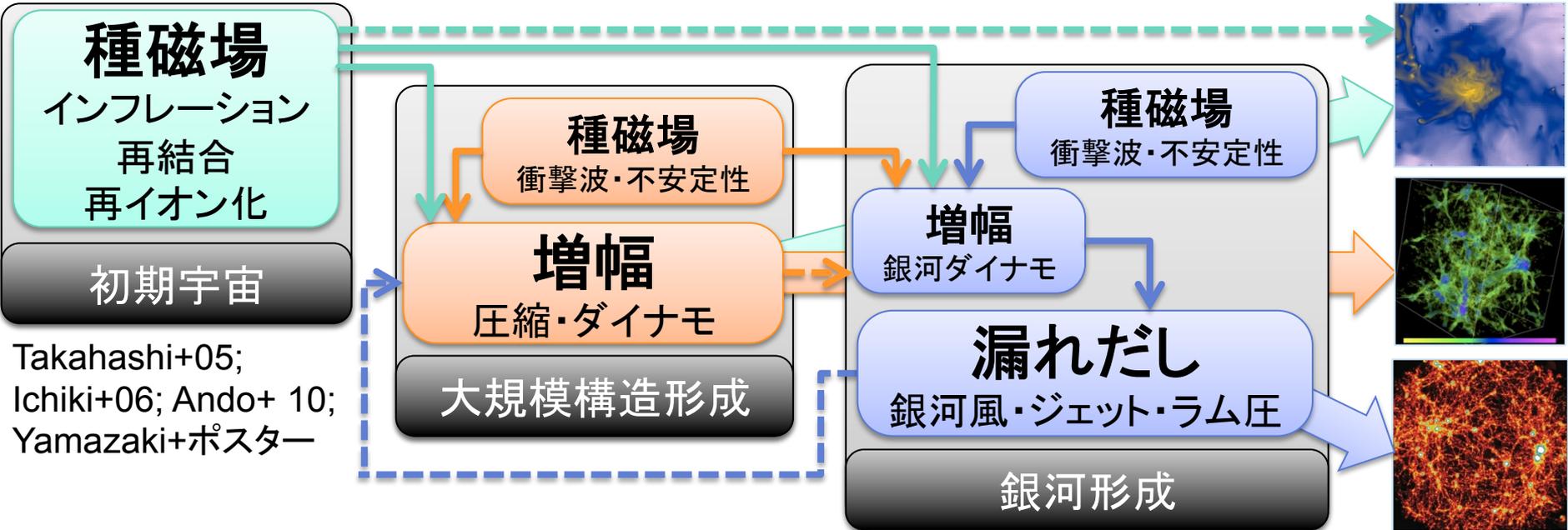


標準衝撃波統計加速(DSA)  
定在衝撃波(電子冷却時間より長い)

$$\alpha_{\text{int}} = -\frac{M^2 + 1}{M^2 - 1}$$

- ❖ 磁場はMpcスケールの巨大電波放射を決める未知パラメータ
- ❖ 銀河団サイズと関係、放射(衝撃波と粒子加速)の物理が謎
- ❖ そもそも銀河団磁場はどこから来たの? その進化史は?

# 大規模構造の未解決課題： ミッシングバリオンと磁場の謎



- ❖ 磁場は銀河団で $\mu\text{G}$ ならフィラメントで10-100nG程度
- ❖ フィラメントの磁場分布は観測的にほとんど謎
- ❖ 磁場はミッシングバリオン発見の決め手となるか？

上から  
Dubois &  
Tessier 08  
Ryu+08  
Donnert+09

## 1. 国際・国内の組織と活動

## 2. サイエンスブックの紹介

### – 未解決課題

- 宇宙磁場の魅力とSKA視点での謎

### – 国際的な戦略

- 最先端の話題を実現性の視点から

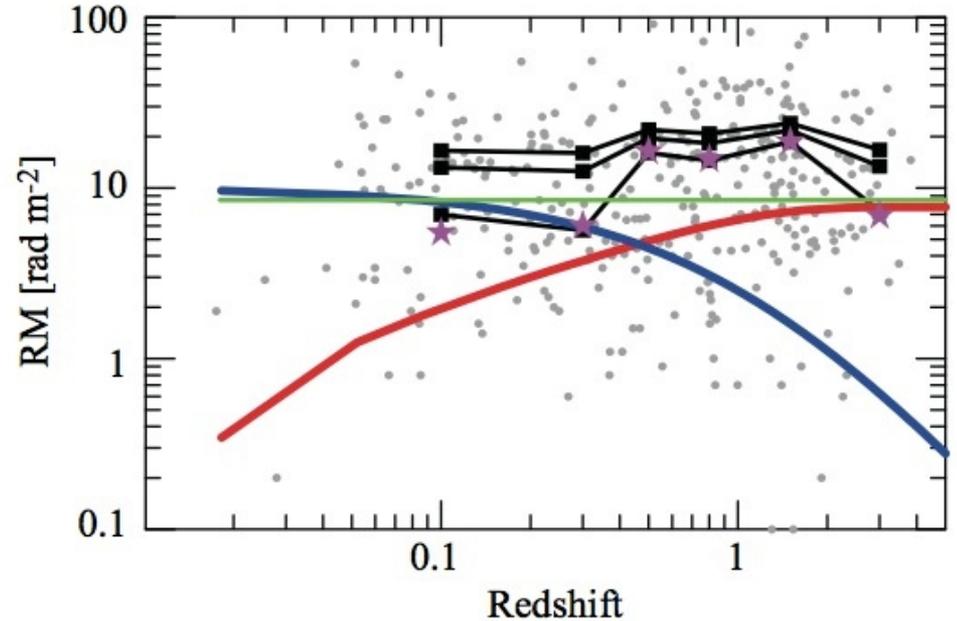
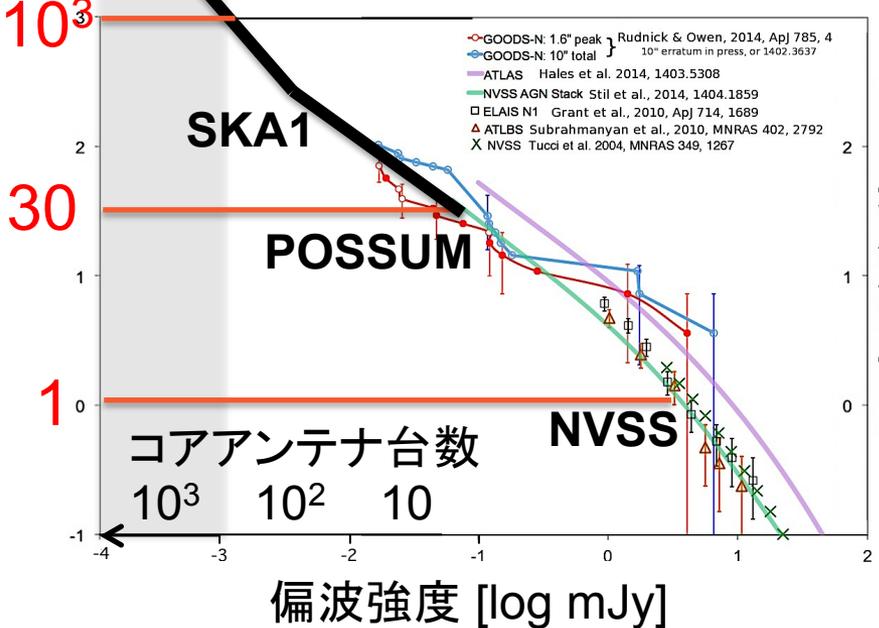
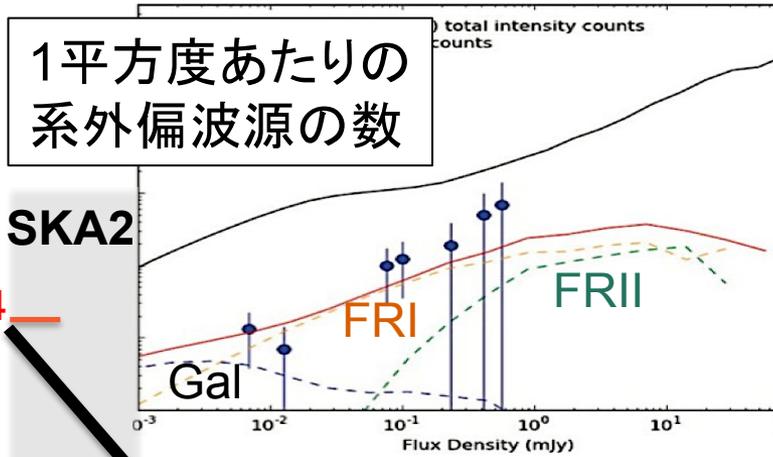
### – 日本独自の戦略

- 独自性(偏波解消とトモグラフィ)
- サイエンス、エンジニアリング、シナジー

## 3. まとめ

### – 期待される成果、科学・技術要求の一覧

# 国際SKA: 感度 RMグリッドで大規模構造を映し出す



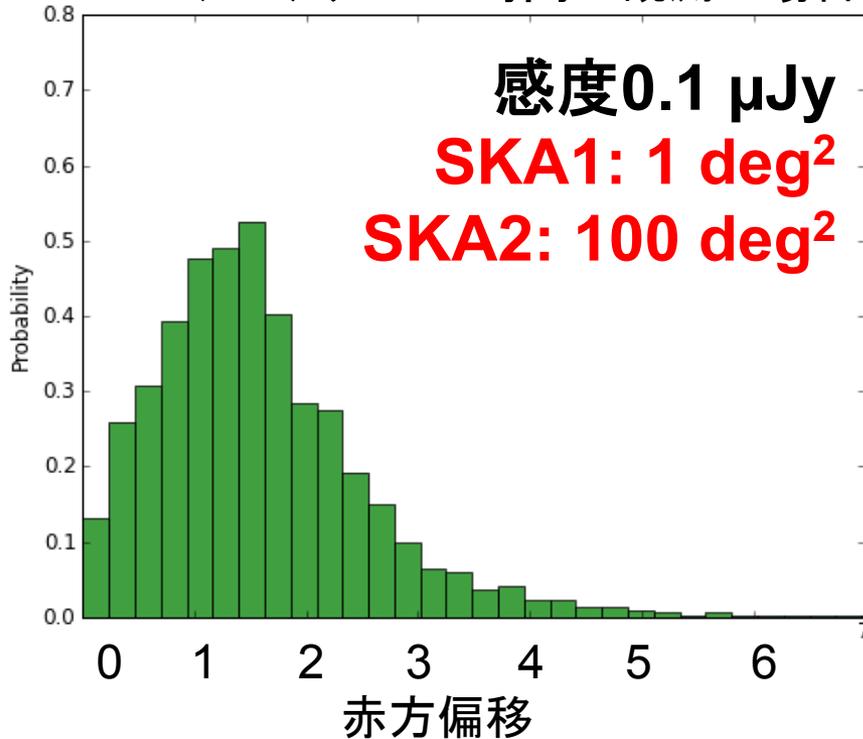
- 銀極方向の観測点
- 誤差考慮後の観測平均
- 天の川銀河磁場の寄与
- 系外偏波源磁場の寄与
- 大規模構造磁場の寄与

RMの赤方偏移依存のモデル(TA+14)

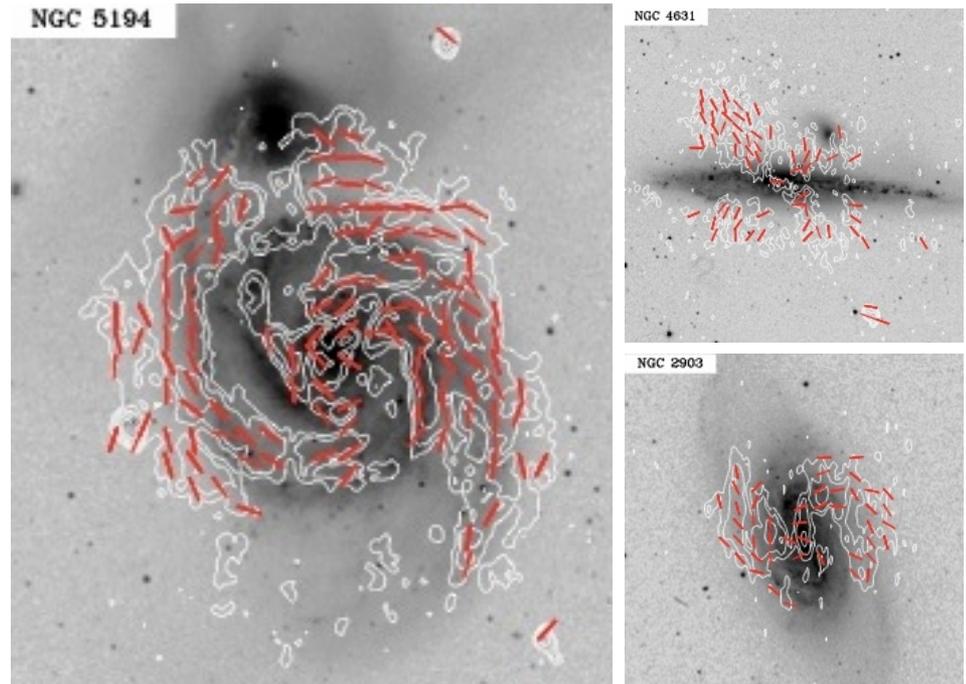
- ❖ すべての磁場研究に進展
- ❖ 銀河間磁場は見つかるか？

# 国際SKA: 感度 どこまで遠くの銀河の偏波を探れるか

MIDアンテナ~100時間の観測の場合



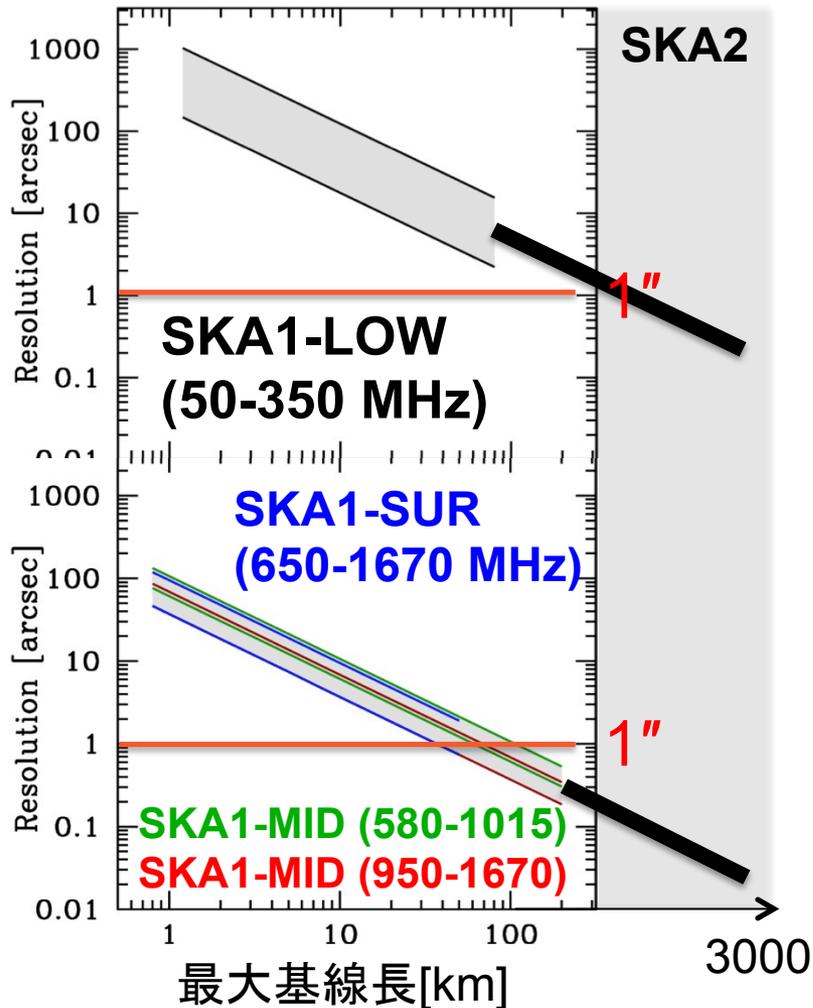
偏波がS/N=10で観測される  
通常銀河の確率分布予想  
(Stil+14)



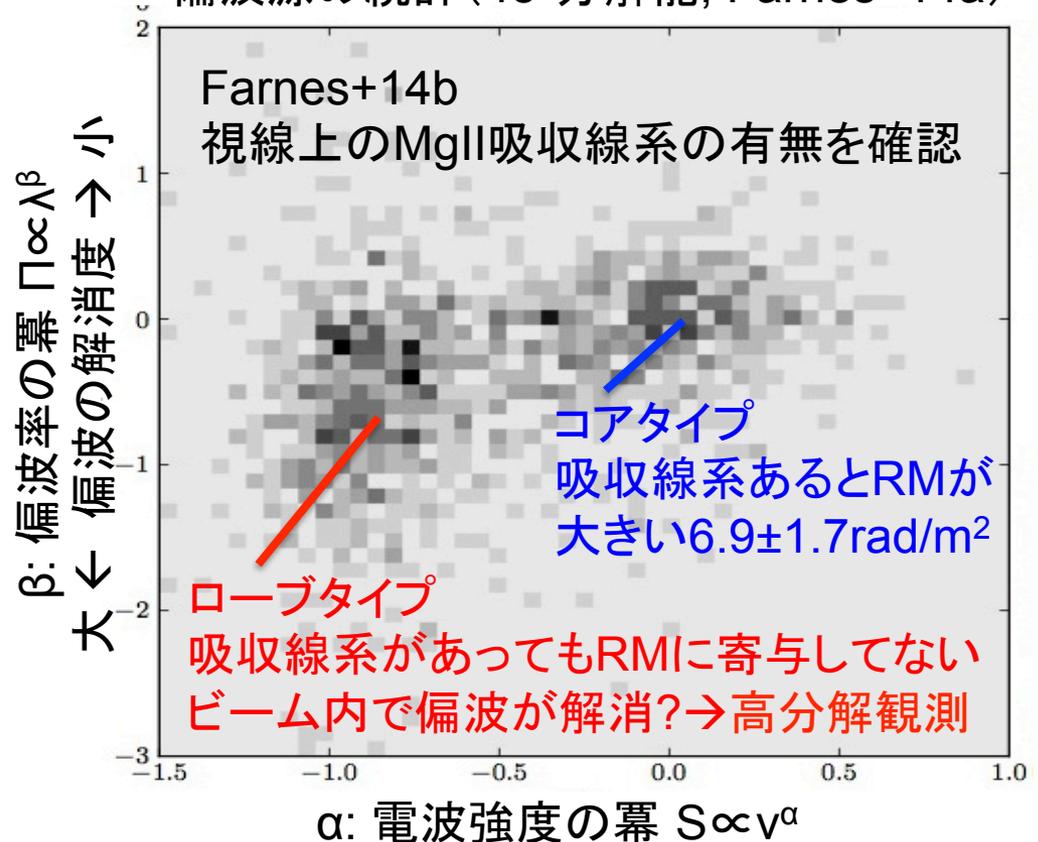
おとめ座銀河団銀河の磁場構造  
WSRT SINGS サーベイ (Heald+ 09)

- ❖ すべての磁場研究に進展
- ❖ 星間・銀河磁場の真の構造は？

SKAの空間分解能予測



偏波源の統計 (45"分解能, Farnes+14a)



- ❖ すべての磁場研究に進展
- ❖ 吸収線系銀河・AGNの進化

## SKAの観測帯域性能予測

Beck+12改

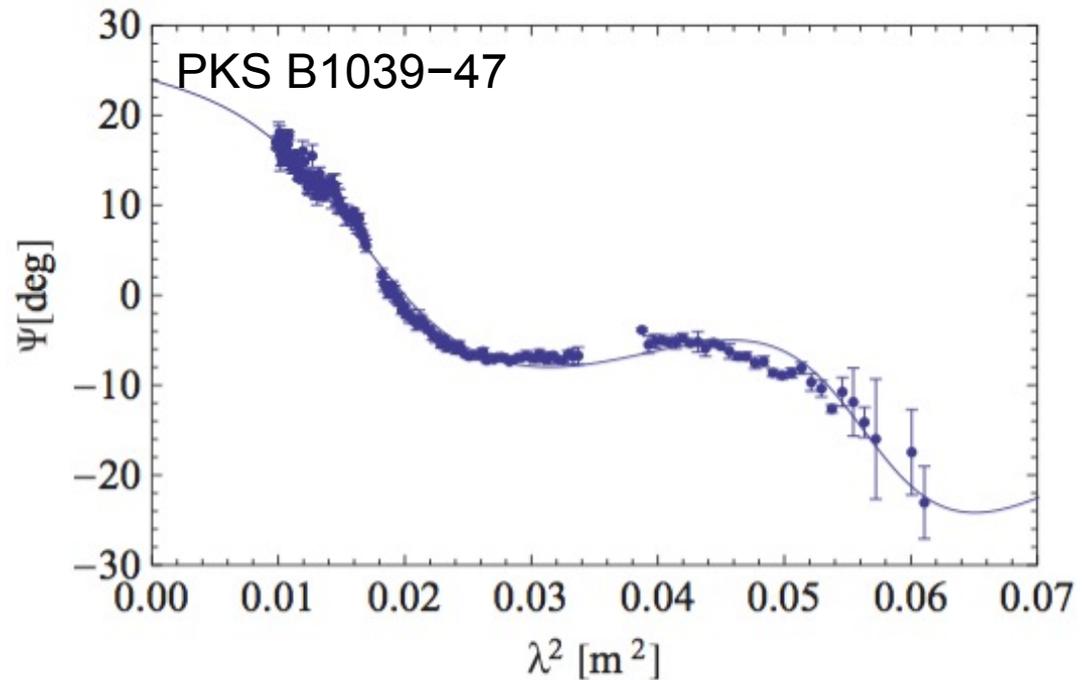
名称	波長の2乗 [m <sup>2</sup> ]				
LOFAR			↔		↔
WSRT	◇		↔		
GMRT	↔		◇		
GMIMS*	◇	↔			
S-PASS*	◇				
GALFACTS*	◇				
JVLA	→	→	→		
ATCA	→				
ASKAP	◇				
SKA1	←	←	←	←	→
SKA2	→	→	→	→	→

λ<sup>2</sup> [m<sup>2</sup>] 10<sup>-2</sup> 10<sup>-1</sup> 1 10 100  
RM [rad/m<sup>2</sup>] 100 10 1 0.1

\*単一鏡観測

GMIMS (DRAO, Parkes, Effelsberg)

S-PASS (Parkes), GALFACTS (Arecibo)



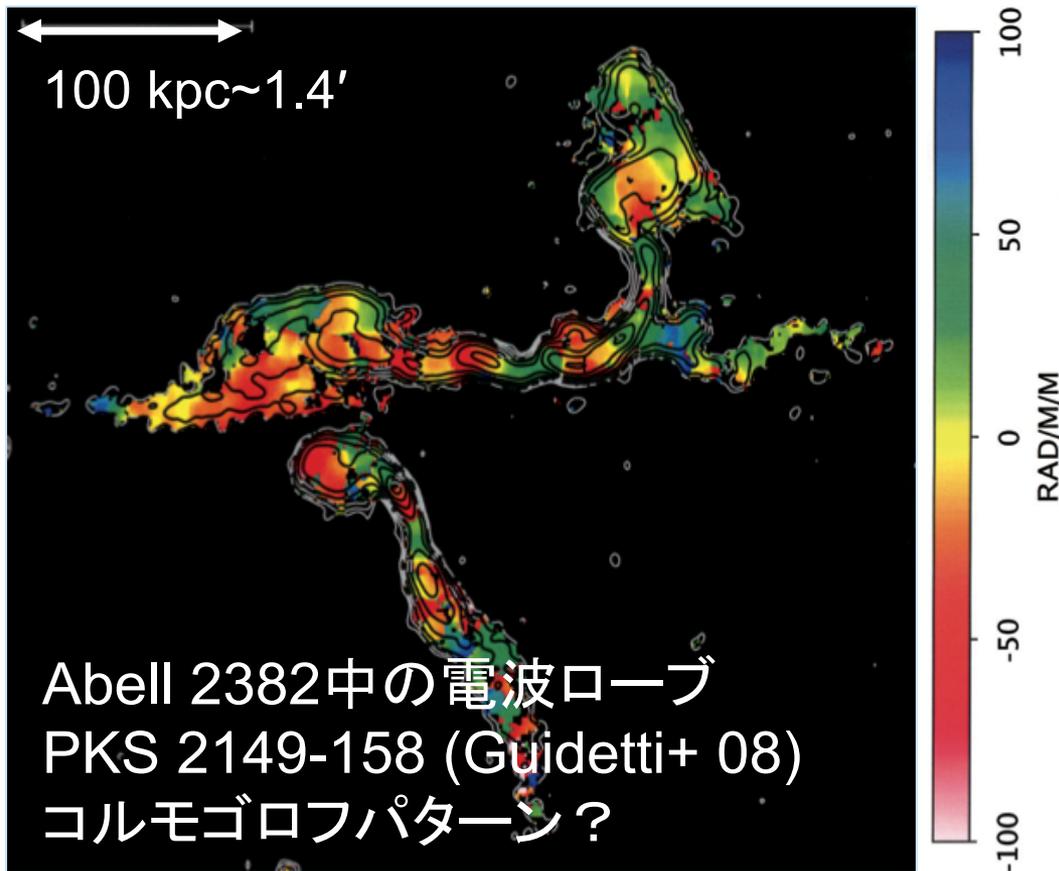
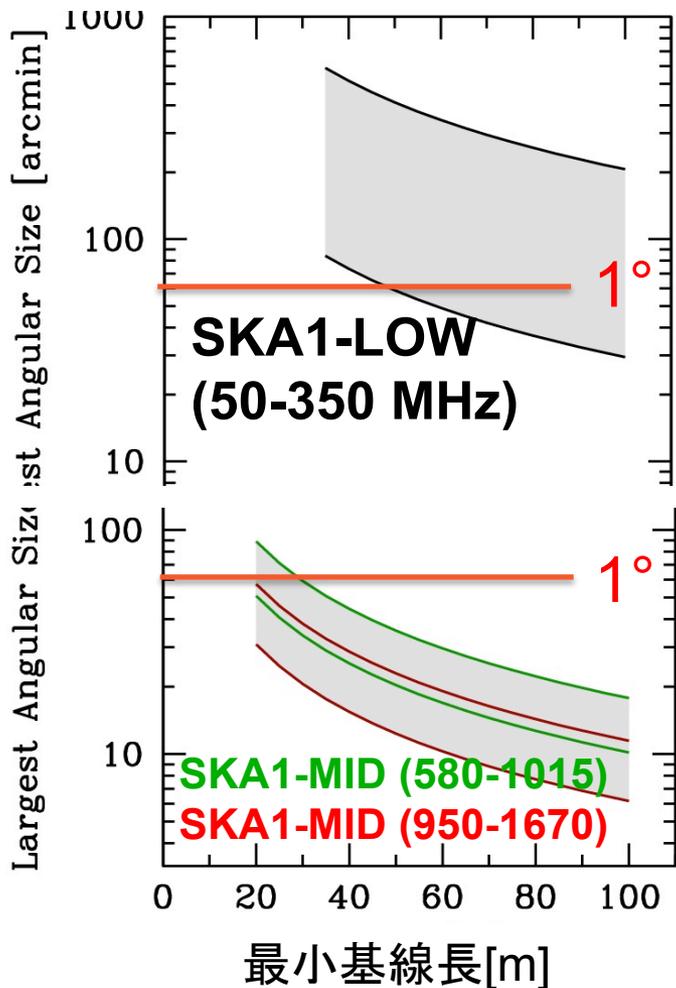
電波銀河の広帯域観測データと  
多成分モデルフィット (O'Sullivan+ 12)

❖ すべての磁場研究に進展

❖ いままでの研究、本当に正しい？

# 国際SKA: 最大検出角度スケール 銀河団の乱流ダイナモ過程の解明へ

SKAでの最大検出角度予測



- ❖ 星間・銀河・銀河団の広がった放射
- ❖ 乱流と宇宙線を生み出す機構は？

## 1. 国際・国内の組織と活動

## 2. サイエンスブックの紹介

### – 未解決課題

- 宇宙磁場の魅力とSKA視点での謎

### – 国際的な戦略

- 最先端の話題を実現性の視点から

### – 日本独自の戦略

- 独自性(偏波解消とトモグラフィ)
- サイエンス、エンジニアリング、シナジー

## 3. まとめ

### – 期待される成果、科学・技術要求の一覧

# 日本の宇宙磁場戦略： キーワードは「広帯域」

## 宇宙磁場研究の魅力

銀河

ジェット

大構造

磁場は宇宙の豊かな  
多様性を作っている

磁場の関わる問題には  
普遍性がある

整列

乱流

加速

特定の天体の磁場だけに注目するのは不十分  
そこで、研究対象は特定しないで、  
広帯域時代の革新的な方法論に注力する!

偏波解消

**偏波解消とトモグラフィーで  
紐解く4次元宇宙磁場**

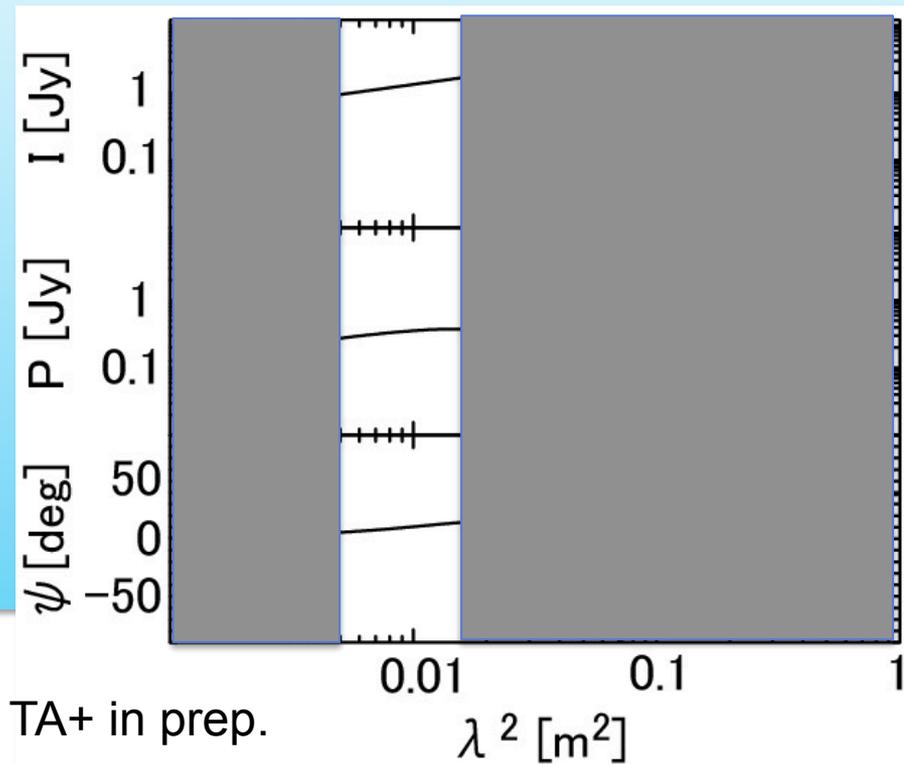
ファラデー  
トモグラフィー

## これから紹介すること

- ✓ 革新的方法論はどのようなものか
- ✓ 革新的方法論で狙う日本の課題
- ✓ 方法論の潜在能力の評価
- ✓ 実現のための技術開発

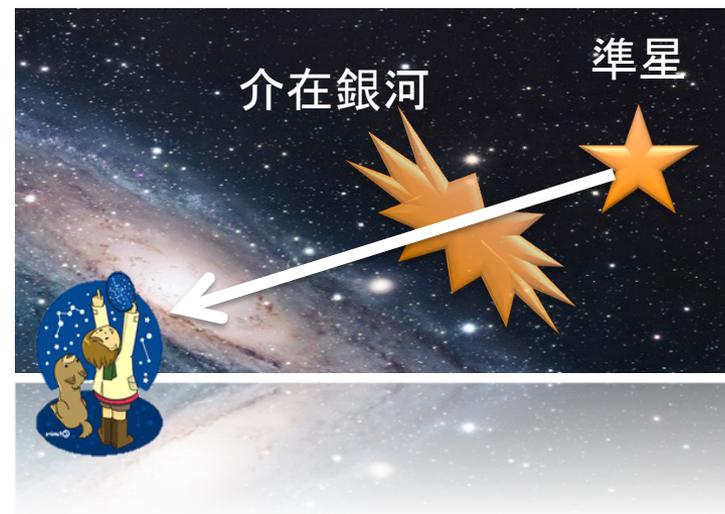
# 日本は革新技术法に着手(1/2): 広帯域→偏波解消

電波強度  $I(\lambda^2)$ , 偏波強度  $P(\lambda^2)=Q(\lambda^2)+iU(\lambda^2)$   
電場ベクトル偏波角  $\psi(\lambda^2)$



狭帯域からの診断  
 $RM=50 \text{ rad/m}^2$

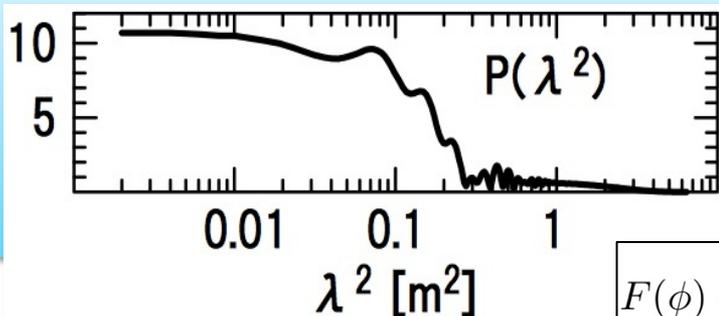
広帯域からの診断  
 $RM=30 \text{ rad/m}^2$   
 $+ \sigma_{RM}=30 \text{ rad/m}^2$



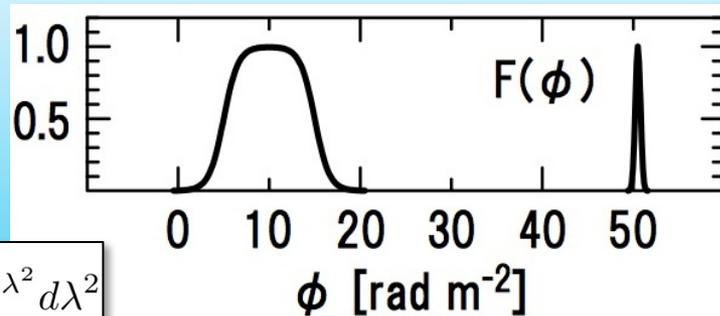
さまざまな「音色」を聞き分ける

# 日本は革新技术に着手(2/2): 広帯域→ファラデートモグラフィ

複素偏波強度  $P(\lambda^2) = Q(\lambda^2) + iU(\lambda^2)$



複素ファラデースペクトル  $F(\phi)$

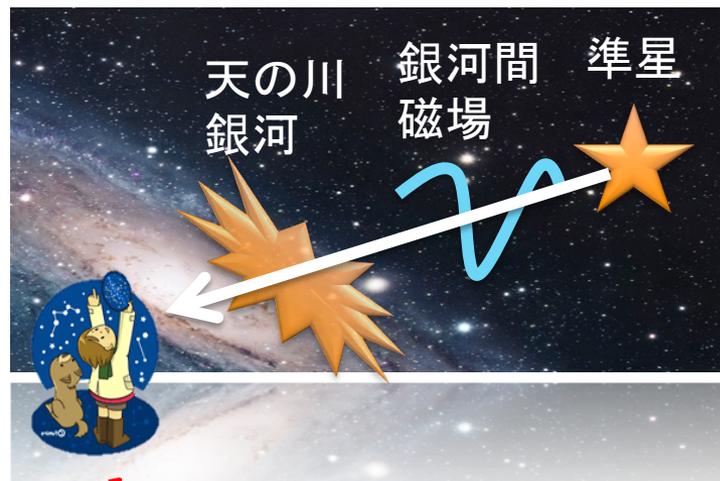


$$F(\phi) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$

積分量からの診断

ファラデートモグラフィ

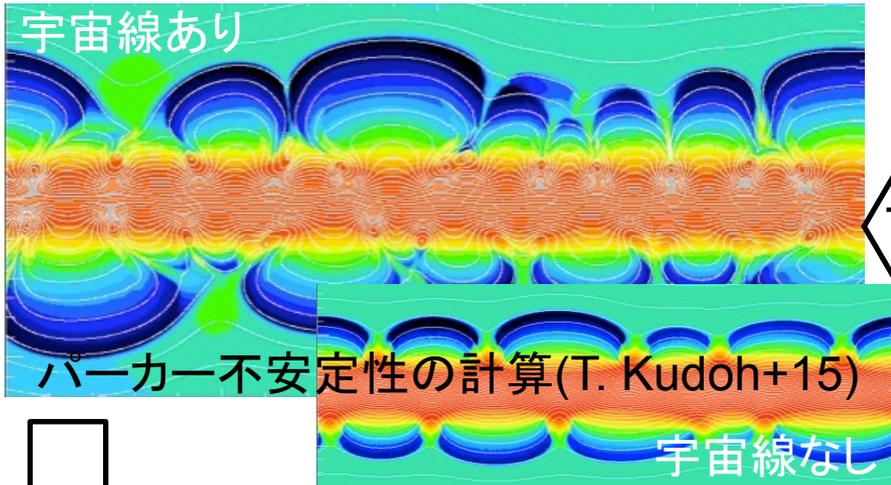
断面量からの診断



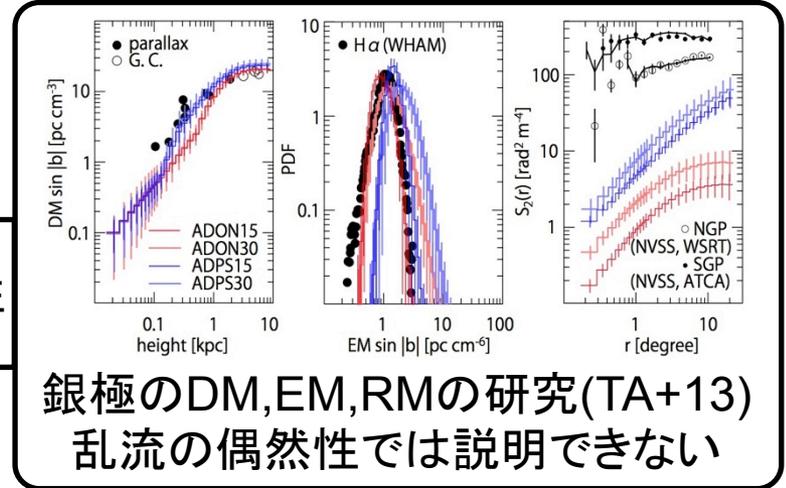
## レントゲンからCTスキャンへ

# 日本SKAその1: 星間・天の川銀河磁場の起源

- ❖ 垂直磁場のアノマリーの起源はパーカー不安定性か？
- ❖ RMの縞模様観測から迫る！



可能性



銀極のDM, EM, RMの研究(TA+13)  
乱流の偶然性では説明できない

周期的に浮上する円盤磁場が  
RMの縞模様をハローに作る

予言

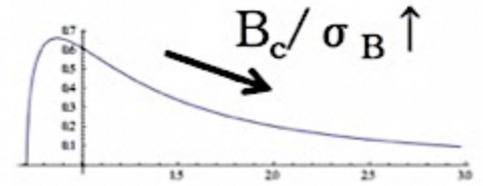
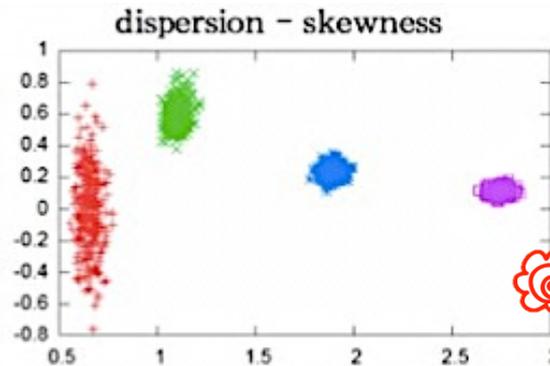
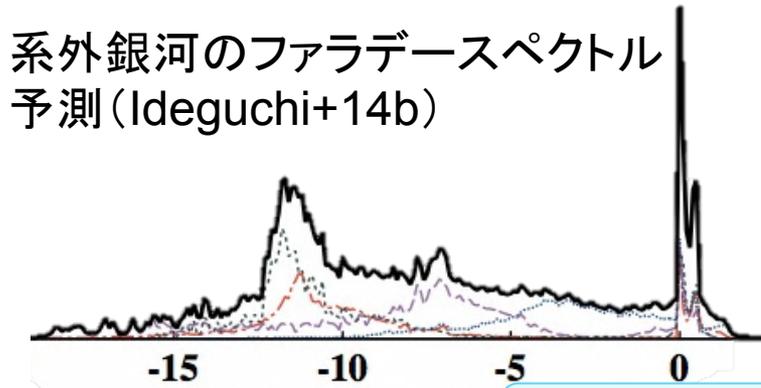
理論  
Machida+13  
Y. Kudo+15

偏波解消 & トモグラフィー  
で背景成分の分離が必要

観測  
Taylor+09

# 日本SKAその2,3: 銀河の磁場構造の現在と過去

❖ 真の銀河磁場構造はどうなっているか？ 偏波+RMの観測から迫る！



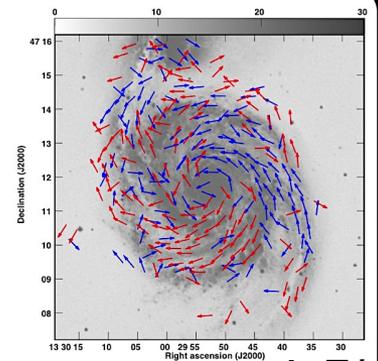
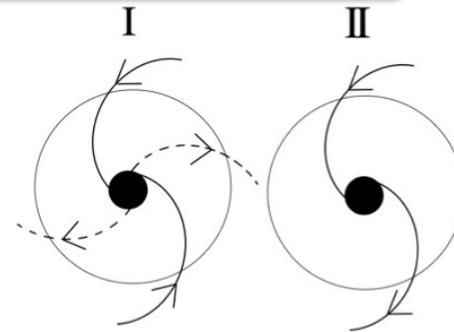
分散・歪度・尖度の調査  
(Tashiro M thesis 2015  
& K. Takahashi+)

Faraday depth

## 偏波解消 & トモグラフィーで精査

	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc
ASS					
BSS I型					N3627, N4414, N6946
BSS II型		N4736		N4321 N5194	N4254, N4535?

ASS: axi-symmetric spiral, BSS: bi-symmetric spiral

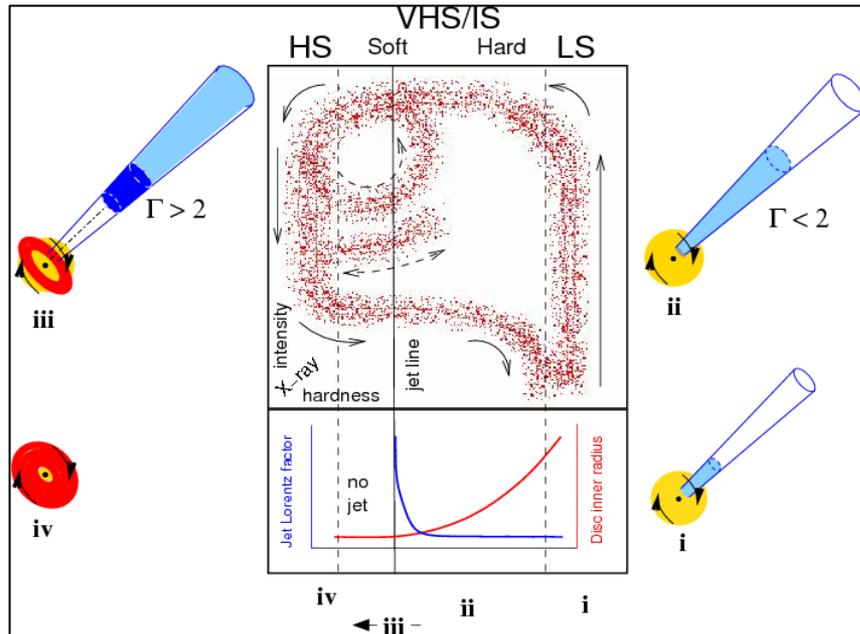


NGC6946はI型

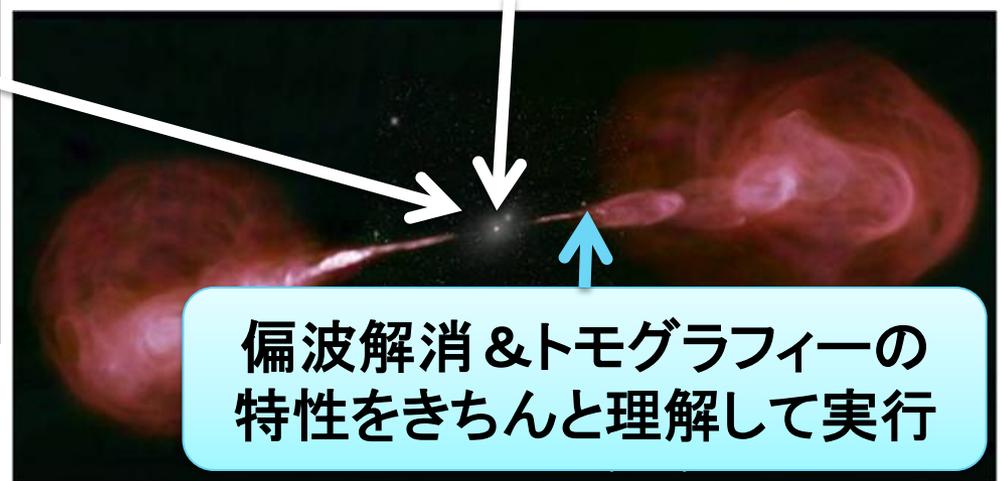
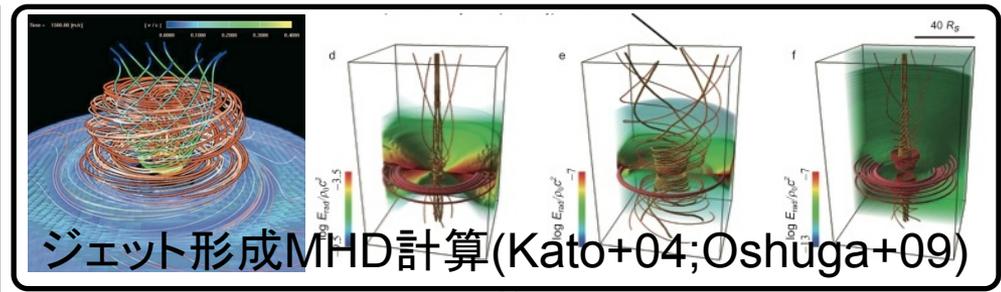
🌸 初期偏波角の推定から得る磁場の幾何とハッブル分類との関係  
(Anraku M thesis 2015, & Nakanishi+)

# 日本SKAその4: 降着円盤とジェット磁場の因果関係

- ❖ ジェットの磁場は「降着円盤の磁場構造」をも反映するか？
- ❖ 高分解の磁場構造観測+X線観測+数値実験で迫る！



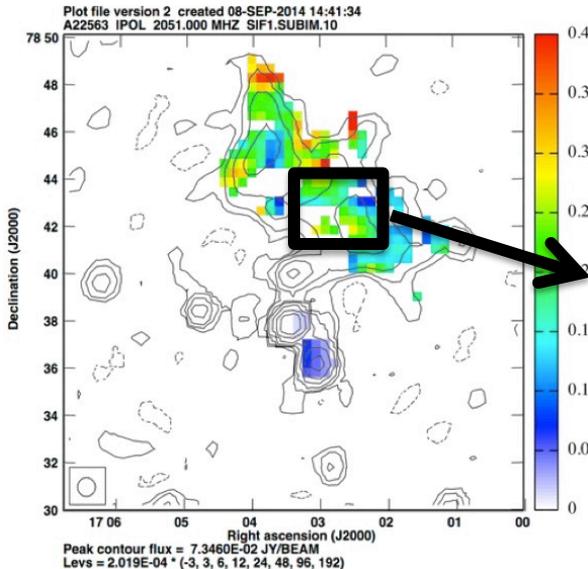
X線状態遷移(Fender+04;10)



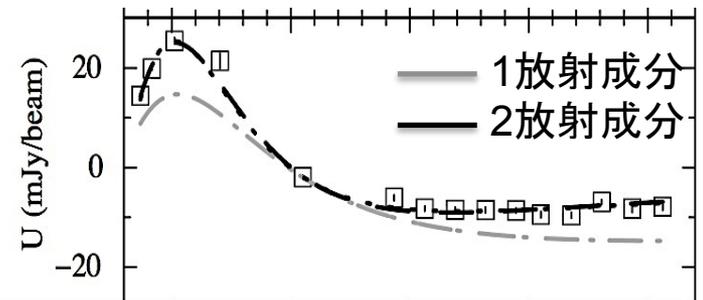
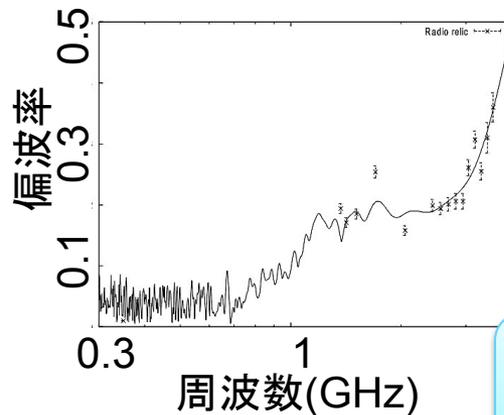
- FRI: 狭輝線、弱質量降着、RIAF的、弱いジェット？
- FRII: 広輝線、強質量降着、Slim的、強いジェット？

# 日本SKAその5,6,7: 銀河団磁場と多波長観測

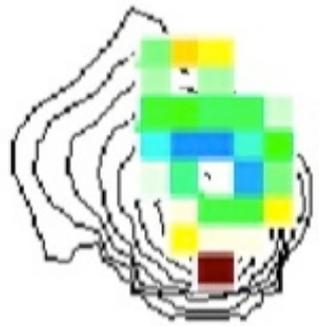
❖ 乱流成長とX線形態は対応するか？ 偏波+RM+多波長から迫る！



**不規則銀河団**A2256電波レリック偏波強度(線)と偏波率(色)、  
スペクトル検定(左:偏波解消、右:トモグラフィー) (Ozawa+15)



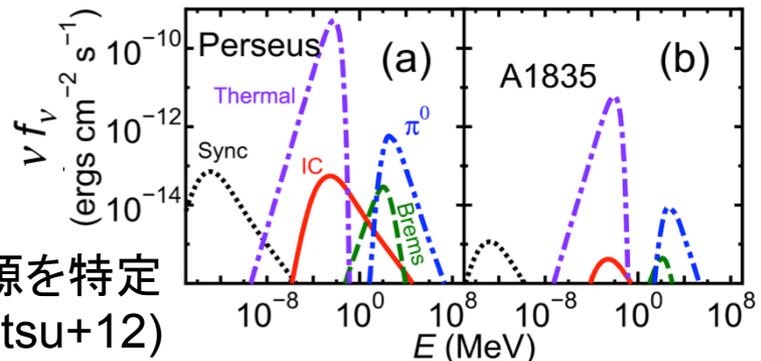
**偏波解消 & トモグラフィーで  
前景・背景の分離に成功！**



**規則銀河団**A1367電波ローブ  
偏波強度(線)とRM(色)

(I. Takahashi M thesis 2015  
& Takizawa+)

電波スペクトル+多波長で起源を特定  
(Fujita+03;12;13;Akamatsu+12)



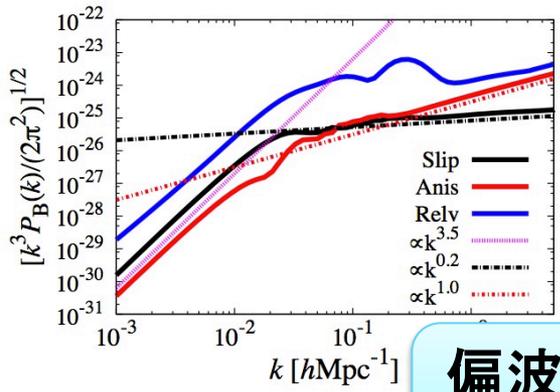
# 日本SKAその8,9,10: 大規模構造の磁場に迫る

- ❖ 大規模構造に磁場はあるか？
- ❖ 背景偏波源のRM観測から迫る！

視野 900 deg<sup>2</sup> 南銀極方向  
— 銀河間 — 観測値 — 抽出後

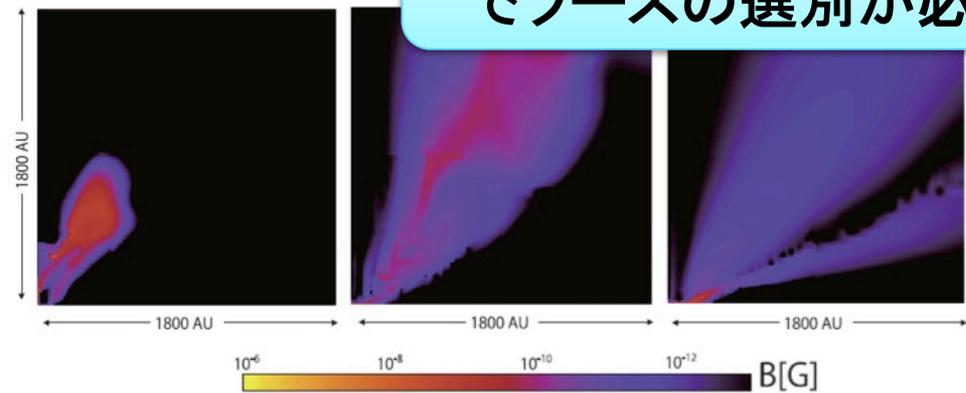
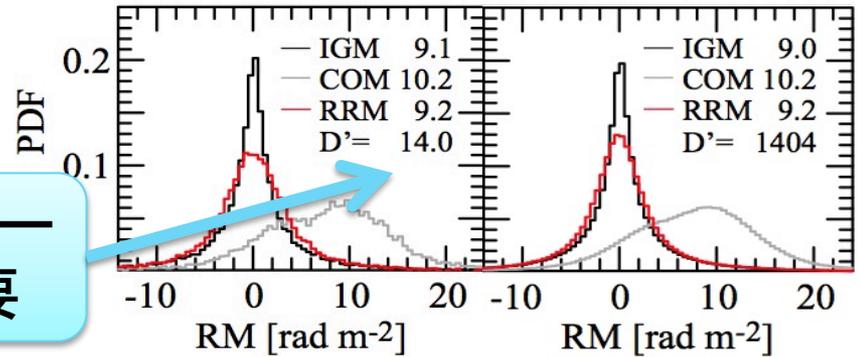
**POSSUM**  
10<sup>2</sup> RM/deg<sup>2</sup>

**SKA2**  
10<sup>4</sup> RM/deg<sup>2</sup>

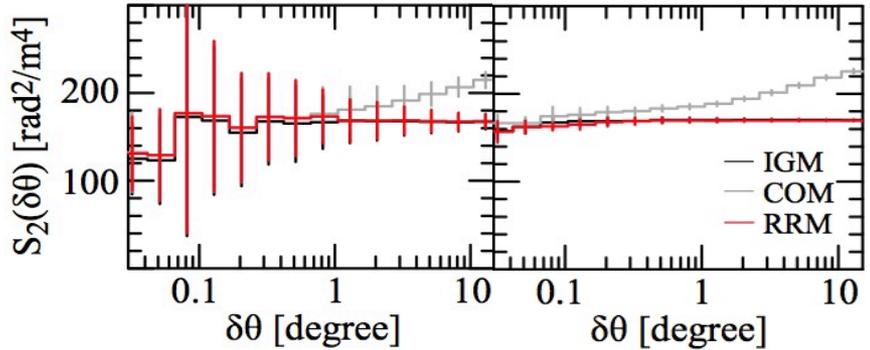


宇宙晴れ上がり期の  
密度ゆらぎで生まれる  
磁場パワースペクトル  
(Saga, Ichiki+15)

偏波解消 & トモグラフィー  
でソースの選別が必要



初代星形成時の降着円盤で生まれる磁場  
(Shiromoto, Hosokawa, Susa 2014)



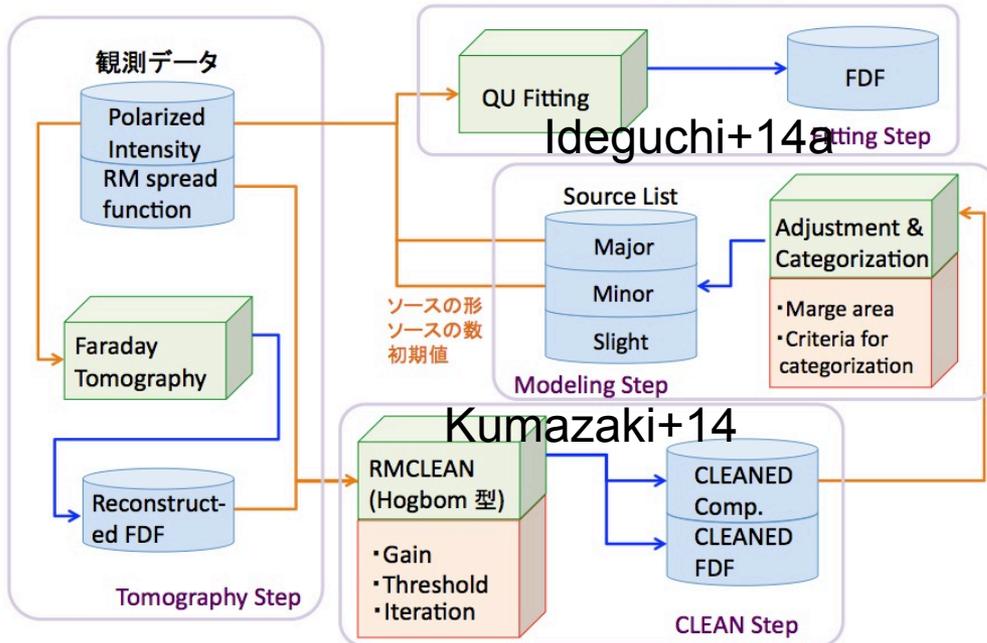
大規模構造RMの統計的抽出 (TA+14b)

# 日本SKAその11: ファラデートモグラフィの開発

- ❖ 実用化のための課題は何か？
- ❖ 独自のソフトウェア開発から迫る！

トモグラフィ開発で我々は  
世界に先駆けています！

## Data Processing



		フィッティングモデル						
		$\delta 1$	G1	$\delta 2$	$\delta+G$	G2	$\delta 3$	G3
模擬観測量	w1g1	99	99	48	90	85	30	86
	w1g2	99	92	85	91	71	84	71
	w1g3	100	100	29	97	37	11	34
	w1g4	98	97	16	90	5	3	4
	w1g5	99	100	33	93	4	18	5
	w2g1	100	100	24	97	42	19	29
	w2g2	100	100	36	98	49	32	32
	w2g3	100	100	12	91	14	0	15
	w2g4	100	100	82	97	93	41	39
	w2g5	98	100	27	99	12	7	3

モデルフィットの際に最適変数検索が  
通常の方法\*では収束しない  
🌸 (Ideguchi Ph.D thesis 2015)

新時代の偏波解析の科学データ処理  
🌸 (Kumazaki Ph.D thesis 2015)

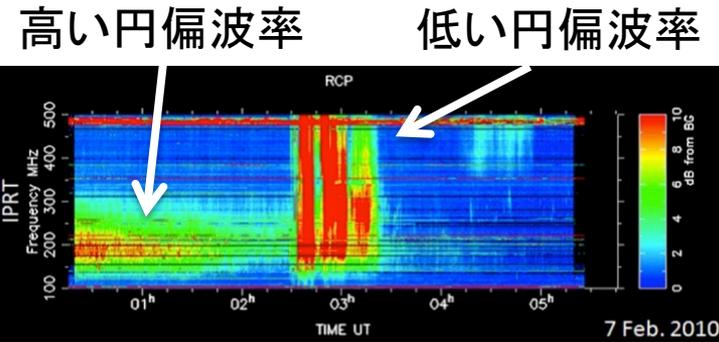
\*Metropolis-Hastings Markov Chain Monte Carlo

## ❖ 他のSKAグループとのシナジー

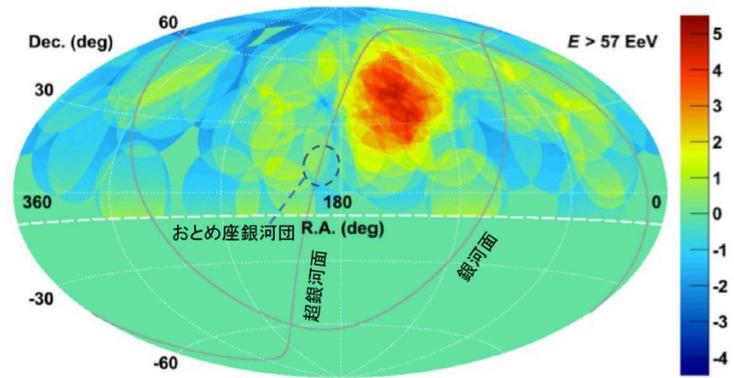
- パルサー・突発天体: DM&RM&SM
- 星間物質: 相転移、乱流、分子雲形成
- 銀河進化: HI銀河と赤方偏移
- 宇宙論: 重力レンズ系統誤差を減らす

## ❖ 他波長観測とのシナジー

- ミリ波・サブミリ波: 星間物質、銀河、ジェットのコアや根元、SZ効果探査
- 赤外線: 電波-赤外関係と星形成
- 可視光: 星間物質、ダスト偏光、吸収線系探査、クロスID (母銀河情報、赤方偏移)
- 紫外・X線: 降着円盤の状態、電離物質の密度や温度、乱流
- ガンマ線・宇宙線: 銀河間磁場



太陽からのメートル波  
電波バースト(Iwai+12)



最高E宇宙線の飛来方向の  
異方性(Kido+14)

## 1. 国際・国内の組織と活動

## 2. サイエンスブックの紹介

### – 未解決課題

- 宇宙磁場の魅力とSKA視点での謎

### – 国際的な戦略

- 最先端の話題を実現性の視点から

### – 日本独自の戦略

- 独自性(偏波解消とトモグラフィ)
- サイエンス、エンジニアリング、シナジー

## 3. まとめ

### – 期待される成果、科学・技術要求の一覧

# まとめ：期待される成果

※日本独自のサイエンスから

## ❖ 宇宙磁場の魅力は多様性と普遍性！

- そこで研究対象は特定せず、しかし最先端の方法論に注力

## ❖ 偏波解消とトモグラフィーで紐解く！

- ✓ 背景・前景の影響を見誤らず、3次元+時間軸で宇宙磁場を探る
- ✓ 銀河の乱流と磁場の強度や相関長の進化史を解明  
→ 星・銀河形成の未知パラメータの一つが決定
- ✓ BHの成長・活動の歴史と構造形成への影響を解明  
→ 降着円盤理論やBH物理、高エネルギー物理が実証
- ✓ 銀河団の乱流進化と粒子加速機構を解明  
→ 低マッハ数環境でのプラズマ物理の特性が実証

## ❖ 究極的には・・・宇宙大規模構造の磁化プラズマの検証！

- 見つかる：ミッシングバリオンの直接証拠。ビックバン標準宇宙論が予言する最後のピースが埋まる→人類史に残る成果！スゴイ
- 見つからない：(1) 宇宙論 (2) 銀河史 (3) プラズマ物理のどこかに重大な見落としがある→研究革命が起こる！スゴイ

# まとめ：科学・技術要求

※偏波の結像・紛れ込み・偏波解消・トモグラフィーから

- ❖ 核となる周波数帯域は350 MHz–3 GHz (MID Band1,2,3)
  - サーベイの効率化&コスト削減のために**広帯域フィード**1台
    - または1視野を広げる→**密開口アンテナ**ないし**フェイズドアレイフィード**(SUR Band1,2,3)
    - または連続波・輝線の同時観測→たとえば**ズームバンド**技術
    - (オプション): **周波数非等分サンプラー**(e.g., ROACH)→ (注) 相乗り検討いる
- ❖ 観測の深さ・広さは主要科学計画(KSP)級、領域は銀極方向を含める
  - **安定した装置とシステム**(**低電力・高信頼性の受信機**や**冷却系**、**管理運営能力**)
  - SKA2 800時間→0.1 $\mu$ Jy感度で南北銀極400平方度 or 1 $\mu$ Jy感度で4万平方度
    - 5年(43.8khr)のうちKSP(連続波) 25%, KSP(輝線) 25%, 公募 10%, メンテ 40%\*なら余裕
  - **KSPで筆頭著者となる**→**メンバー国参加**が必須(0.8k/44k~2%要求)
- ❖ 分解能は 0.1" @ 1 GHz、最大基線長 1000 kmクラス
  - **リアルタイム相関処理**に必要な**データ転送速度幅**は10Gbps以上
- ❖ 最大検出スケール 0.5° @ 1.5 GHz → 1° @ 3 GHz (構想)
  - **ミッシングフラックス**を減らすため**数m基線長の小型干渉計**または**大型単一鏡**の提案
- ❖ 偏波解消・トモグラフィーの科学データ処理
  - **1億偏波源**: **人の手でできる数ではない** → **パイプライン自動処理** → **ソフトウェア開発**

\*VLA→JVLA  
(2010)以降の  
4年間平均