

# 科学報告：宇宙磁場

SKA宇宙磁場グループ

**偏波解消とファラデーモグラフィで紐解く4次元宇宙磁場**

# Contents

- 宇宙磁場研究の重要性
- 宇宙磁場の観測
- 国際SWG-MAGのサイエンス
- 日本SWG-MAGのサイエンス
- SKA先行機での活動
- 日本SWG-MAGの活動実績
- comensality

## 評価の観点

- 研究の壮大さ、重要さ
- 研究の論文の数
- 獲得資金
- メンバーの規模 (特に学生の数)
- 国際性と国際的な競争力
- 研究の発展性
- 独自性と新規性
- 実現可能かどうか
- 他のSWGとのcomensality

サイエンスからの評価

# 宇宙磁場研究の重要性

# 磁場は物質進化を探る要

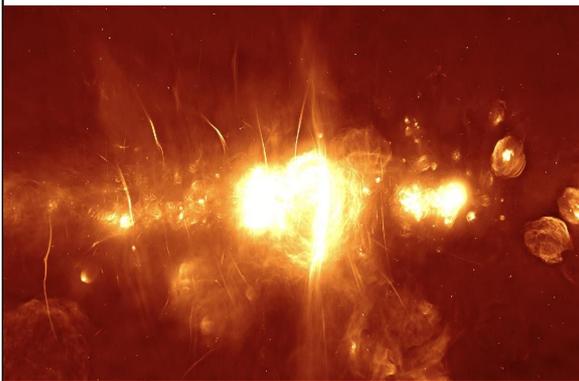
pc スケール



image credit : SKA conference 2021

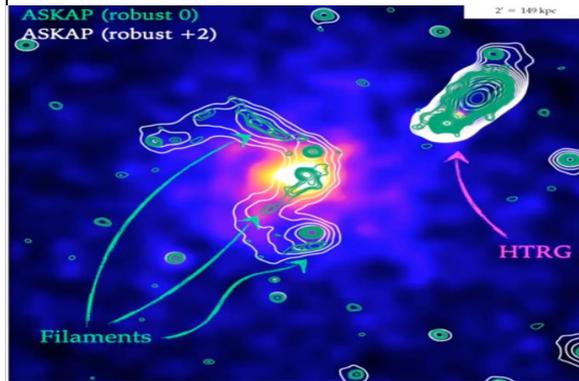
- ・星間ガス乱流の駆動力は？
- ・HII領域や超新星残骸の物理

kpc スケール



- ・AGNフィードバック
- ・衝撃波と粒子加速の物理

Mpc スケール



- ・宇宙大規模構造の磁場
- ・宇宙磁場の起源

## 現代物理学の謎に立ちふさがる課題

中性水素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

# 宇宙磁場の観測

- シンクロトロン放射

$$P = Q + iU \propto n_c B_{\perp} e^{2i\chi_0}$$

Q, U: ストークスパラメーター

$n_c$ : 宇宙線電子の密度

$\chi_0$ : 初期偏光角

- ファラデー回転

$$\chi = \chi_0 + RM\lambda^2 \quad \text{RM} = 0.81 \int_x^0 n_e B_{\parallel} dx'$$

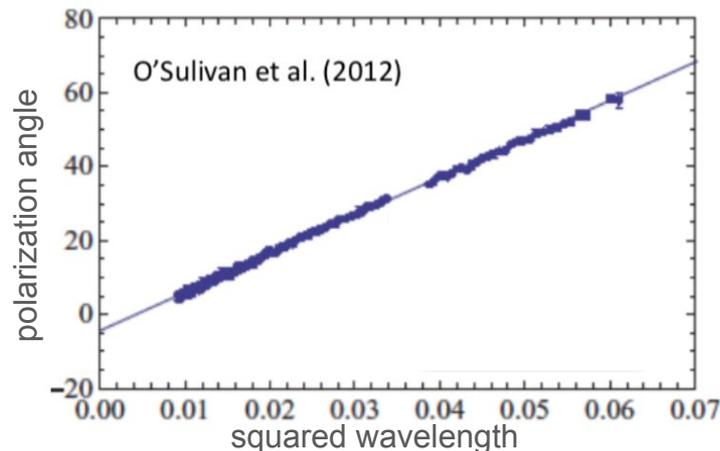
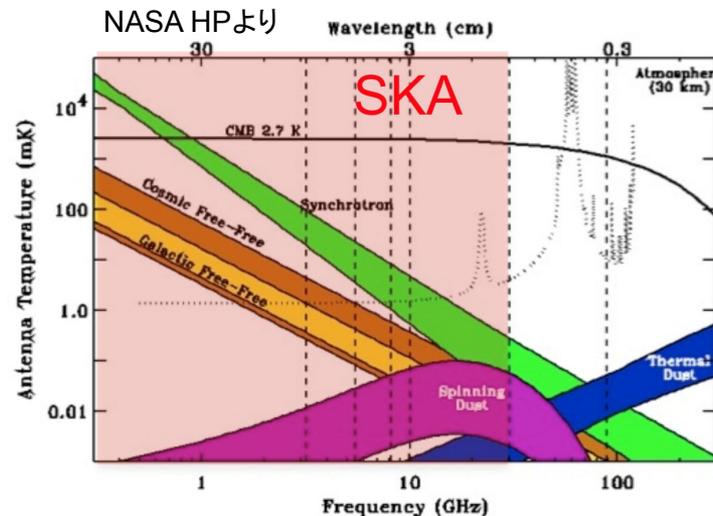
$\chi$ : 観測される偏光角

$\lambda$ : 観測波長

$n_e$ : 熱的電子密度

$x$ : 観測天体までの距離

SKAの帯域はシンクロトロン放射とファラデー回転を多くの天体で観測できるとも恵まれた帯域



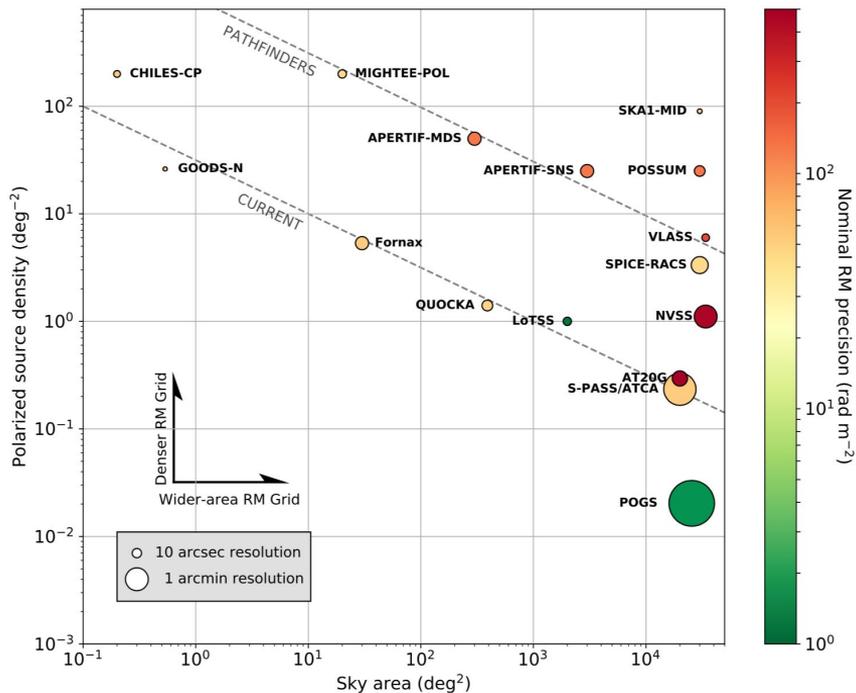
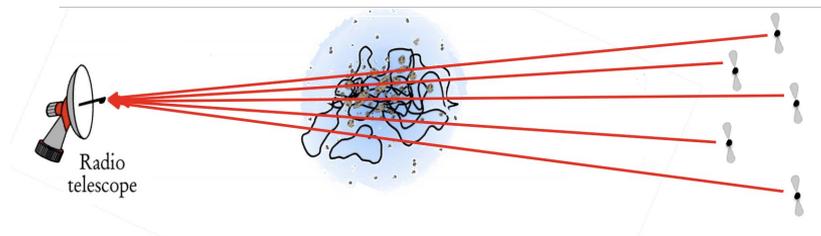
# 国際SWG-MAGのテーマ

## RM grid

背景の明るい偏波源からの放射 & ファラデー回転によってその間にある天体の磁場を測ることができる

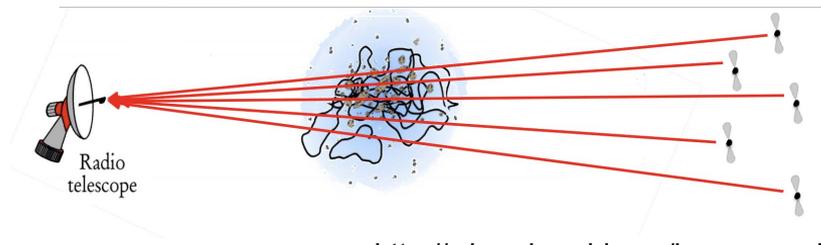
全天の電波源を探索し、多数のRM観測点を得るプロジェクト。SKA時代では全天でかつ超高密度のRM grid! ( $\sim 100/\text{deg}^2$ )

特定の天体の磁場研究に特化せず、天の川銀河、系外銀河など様々な天体の磁場構造を包括的に調べる



Heald et al. (2020)

# 国際SWG-MAGのテーマ



<http://whereiswaldo.co/images-waldo/>

## RM grid



~2010, VLA  
1/deg<sup>2</sup>



~2020, ASKAP  
30/deg<sup>2</sup>



~2030, SKA1  
100/deg<sup>2</sup>



~2040, SKA2  
1000?/deg<sup>2</sup>

RM観測点が増えればそれだけより鮮明な磁場の 2次元map(トモグラフィーを使えば3次元)が得られる！

→前景と区別して大規模構造に磁場があることがわかる

→磁場のパワースペクトルを用いてかなり細かい乱流のコヒーレンススケールがわかる

# 国際SWG-MAGのサイエンス1

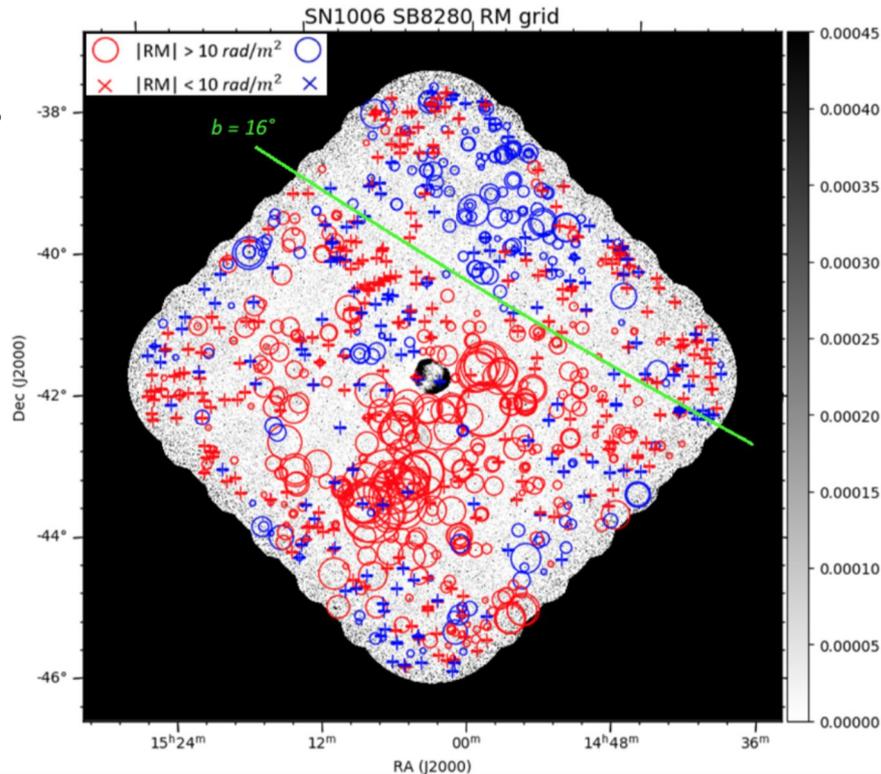
## ASKAP pilot survey Result

Polarisation Sky Survey of Universe's Magnetism (POSSUM)



SN1006 fieldのRM grid結果。~29/deg<sup>2</sup>, 1040の偏波源を検出。同じ領域で以前ATCAで検出された偏波源は12天体

SKA-JPからも赤堀、出口、高橋、宮下がこのデータの解析に参加している

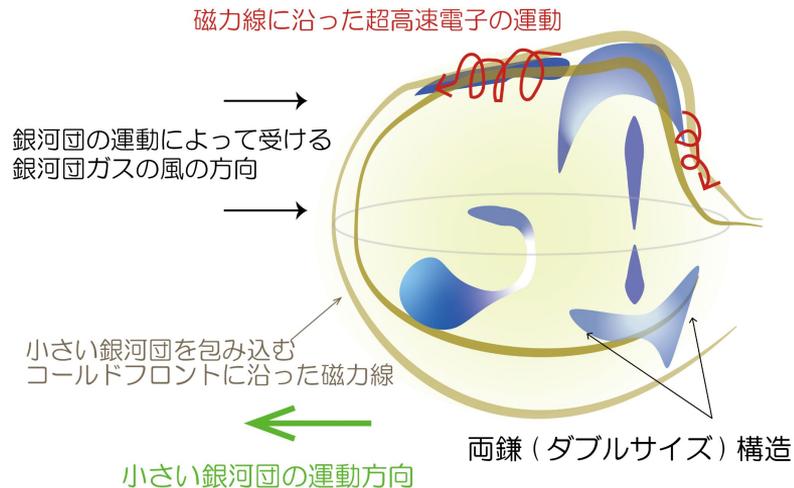
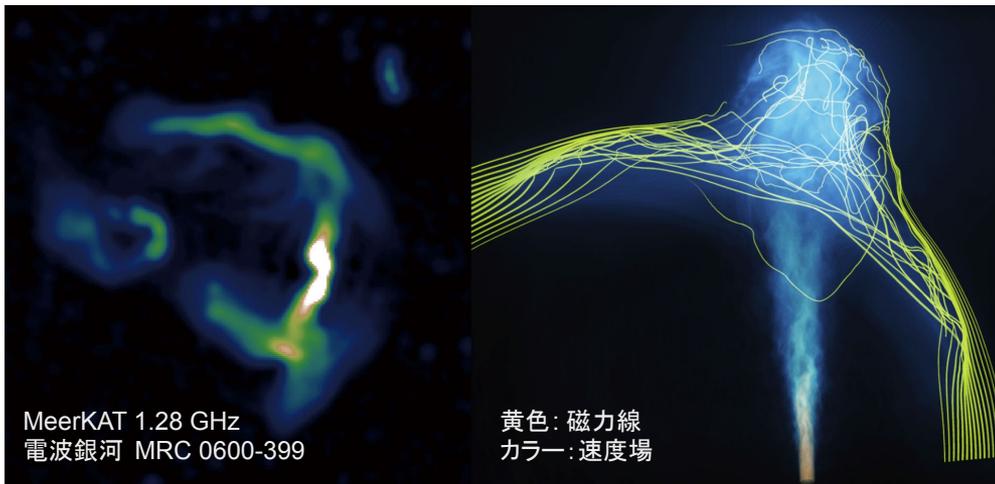


West et al. (2019)

# 国際SWG-MAGのサイエンス2

## MeerKAT observations MRC0600-399 [Chibueze, Sakemi, Ohmura et al. 2021, Nature]

- ・MeerKATの非常に高いダイナミックレンジによって、電波ジェットの特徴が方向と反対側に放射を持つ両鎌(ダブルサイズ)構造を描き出すことに成功.
- ・磁気流体シミュレーションから銀河団を包み込む大局的磁場との衝突によって両鎌構造を説明
- ・SKA-JPから 酒見、大村、町田、赤松、赤堀、中西、竹内が本プロジェクトに参加



# 国際SWG-MAGのKSPまとめ

SKA Key Science Workshop 2019より

		All Sky	Band 2	LOW	Band 1	Band 2	Band 5	Area
KSP 1	The magnetic field in clusters and filaments	[Green bar]						Band 1 60 sq. deg, Low all sky
	Probing the nature of Dark Matter	[Green bar]		[Green bar]				10 fields
	The magnetic cosmic web	[Green bar]		[Green bar]				100 sq. deg
KSP 2	Line of sight probes of evolution of cosmic magnetism	[Green bar]						All sky
	Evolution of the magnetic fields in galaxy disks					[Green bar]		10 sq. deg
	Broad-band polarimetry as a probe of AGN	[Green bar]						All sky
	Magnetic fields in AGN at all redshifts and luminosities						VLBI	VLBI follow up
	Emergence of magnetic fields in the Universe	[Green bar]						All sky
	Magnetic fields in nearby galaxies							25 - 30 sources
	Magnetic fields in the heart of the Milky Way	[Green bar]						4000 sq. deg
Multi-scale magnetism in the Milky Way	[Green bar]						30,000 sq. deg.	

## 日本版サイエンスブック

- 6.3.2 銀河磁場の起源と進化
- 6.3.3 近傍銀河の4次元磁場構造
- 6.3.4 遠方銀河の偏波特性
- 6.3.5 AGNジェット・核周円盤の磁場構造
- 6.3.6 銀河団乱流の形成と進化の解明
- 6.3.7 銀河団電波ハローの多波長観測
- 6.3.8 銀河団電波レリックの起源の解明
- 6.3.9 宇宙大規模構造の探査
- 6.3.10 宇宙論的磁場生成
- 6.3.11 宇宙磁場の宇宙論的進化

日本SWG-MAGはこれまで国際SWG-MAGのKSPに沿ってSKAでのサイエンスを検討してきた

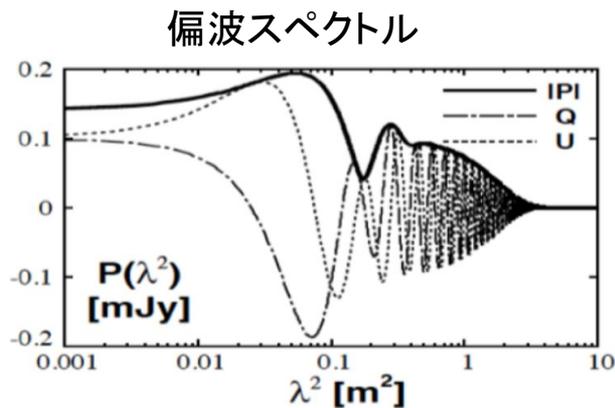
## 日本の強み

- ・シミュレーションを用いた理論研究
- ・先進的な方法 (ファラデーモグラフィ) を用いたサイエンス検討

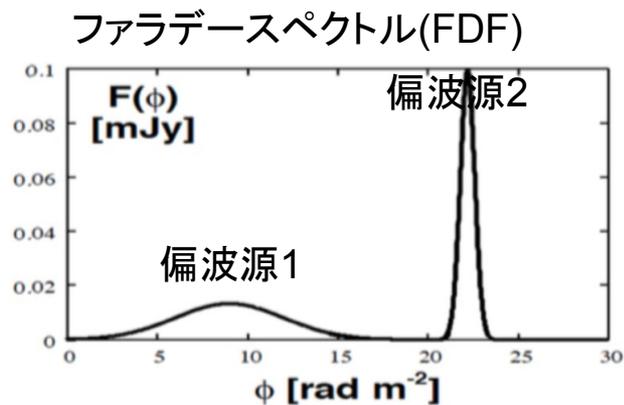
# 日本SWG-MAGのテーマ

## 偏波解消とファラデーモグラフィーで紐解く4次元宇宙磁場

特定の天体の磁場に注目するのではなく、広帯域時代の革新的な方法論に注目



フーリエ変換



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

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

# 日本SWG-MAGのサイエンス1

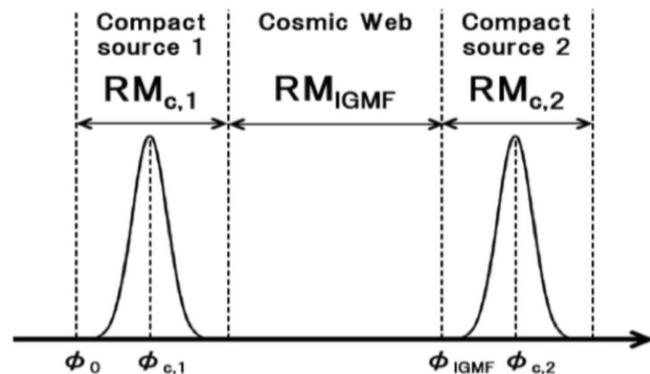
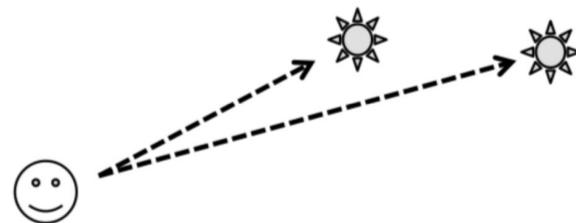
## ファラデーモグラフィを用いた銀河間磁場探査

大規模構造フィラメントに付随する銀河間磁場には、構造形成によって"汚されていない"宇宙初期の情報が眠っており、その観測によって宇宙進化の謎や宇宙磁場の起源に迫ることができる。

銀河間磁場はFDF上における2つのcomponentのgapによってその強度を見積もることができる(Akahori et al. (2013))

そのgapがRM空間の分解能よりも優位に大きい値であれば、それは銀河間磁場をFDF上で分離できたことになる

SKA先行機を用いた定量的な見積もり  $RM_{IGMF} = 3 \text{ rad/m}^2$   
(Ideguchi et al. (2014a))



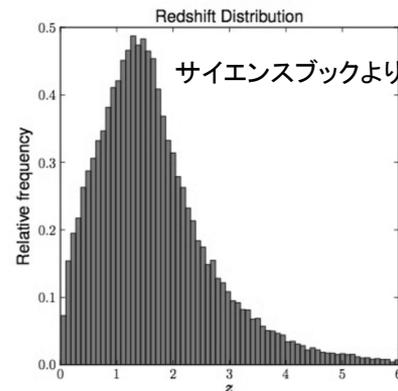
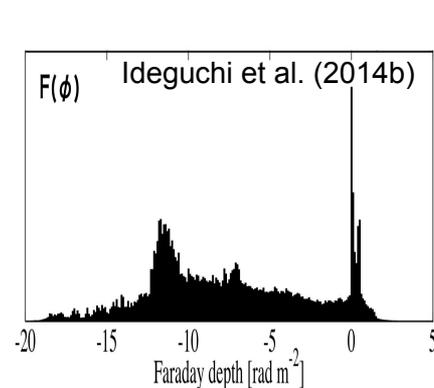
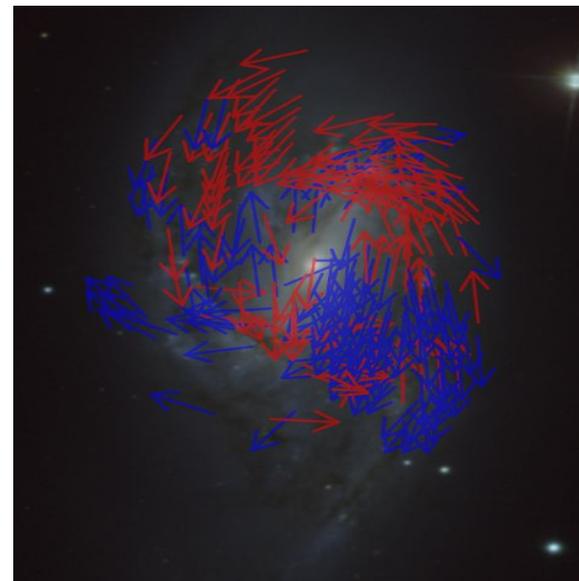
# 日本SWG-MAGのサイエンス2

## ファラデーモグラフィで探る (天の川) 銀河の3次元磁場構造

銀河磁場はダイナモ理論によって増幅・維持されたと考えられており、磁場の幾何を調べることでその起源の謎に迫ることができる (Kurahara et al. (2021))

シンクロトロン放射とRMの観測の2次元map +ファラデーモグラフィによる奥行き方向の情報で詳細な銀河磁場の3次元構造の解析が可能に！

さらにSKA時代では、赤方偏移空間にも十分な数の偏波源が観測されるため、銀河磁場の時間進化も統計的に探ることができる



# 活動実績からの評価

# 国際SKA&SKA先行機での活動

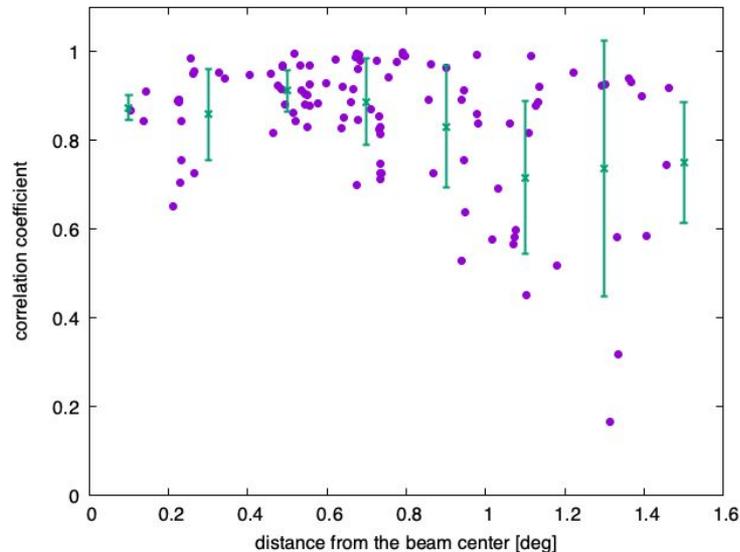
- 国際SKA-SWG:コア3名(赤堀、中西、宮下)、アソシエイト2名(高橋、出口)
- LOFAR (MKSP):メンバー(高橋、出口、町田、宮下)
- ASKAP (POSSUM):AG2-WG chair (赤堀)、メンバー(高橋、出口、宮下、大前)

不定期で行われるbusy-weekへの参加  
(2019Sep, 2021Jun)

task : ASKAP mosaic dataのquality check

SN1006 filedのmosaicとsingle beamのデータの  
違いを定量的に評価

具体的にはFDFの相関係数によって評価し、その  
相関係数のビーム中心からの距離の依存性を調べ、信  
頼できるビーム半径を決定した(~0.6 deg)



# 日本SWG-MAGの活動

- メンバー:36名

(学生6名、ポスドク7名)

- 研究会

- 第一回(福岡)2012年6月25-26日
- 第二回(岩手)2013年9月13-14日
- 第三回(東京)2014年11月13-14日 [偏波解析講習会1]
- 第四回(鹿児島)2015年9月17-19日 [偏波解析講習会2]
- 第五回(山形)2016年10月27-29日 [パルサー班らと合同/偏波解析講習会3/電波パルス講習会1]
- 第六回(宮崎)2018年5月28日-6月2日 [国際会議/偏波解析講習会4/トモグラフィー講習会1]
  - [http://ska-jp.org/ws/SKAJP\\_MAGWS2018/](http://ska-jp.org/ws/SKAJP_MAGWS2018/)
  - Galaxies Special issue ([リンク](#)) <= 27 papers
  - POSSUM meeting
- 第七回(東京)2019年11月21日-23日[偏波解析講習会5/トモグラフィー講習会2]
  - <http://ska-jp.org/ws/magws2019/>



第六回 宮崎での国際会議より

# 日本SWG-MAGの活動

- ユースケース検討

[SKA-LOW VLBI] <https://mwg.sci.kagoshima-u.ac.jp/wiki/pages/m0e1R6Q5/2020.html>

- 300MHz帯VLBI観測によるかに星雲wisps構造の時間変化 (Ohno et al.)
- ガンマ線連星HESS J0632+057の300 MHz帯VLBI観測を軸とした多波長同時観測で探るガンマ線の起源 (Akahori et al.)
- X線連星ジェットの高周波数偏波観測 (Sakemi et al.)

[SKA-ALMA] <https://mwg.sci.kagoshima-u.ac.jp/wiki/pages/H7M6Y0W/2020ALMA.html>

- ほうおう座銀河団中心の不都合なAGNの徹底解明 (Akahori et al.)
- 系内X線連星ジェットローブの短期間でのRM構造変動調査 (Sakemi et al.)

[SKA-EAVN] <https://mwg.sci.kagoshima-u.ac.jp/wiki/pages/x6J0P7X/EAVN.html>

- Is radio-quiet magnetar a radio pulsar? (Akahori et al.)
- 超新星残骸 SN1006 (Ideguchi et al.)

# 日本SWG-MAGの活動

- 宇宙磁場グループ英語版サイエンスブック2015 & レビュー論文

Akahori et a. (2016) <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016arXiv160301974A/abstract>

Akahori et al. (2018) <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018PASJ...70R...2A/abstract>

- 宇宙磁場グループ研究論文 **49**編  
ファラデーモグラフィ研究論文 **15**編

Total citation 128 as of 31/05/2021: [https://ui.adsabs.harvard.edu/public-libraries/2e\\_N8VhKR6GbITntnu0iKw](https://ui.adsabs.harvard.edu/public-libraries/2e_N8VhKR6GbITntnu0iKw)

- ファラデーモグラフィソフトウェア開発

qumc (github リンク)

CRAFT (<https://github.com/suchethac/craft>)

# commensality

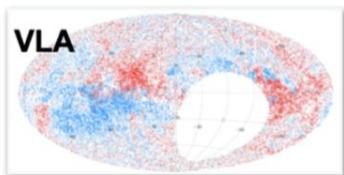
- 宇宙再電離
  - EoRの観測から原始磁場の制限 (Minoda et al. (2018))
- パルサー
  - パルサーの偏波解析
  - 位相分解ファラデートモグラフィーで探るパルサーの放射機構 (Kikunaga et al. )
- 系外惑星
  - 系外惑星のオーロラ電波の観測 (Shiohira et al. (2020))

ファラデートモグラフィーが他のSWGのサイエンスにも応用できる！

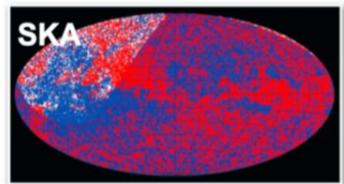
# 偏波解消とファラデーモグラフィで紐解く4次元宇宙磁場

- ① SKAによる高感度・高分解能の観測は、現状の100倍(400万個)の系外偏波源の検出を可能に！ (高密度RM grid)
- ② さらにSKAの(低周波)広帯域データは高いRM分解能をもたらし、詳細な視線磁場分布を可能に！ (ファラデーモグラフィ)
- ③ ここに偏波源の**赤方偏移**の情報を加えることで、3次元宇宙磁場の時間進化 (**4次元宇宙磁場**) に迫る！

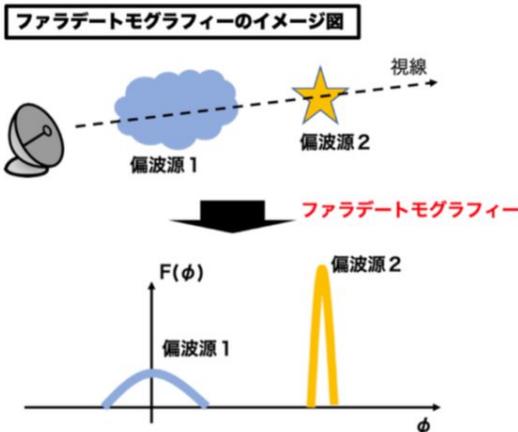
## ① 高密度RM grid (天空面方向 2D)



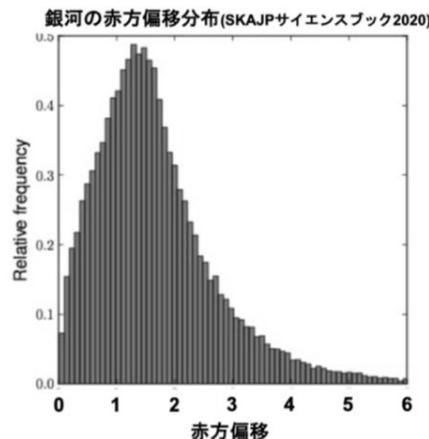
↓ 偏波源密度100倍+南天



## ② ファラデーモグラフィ/偏波解消 (視線方向 1D)



## ③ 多赤方偏移 (時間方向)



## SKA時代に解決すべき宇宙磁場の課題

- 大規模構造フィラメントの磁場強度は？
  - 初期宇宙モデルに迫る
- 銀河団の3次元磁場分布
  - 銀河団乱流の特性に迫る
  - X線形態と組み合わせ磁場進化に迫る
- 銀河団ハロー・レリックの3次元磁場分布
  - 銀河団・大規模構造の磁場進化に迫る
- AGNジェットの3次元磁場分布
  - 降着円盤近傍の磁場構造に迫る
- 銀河磁場(ディスク&ハロー) 3次元分布の時間進化
  - 銀河風(宇宙線)? 初期磁場? 磁場の起源に迫る
- 全天RM grid+ファラデーモグラフィ
  - 天の川の詳細な3次元構造に迫る
  - ↑系外を調べる際には取り除きたい前景に
  - 大規模構造RM分散の統計的抽出が可能に



# SKA宇宙磁場グループ



# 科学報告：宇宙磁場

SKA宇宙磁場グループ



# 科学報告：宇宙磁場

SKA宇宙磁場グループ

Japan SKA Consortium Science Strategy Workshop 2021

# 国際SWG-MAGのサイエンス2

## MeerKAT observations of the Galactic center

SNR 0.9+0.1

Sgr B2

Sgr B1

Sgr A

Arc

Sgr C

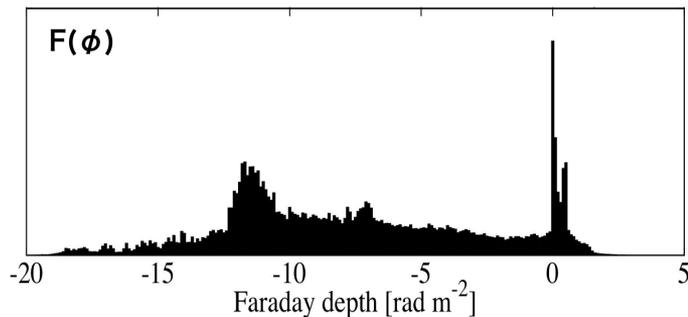
Sgr D SNR

超高解像度 (total intensity)

偏波のimageが得られればSNRやfilamentの詳細な磁場構造が得られる？

# 日本SWG-MAGのサイエンス2

## ファラデートモグラフィーで探る(天の川)銀河の 3次元磁場構造

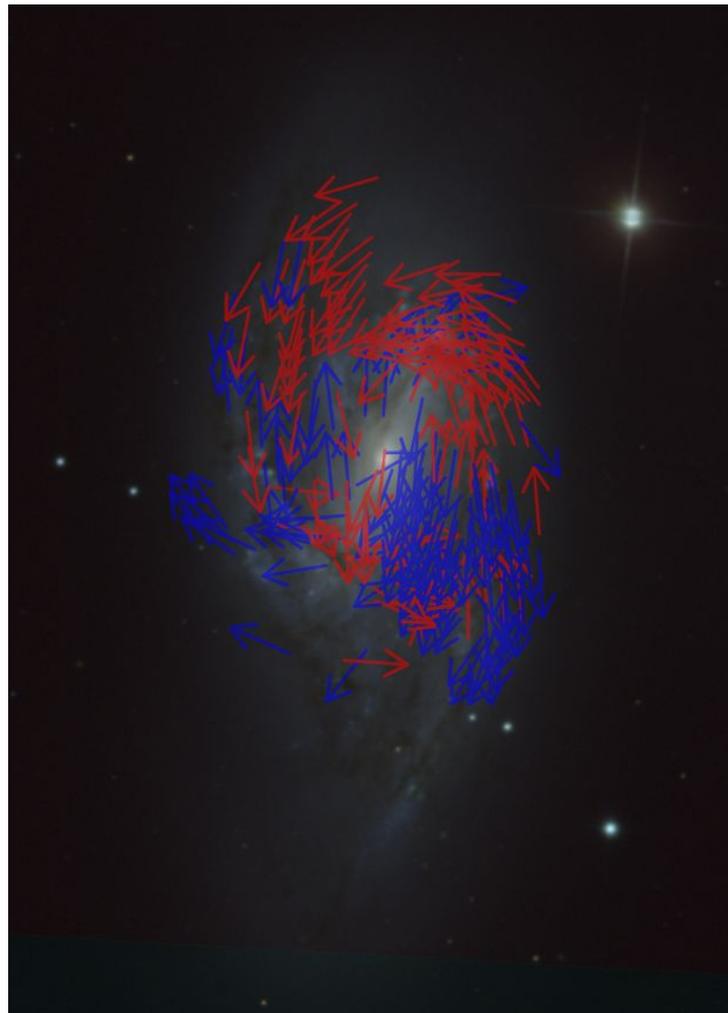


## SKA開拓機を用いた多波長偏波データで探る 銀河の3次元磁場構造

渦状腕と磁場のモード数に相関あり (右図)

→ SKAによる統計調査で銀河磁場の起源に制限を！

Kurahara et al. (2021)など



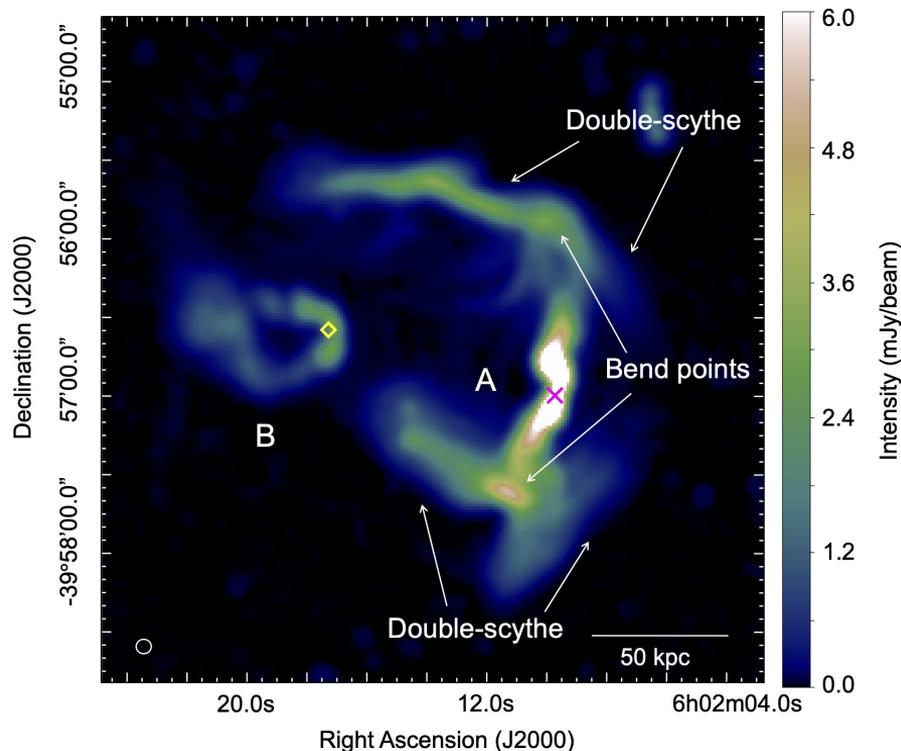
# 国際SWG-MAGのサイエンス2

## MeerKAT observations MRC0600-399

衝突する2つの銀河団の中心にある銀河MRC 0600-399から噴き出すジェットの流れの折れ曲りを MeerKATで観測

アテルイIIのシミュレーションによって、この折れ曲りが銀河団を包み込む磁場にジェットがぶつかることで説明できた

この結果はNature論文に掲載され、SKA-JPからも酒見、大村、町田、赤松、赤堀、中西、竹内が解析・執筆に携わっている



# 国際SWG-MAGのサイエンス2

## MeerKAT observations MRC0600-399

衝突する2つの銀河団の中心にある銀河MRC  
0600-399から噴き出すジェットの流れの折れ曲りを  
MeerKATで観測

アテルイIIのシミュレーションによって、この折れ曲  
りが銀河団を包み込む磁場にジェットがぶつかるこ  
とで説明できた

この結果はNature論文に掲載され、SKA-JPからも  
酒見、大村、町田、赤松、赤堀、中西、竹内が解析  
・執筆に携わっている

