

*Cosmic Magnetism by
Low Frequency Radio Observation*

低周波電波観測で切り開く 宇宙磁場研究



赤堀卓也

鹿児島大学・大学院理工学研究科
日本SKAコンソーシアム・副代表

日本物理学会2017秋季年会

2017.9.14 @ 宇都宮大学

❖ 低周波電波観測と宇宙磁場

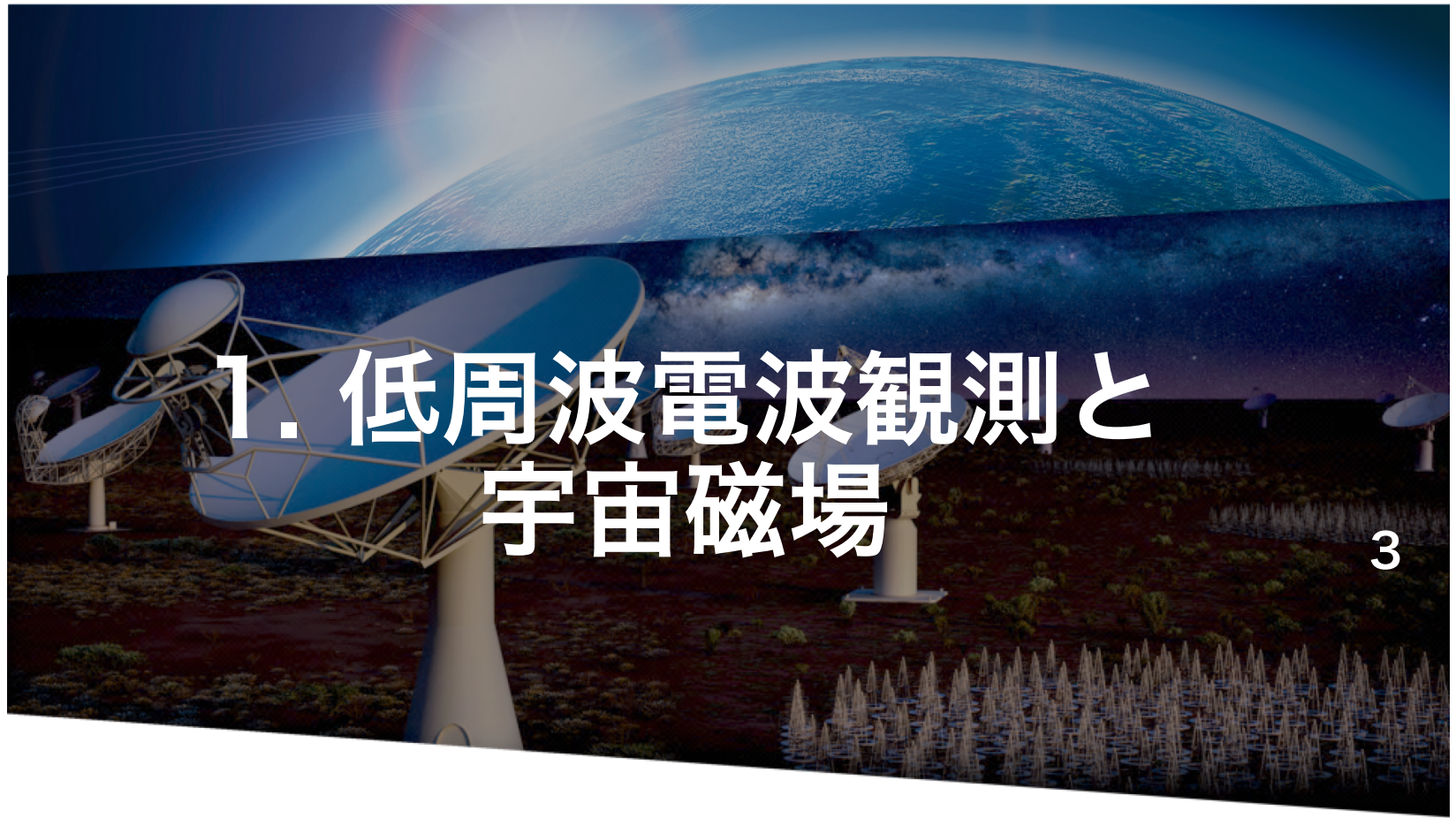
- 私達と宇宙磁場
- 低周波電波観測の優位性

❖ 研究最前線

- 星間・銀河の研究
- 銀河団の研究
- 宇宙大規模構造の研究

❖ 将来に向けたキーワード

- ファラードトモグラフィ
- UHF全帯域観測



1. 低周波電波観測と宇宙磁場 人類の歴史と磁場の認知

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

4

紀元前 6 世紀

紀元前 2 世紀

8世紀ごろ

11—17世紀

磁鉄鉱の発見
(欧州・中国)



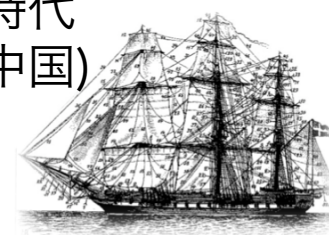
羅針盤の原型
指南器
(中国)

磁鉄鉱の記録
続日本紀
(日本)

早稲田大学
アーカイブより



羅針盤
大航海時代
(欧州・中国)



17-18世紀

19世紀初頭

19世紀

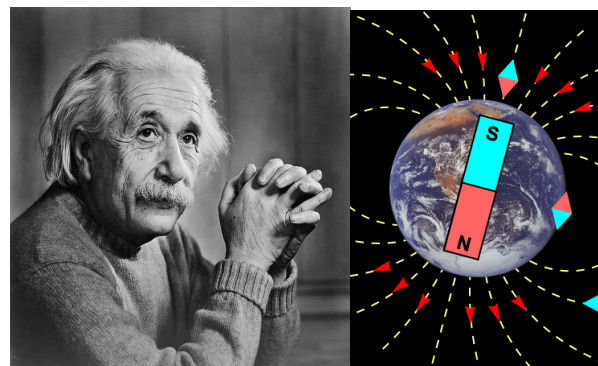
20世紀

地磁気の認識
(ギルバート
・イギリス)
力の逆二乗則
(キャベン
ディッシュ
・イギリス)

地磁気測定
(フンボルト・
ガウス・
ウェーバー・
ドイツ)

電磁誘導の法則
(ファラデー
・イギリス)
電磁方程式
(マックスウェル
・スコットラン
ド)

地球磁場は現代物理学の最大の
問題のひとつだ —A. Einstein

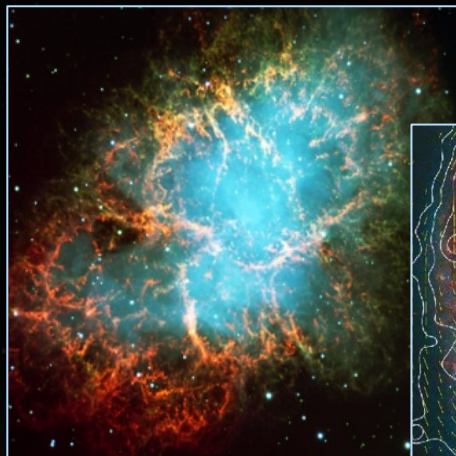


1. 低周波電波観測と宇宙磁場

宇宙磁場は現代物理学の最大の問題のひとつ

5

磁場 – 宇宙の**多様性**を作る**普遍性**を持った物理



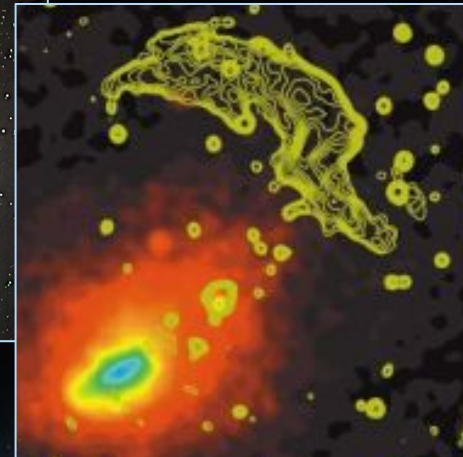
星惑星形成
超新星

ダイナモ・
銀河の形態



ジェット・
フィードバック

宇宙の熱史・
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**

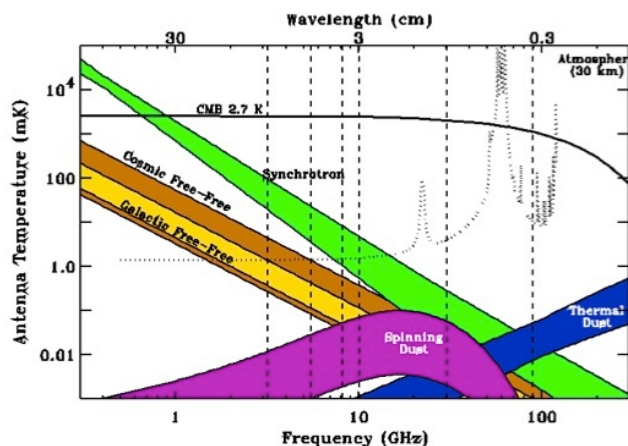
21cm輝線
宇宙暗黒時代の解明

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

❖ 磁場の視線垂直成分



NASA HPから

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

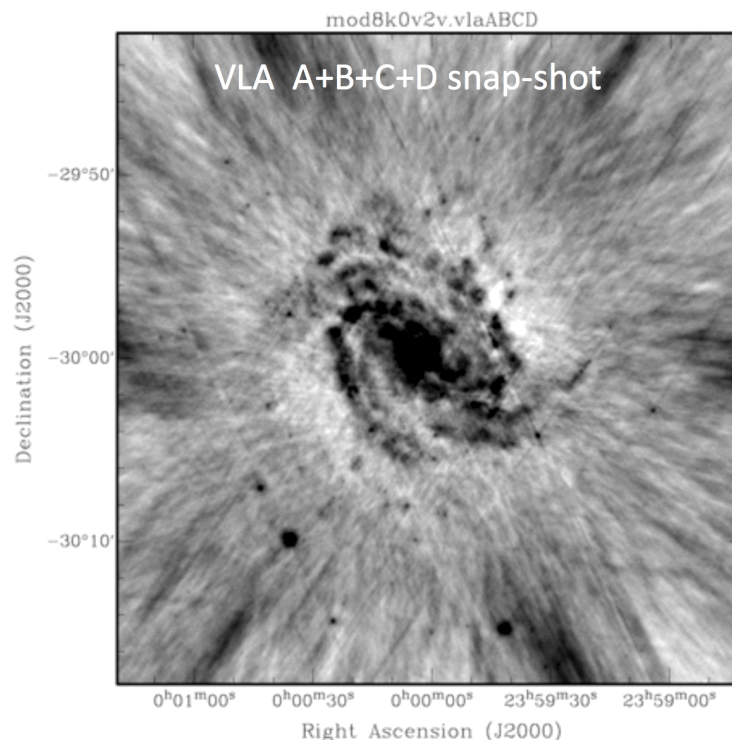
天の川銀河の典型的な電波放射の成分

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

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

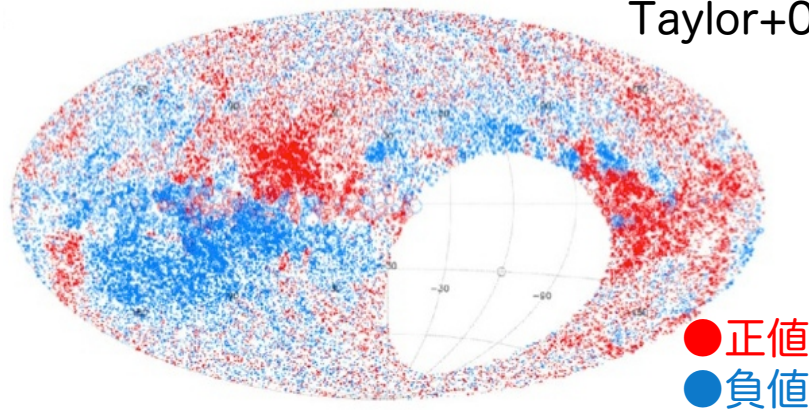
❖ 干渉計基線数と基線長が向上した高画質画像

SKA LOW = Super LOFAR
SKA MID = JVL A + B + C + D + E



❖ 磁場の視線成分

Taylor+09



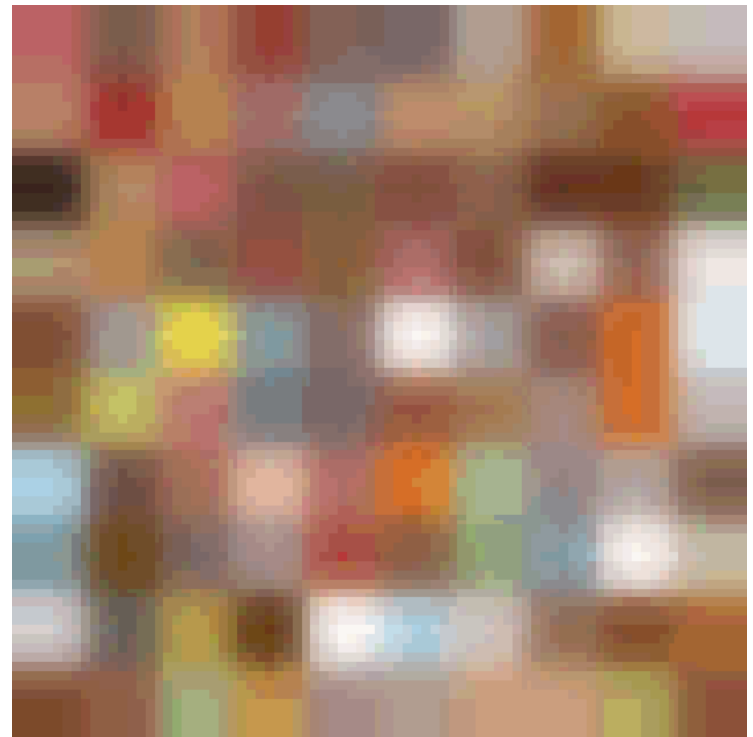
約4万の系外偏波源の全天RM分布

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

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

❖ 背景偏波源をピクセル とした高密度RMマップ

JVLA(1/deg²) → ASKAP(30/deg²) →
SKA1(300/deg²) → SKA2(3000/deg²)



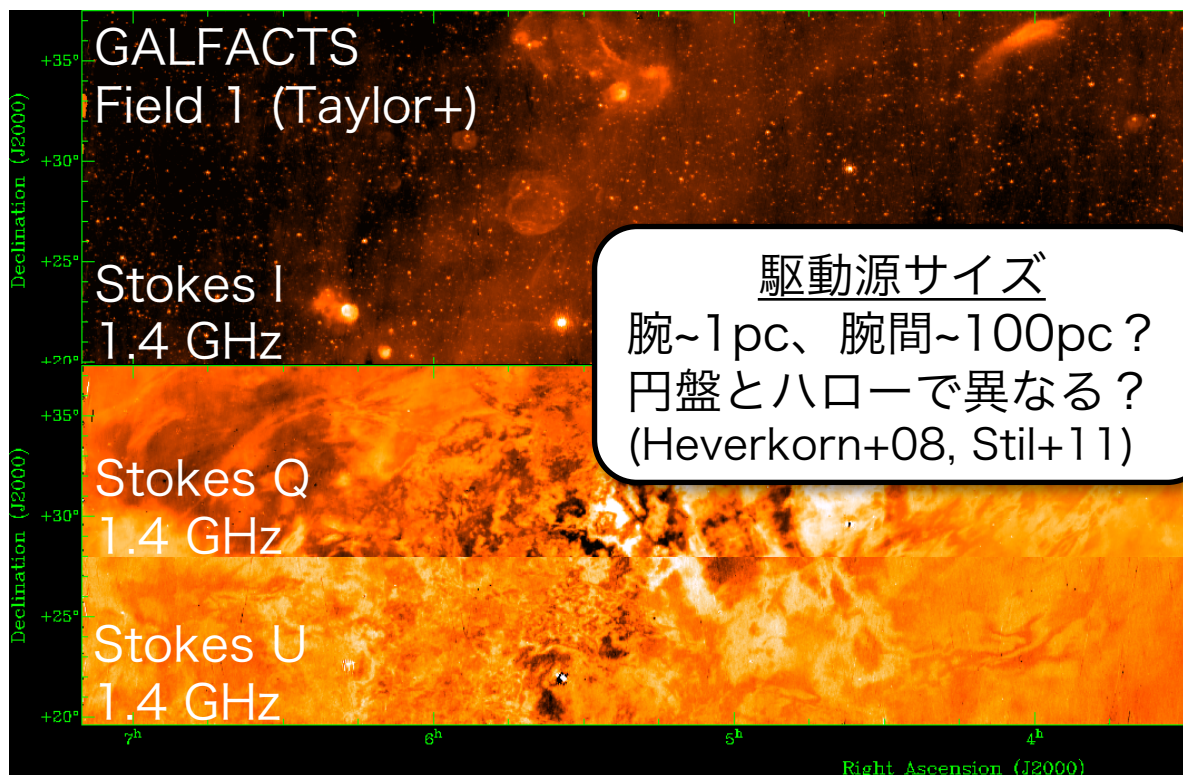
2. 研究最前線

8

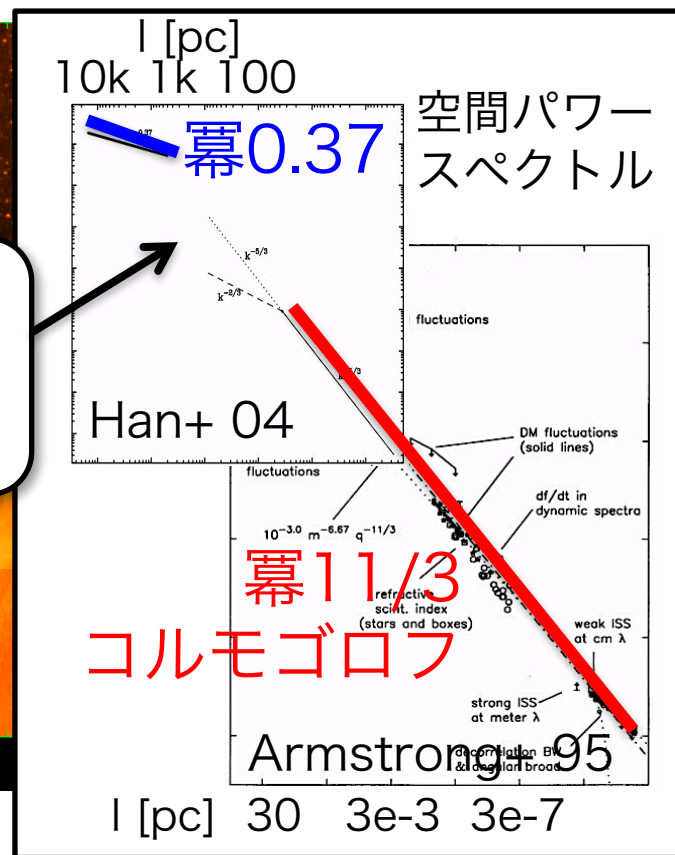
2. 研究最前線 星間物質の乱流と磁場

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

9



駆動源サイズ
腕~1pc、腕間~100pc?
円盤とハローで異なる?
(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, β, 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?)

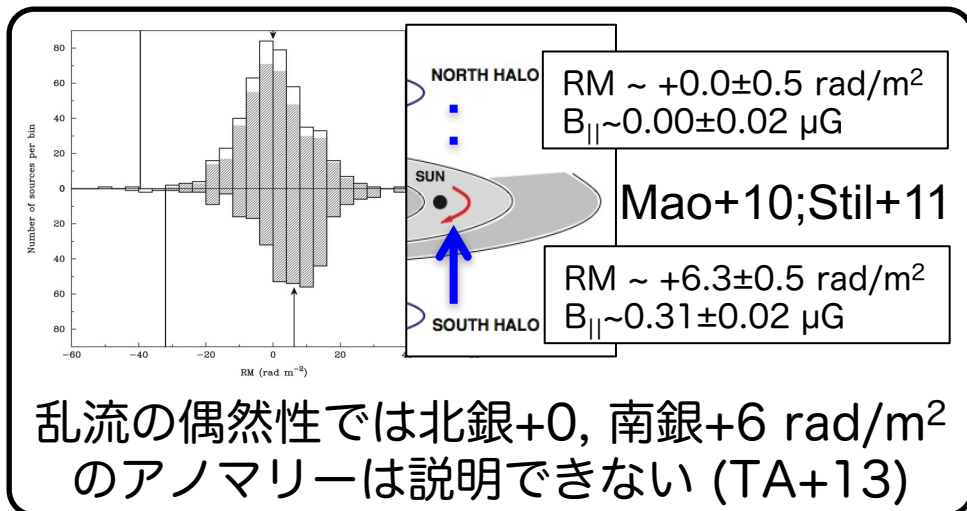
2. 研究最前線

天の川銀河磁場とパーカー不安定性

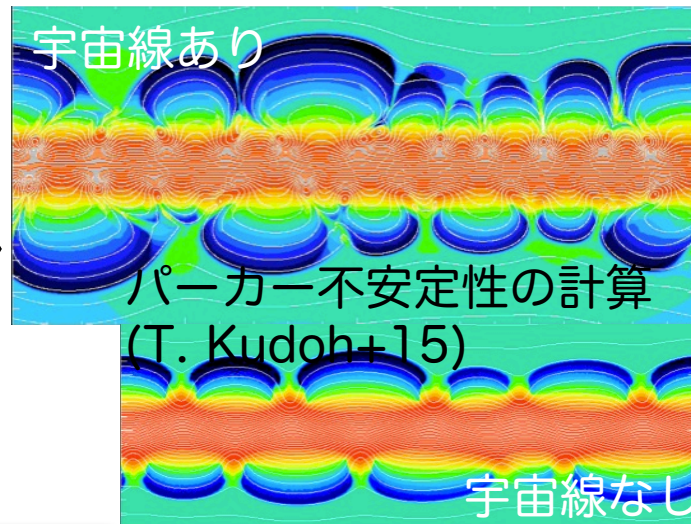
SQUARE KILOMETRE ARRAY

10

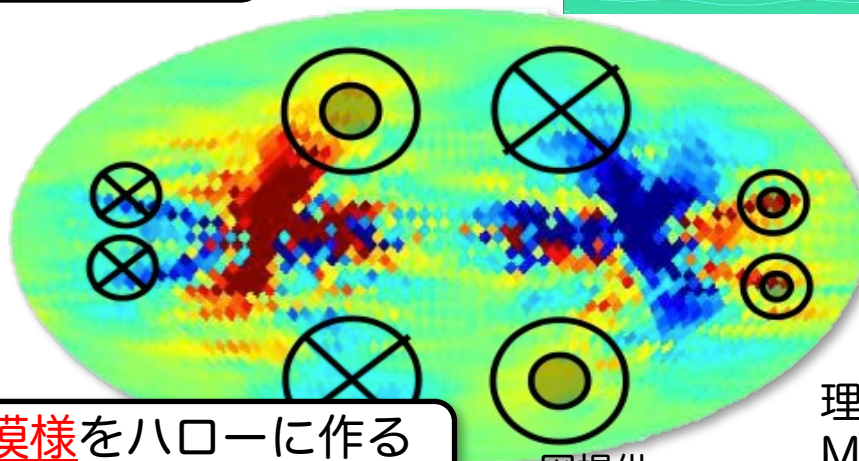
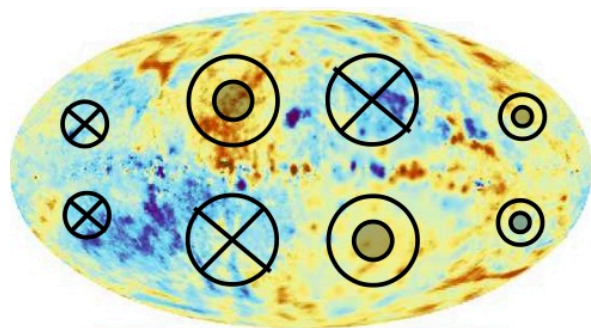
❖ 非一様な垂直磁場の起源はパーカー不安定性か？



可能性



予言



I, P, RMの縞模様をハローに作る
→ 観測ではまだ未確認

図提供
Y. Kudo

理論
Machida, TA+13

観測: Taylor+09

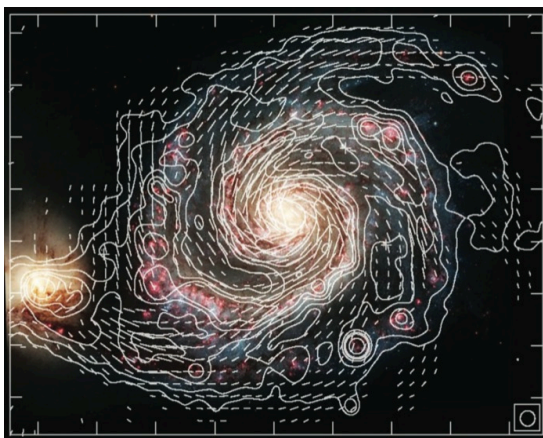
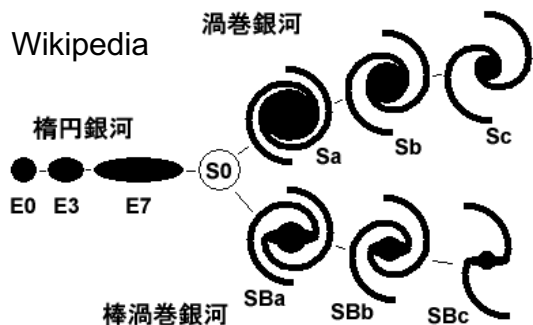
2017.9.14 @ 宇都宮大学

日本物理学会2017秋季年会

2. 研究最前線 銀河磁場と形態、理論と観測の比較

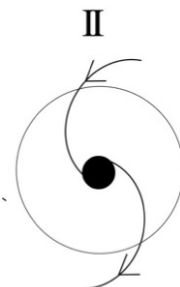
SQUARE KILOMETRE ARRAY
電波望遠鏡

11



M51 (Fletcher+11)

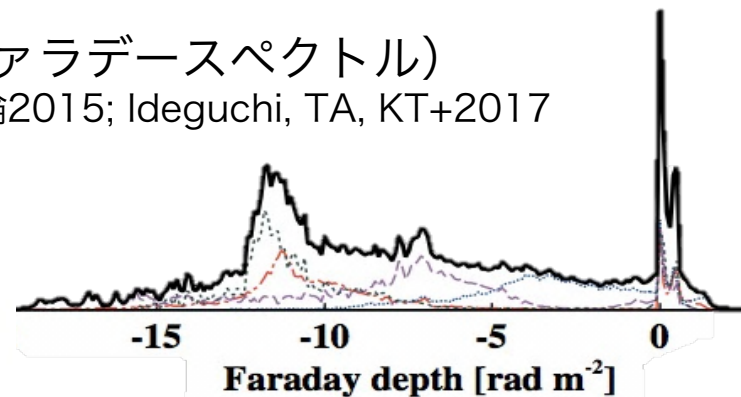
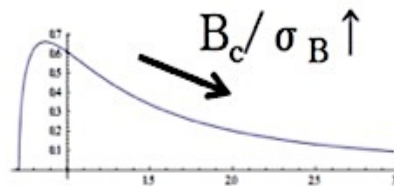
	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc
ASS					
BSS I型					N3627, N4414, N6946
BSS II型		N4736		N4321 N5194	N4254, N4535?



偏波角推定から得る磁場の幾何とハッブル分類との関係
(安楽修論2015,& Nakanishi+)

円盤銀河の放射構造 (ファラースペクトル)

Ideguchi, TA, KT+14; 田代修論2015; Ideguchi, TA, KT+2017



- ❖ 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？

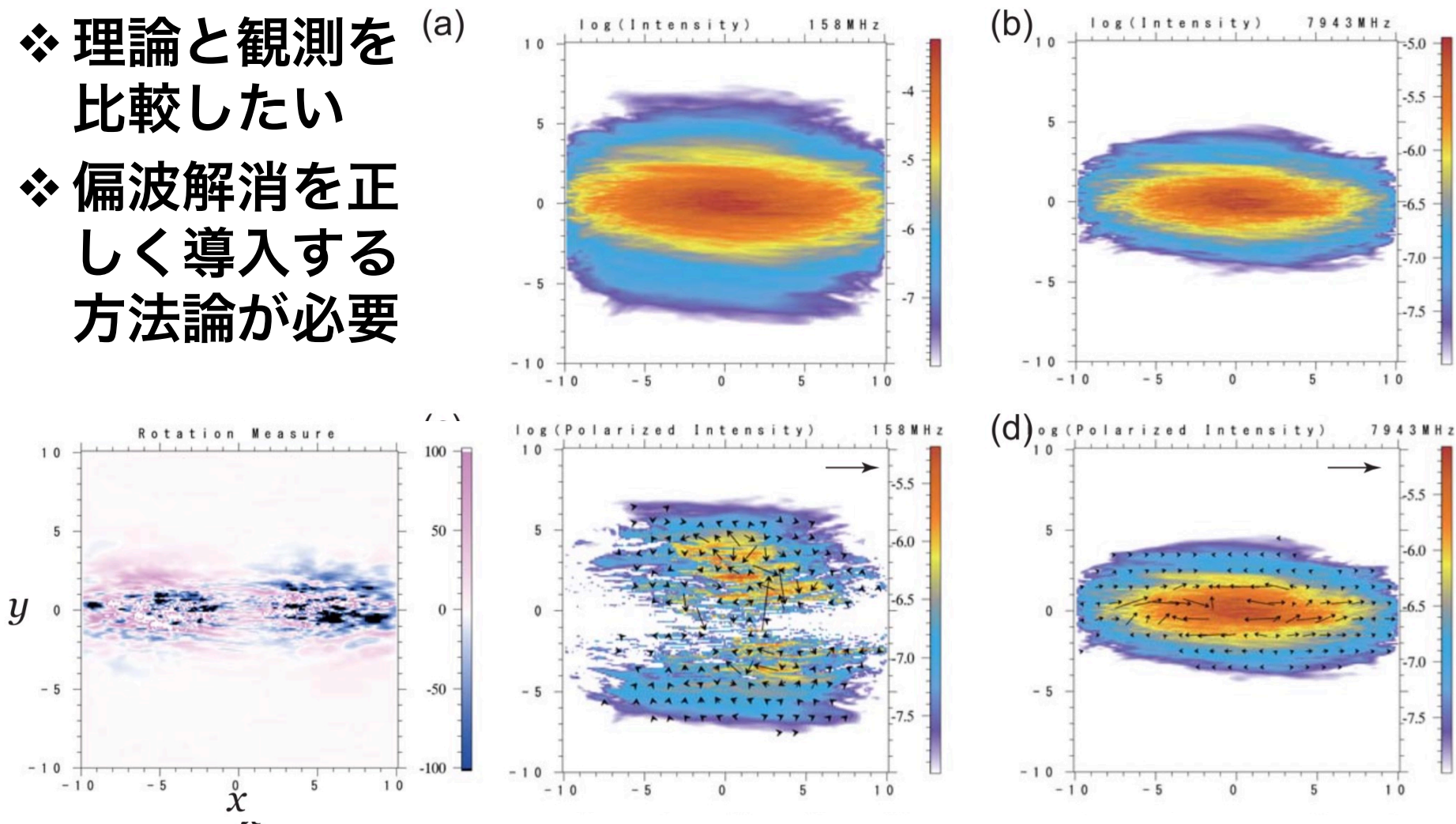
2. 研究最前線 銀河磁場モデルの可視化

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

12

❖ 理論と観測を
比較したい

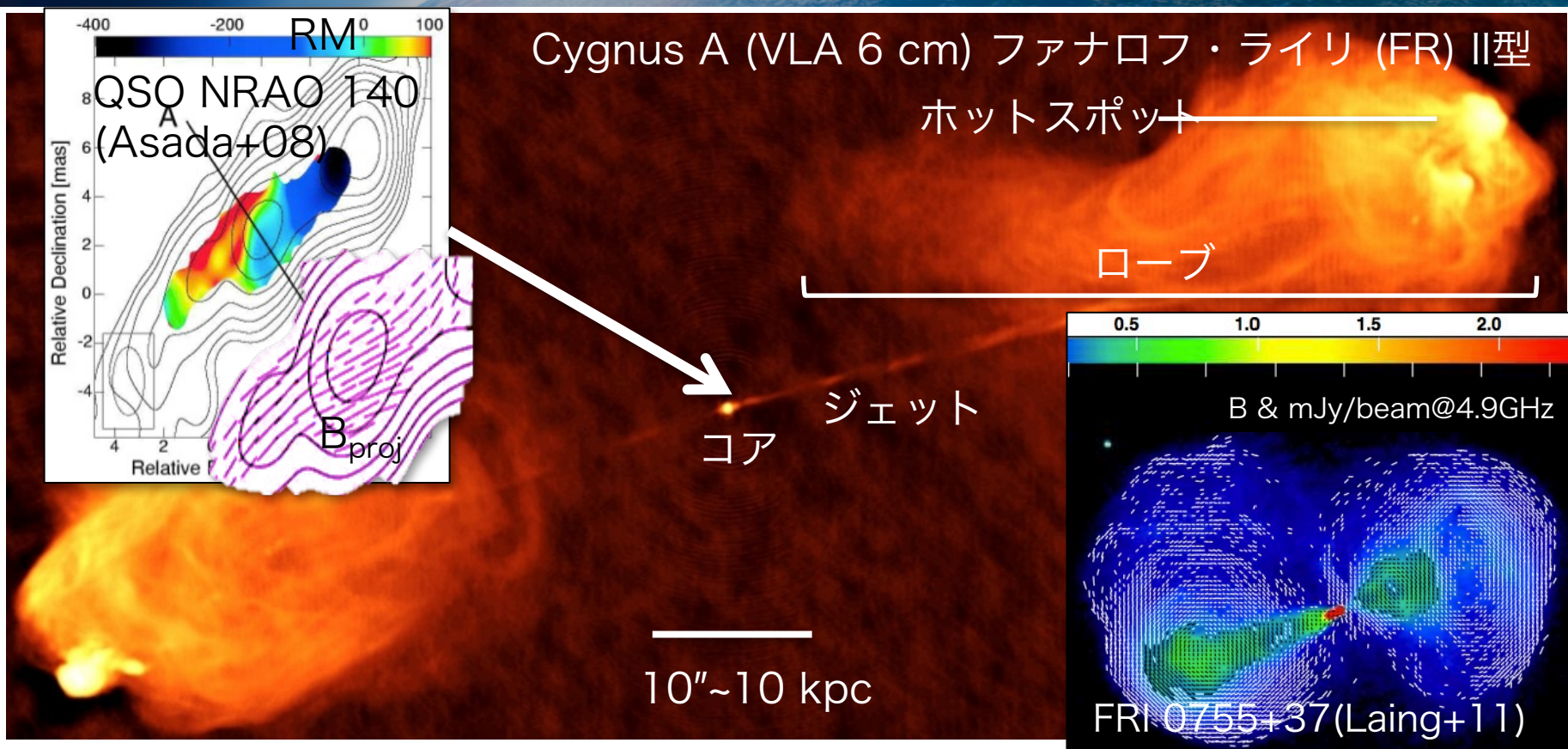
❖ 偏波解消を正
しく導入する
方法論が必要



2. 研究最前線 ジェットの進化と磁場

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

13



- ❖ 磁場はジェットの基本的(かつおそらく不可欠)なパラメータ
- ❖ 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？

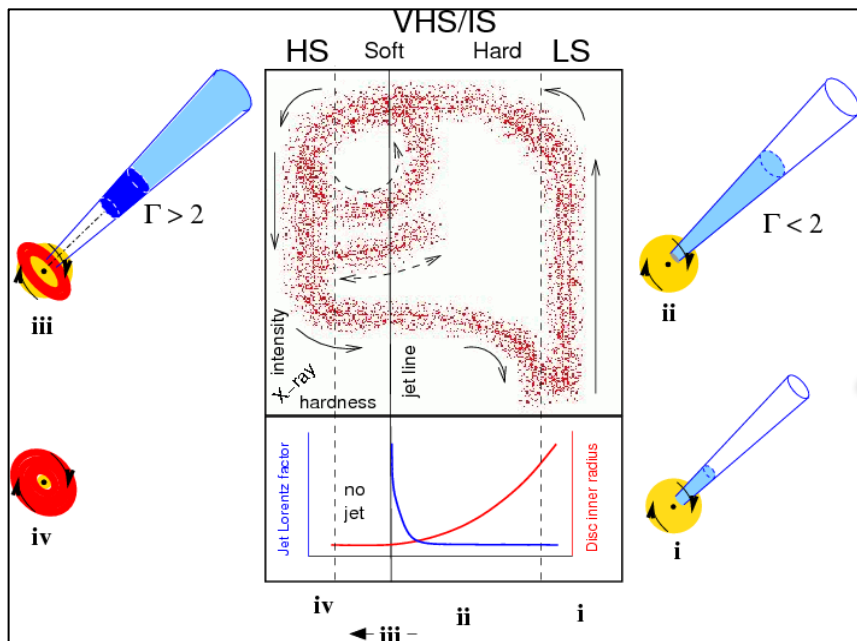
2. 研究最前線

質量降着からジェット終端まで

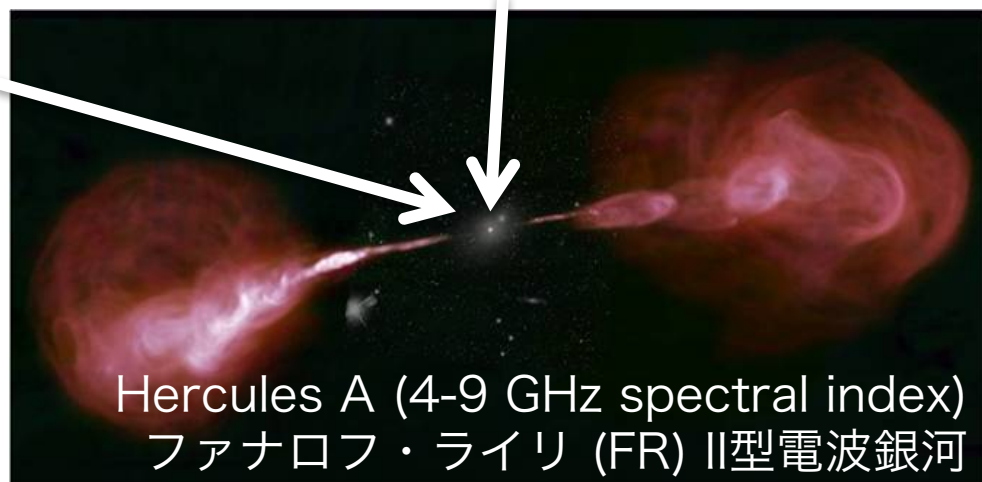
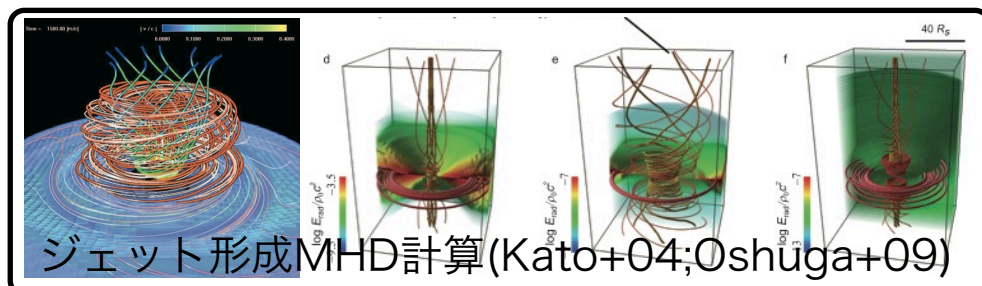
SQUARE KILOMETRE ARRAY
次世代電波望遠鏡

14

❖ 電波ローブの磁場は降着円盤の磁場構造を反映する？



X線状態遷移(Fender+04;10)



ATCA観測プロポーザル採択(11月)!

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

❖ 非熱的な宇宙の探査

- 磁場や乱流に向かうエネルギーは？
- 磁場や乱流の実態・時間進化は？

❖ 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

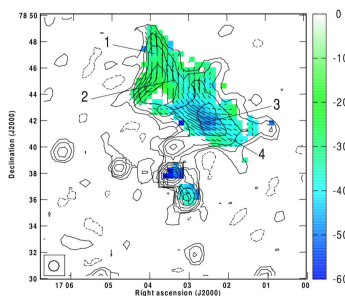
- 銀河団サイズと関係？
- 粒子加速の物理が謎

❖ そもそも磁場はどこからきたの？

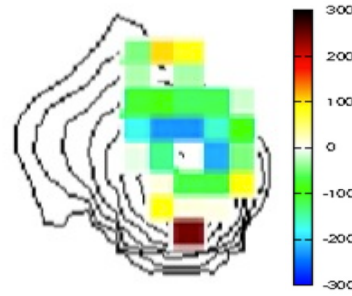
- 起源がはっきりしない
- 銀河団の年齢がわからないので進化を議論しづらいことが問題

銀河団ガスの進化（赤堀予測）

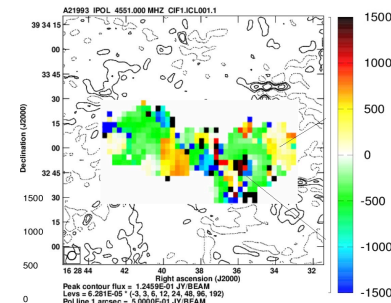
状態	衝突	緩和	冷却
X線形態	不規則	規則	冷却コア
乱流	線形成長	飽和	拡散
B強度	弱い	強い	競合？
B長さ	短い	長い	長い？



不規則: A2256
~0.1-1 μG
(Ozawa, TA+15)



規則: A1367
~4 μG
(I. Takahashi M-thesis 2015)



冷却コア: A2199
~2 μG
(R. Takahashi M-thesis 2016)

2. 研究最前線 粒子加速と電波放射

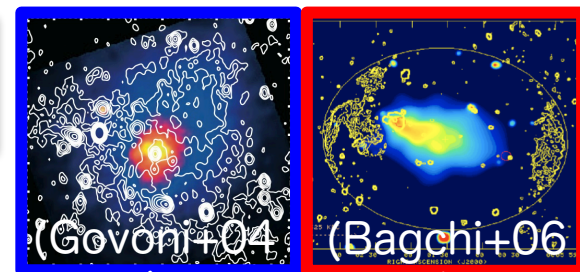
SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

16

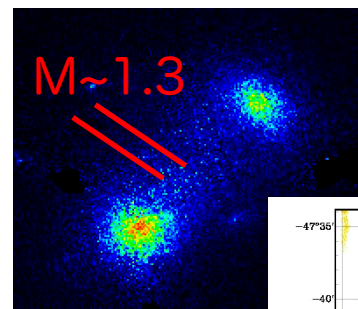
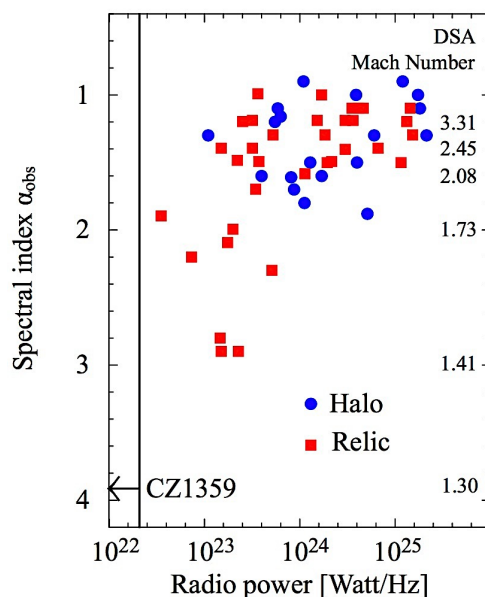
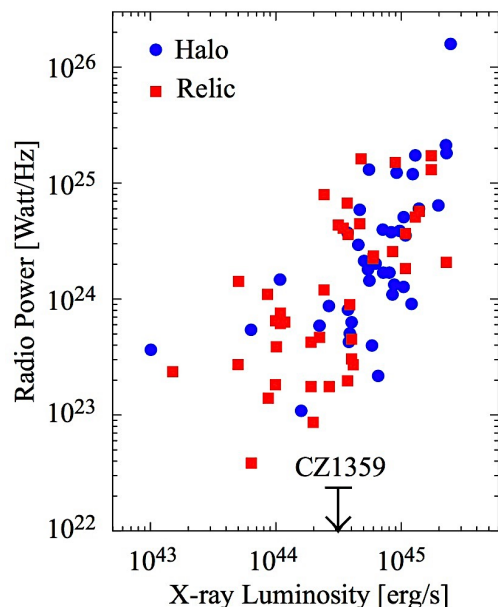
❖ 衝撃波マッハ数と放射幂の関係：粒子加速

CRe拡散 = 拡散速度 × 寿命 $\sim 10\text{-}100$ kpc
Alfven速度 $\sim$ 音速: $100\sim 1000$ km/s CMB逆Compton冷却 $\sim 10^8$ yr

一次電子 $\Rightarrow$ Diffusive shock acceleration (DSA) $\alpha = \frac{1}{2} - \frac{M^2 + 1}{M^2 - 1}$

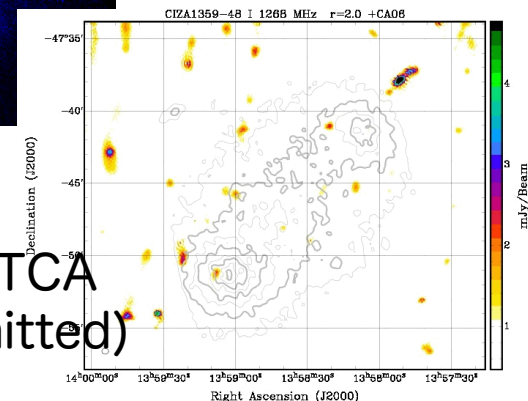


❖ CIZA J1358.9-4750



X-ray: Suzaku
(Kato+14)

1-3GHz: ATCA
(TA+submitted)



Data from Feretti+12; TA+submitted

日本物理学会2017秋季年会

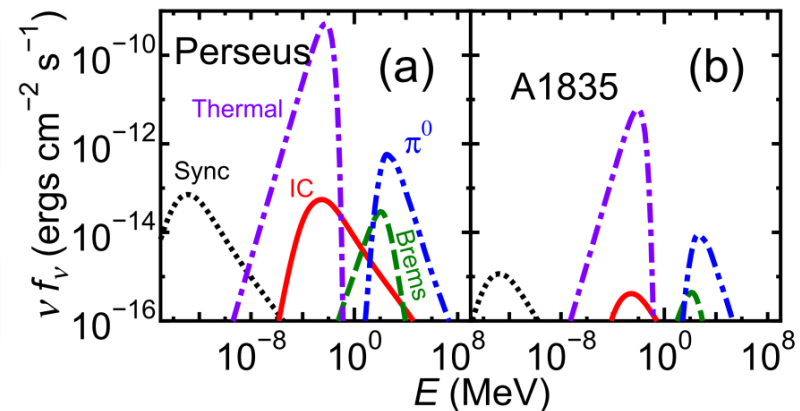
過去の銀河団衝突衝撃波やAGNの放出
→種となるCRpやCReの生成

種がCRe
乱流などによる
直接加速

種がCRp
ICM陽子とで生成
パイ中間子の崩壊

一次CReの生成

二次CReの生成



	一次宇宙線電子説	二次宇宙線電子説
供給源	銀河団衝突で起きた乱流	ICM陽子との反応
電波と相関するもの	<i>X線の輝線幅</i>	<i>ICM密度分布の半径分布</i>
その他の証拠	Subaru WL, ALMA SZ	<i>CTA γ-ray, ν</i>

どちらの説でも電波を核にX γ 線の観測も鍵となる

2. 研究最前線

ミッシングバリオンと磁場の謎

SQUARE KILOMETRE ARRAY
電波望遠鏡

18



種磁場

インフレーション
再結合
再イオン化

初期宇宙

Takahashi+05;
Ichiki+06; Ando+ 10;

種磁場

衝撃波・不安定性

増幅

圧縮・ダイナモ

大規模構造形成

種磁場

衝撃波・不安定性

増幅

銀河ダイナモ

漏れだし

銀河風・ジェット・ラム圧

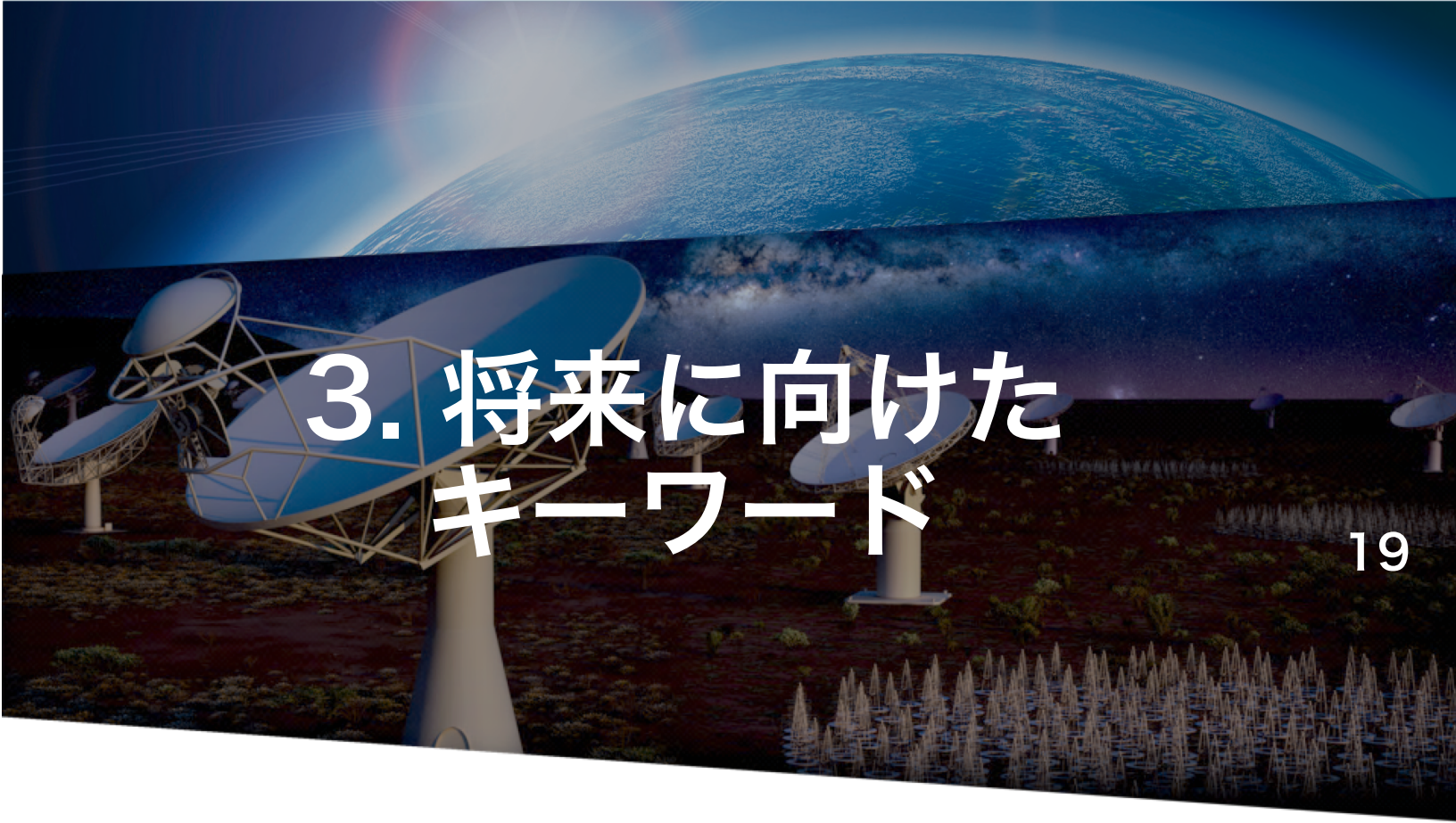
銀河形成

❖ 磁場は銀河団で μG ならフィラメントで10-100nG程度

– RM $\sim 1-10 \text{ rad/m}^2$ と予想される(TA, Ryu 10;11)

❖ 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



3. 将来に向けた キーワード

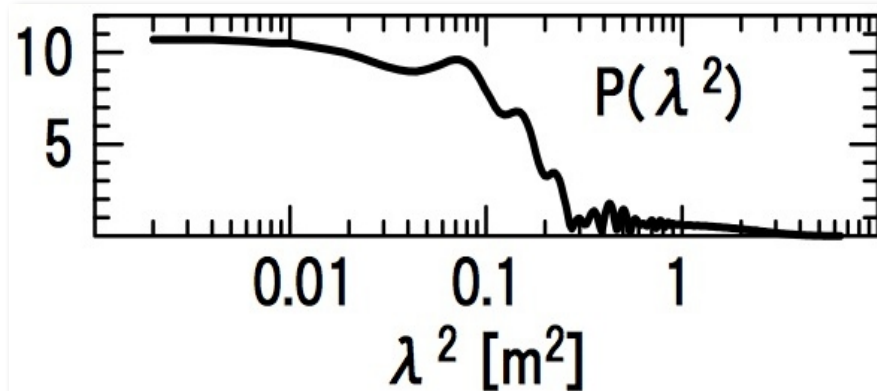
19

3. 将来に向けたキーワード ファラードトモグラフィ

SQUARE KILOMETRE ARRAY
百万平米電波望遠鏡

20

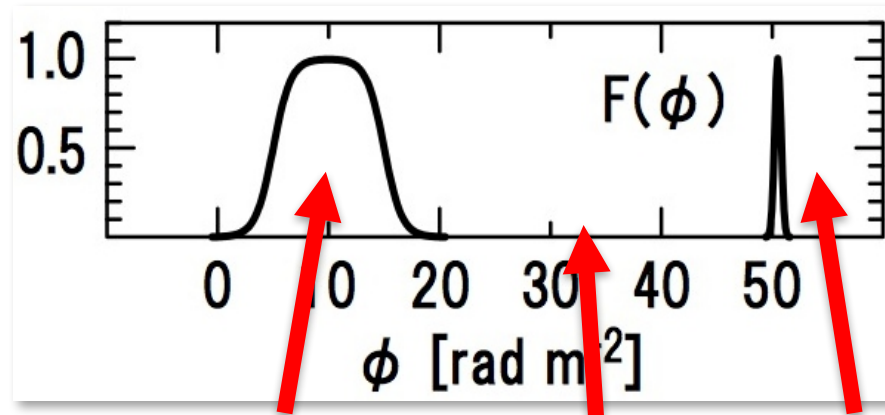
- ❖ これは偏波強度 $P(\lambda^2)$ です
- ❖ 何を観測したのでしょうか？



- ❖ $P(\lambda^2)$ をフーリエ変換する

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

- ❖ ファラードスペクトル
 $F(\phi)$ は Faraday 深度空間の偏波強度分布



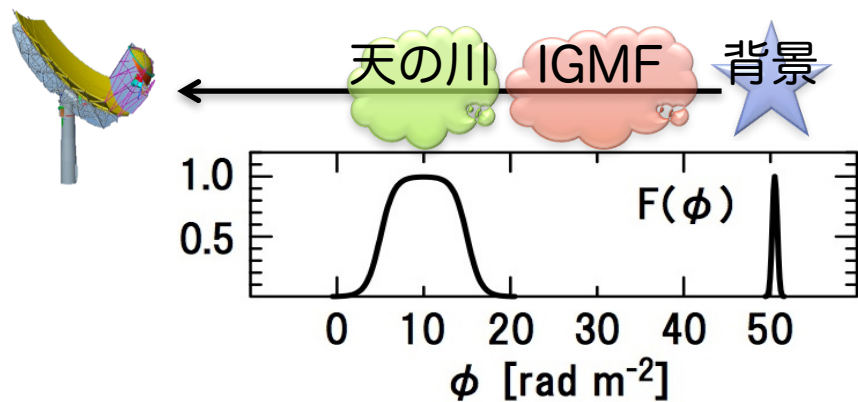
天の川 銀河間磁場 準星

3. 将来に向けたキーワード

トモグラフィの課題：帯域の広さ

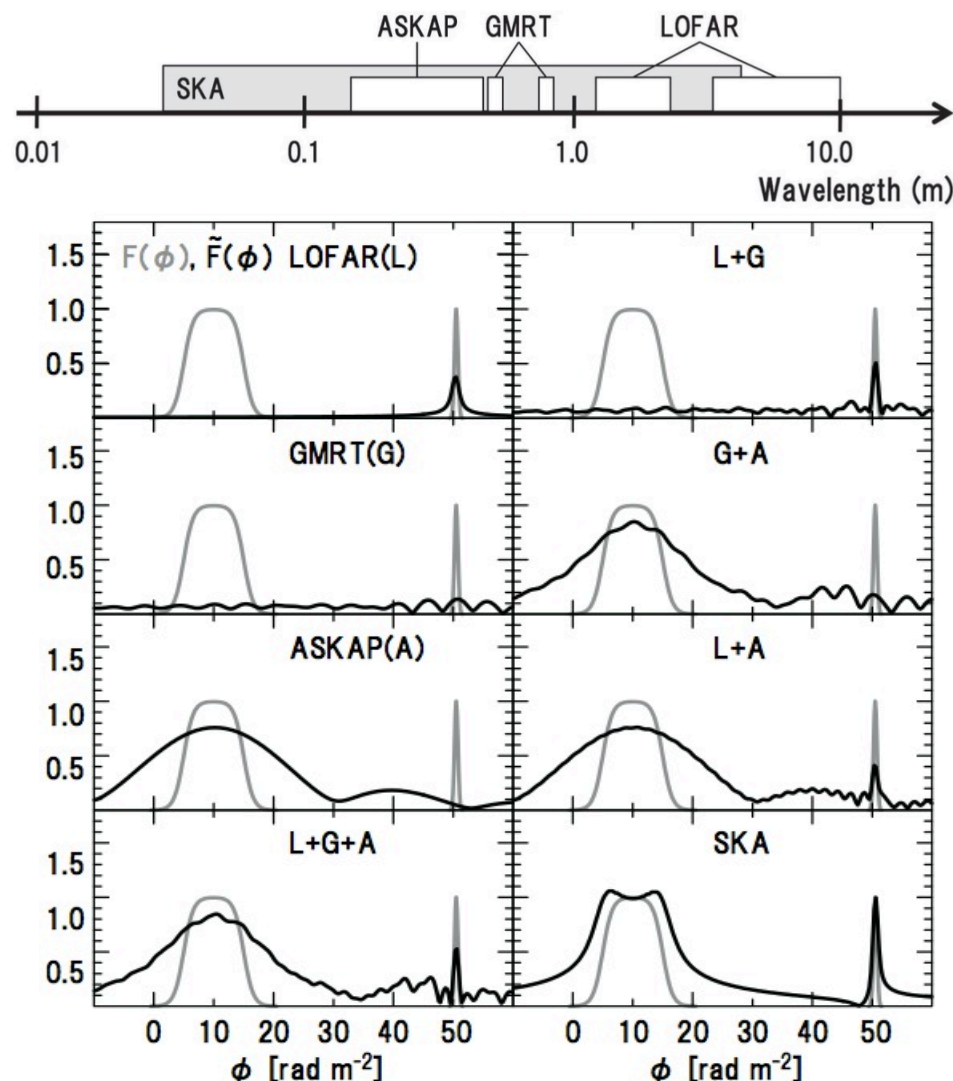
21

❖ 天の川銀河越しに背景のクエーサーを観測する



❖ λ^2 空間の網羅度で品質が決まる

- 低周波ほど細かい構造
- 高周波ほど広がった構造



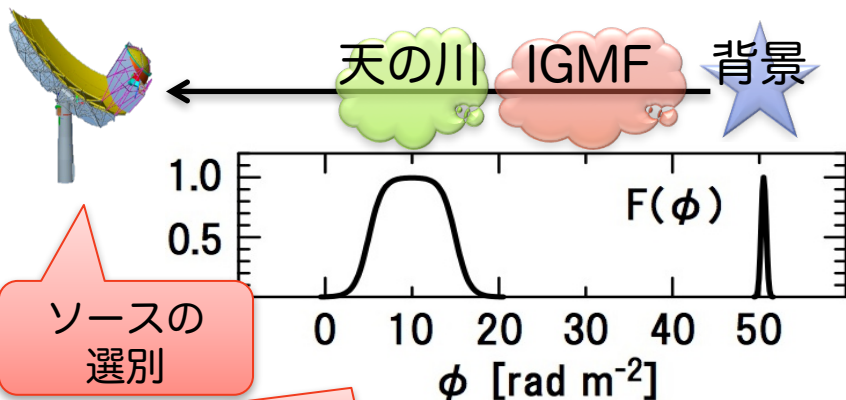
3. 将来のキーワード

トモグラフィで大規模構造を探索

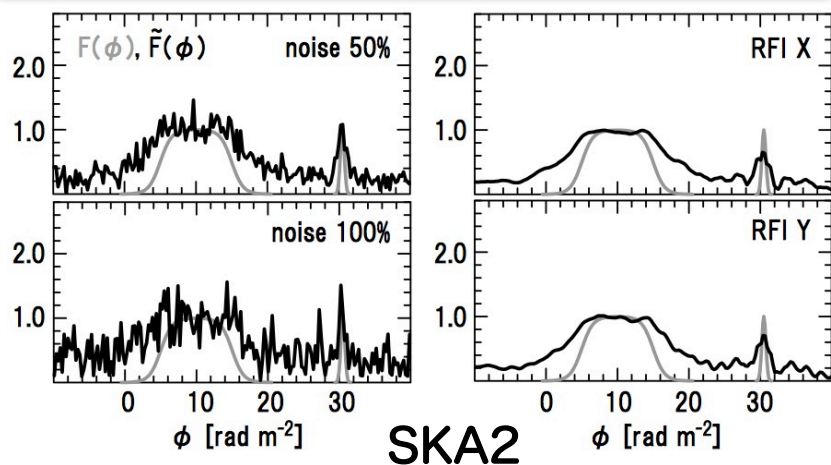
SQUARE KILOMETRE ARRAY
電波望遠鏡

22

❖ 銀河間磁場IGMFの寄与だけを抽出するには...?

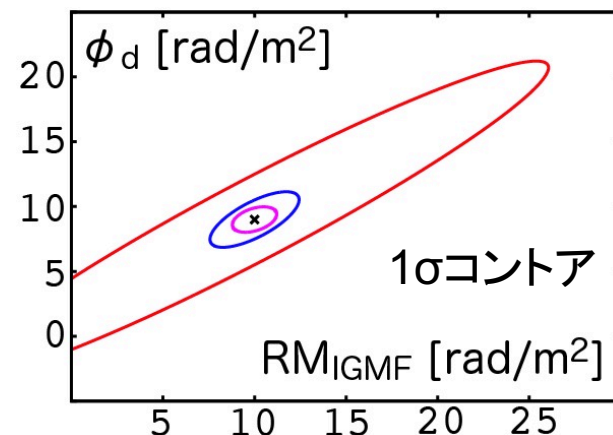


SKAの最大角度スケールは0.5度@1GHz程度



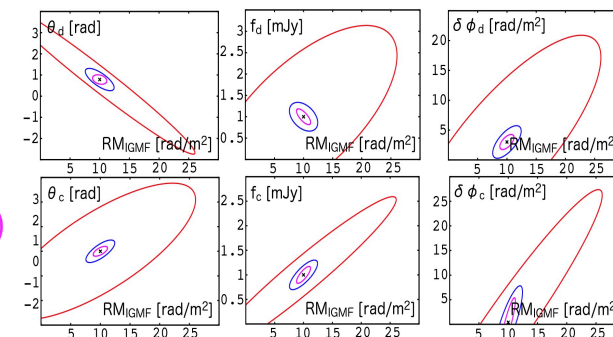
ASKAP12

1時間積分
1mJy背景光源
 $RM_{IGMF} = 10$ rad/m²



帯域(GHz)

—0.7-1
—0.7-1 &
1.15-1.4
—0.7-1.8 (full)



Ideguchi+14; Ideguchi, TA+ in prep.

Null RM_{IGMF} を $\sim 3\sigma$ で棄却可

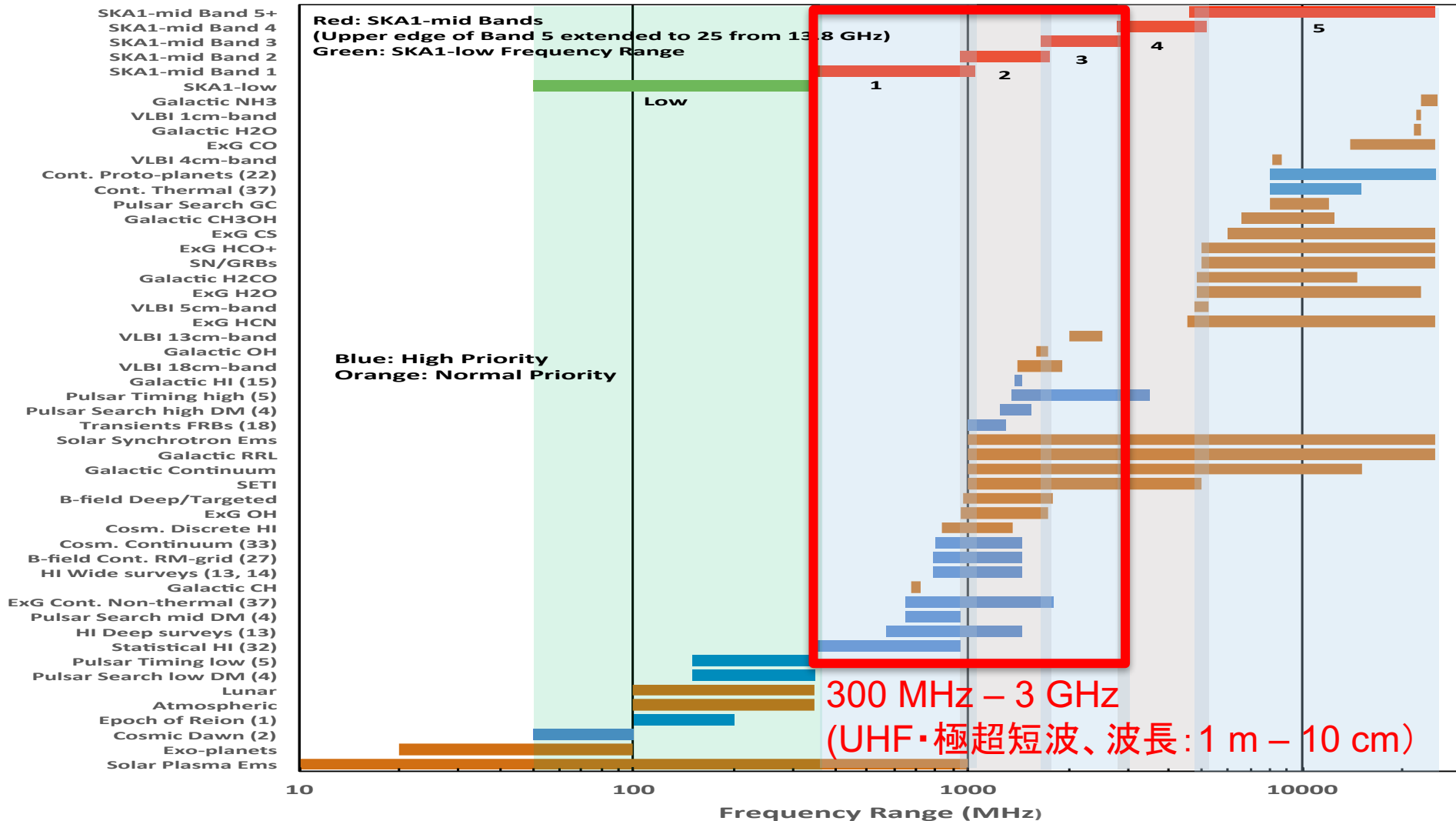
3. 将来に向けたキーワード

UHF帯域に多くの科学要求がある

SQUARE KILOMETRE ARRAY
平方キロメートル望遠鏡

23

Frequency Ranges of SKA1 Observational Categories

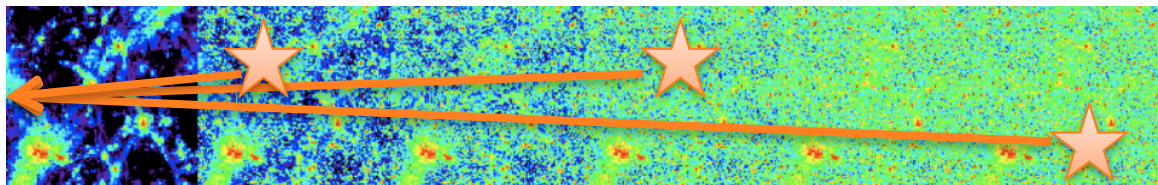


3. 将来に向けたキーワード

偏波FRBを使った宇宙磁場探査

SQUARE KILOMETRE ARRAY
電波望遠鏡

24



$z=0$ $\longrightarrow$ $z=5$

❖ FRB150807: 120Jyの化物FRB

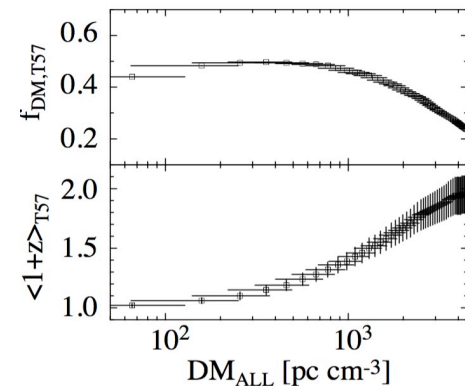
– $B_{LSS} < 21(1+z)$ nG (Ravi+16)

❖ $B_{\parallel}^{\dagger} \sim \text{RM/DM}$ ではダメ

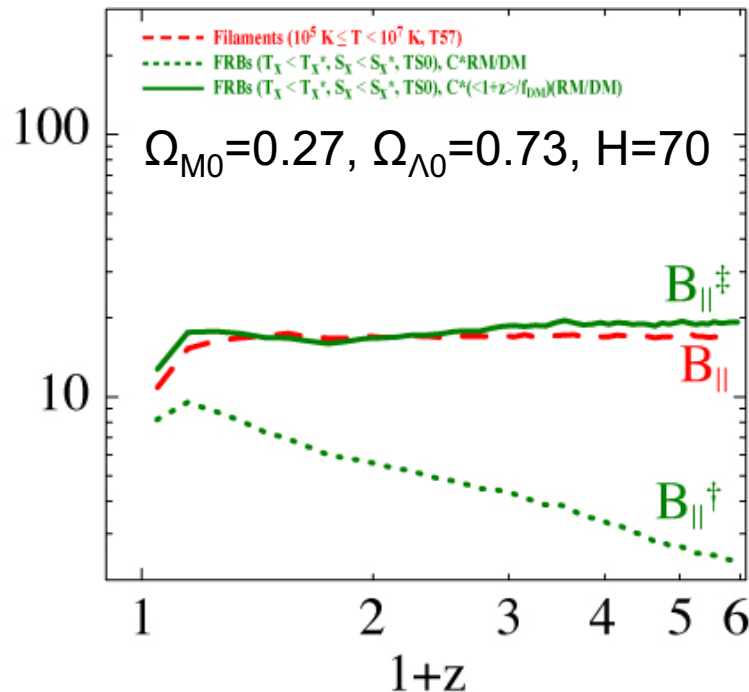
$$DM = C_D \int_0^{z_i} \frac{n_e(z)}{(1+z)} \frac{dl(z)}{dz} dz \quad \text{pc cm}^{-3}$$

$$RM = C_R \int_{z_i}^0 \frac{n_e(z) B_{\parallel}(z)}{(1+z)^2} \frac{dl(z)}{dz} dz \quad \text{rad m}^{-2}$$

$$B_{\parallel}^{\dagger} = \frac{\langle 1+z \rangle}{f_{DM}} B_{\parallel}^{\dagger} = \frac{\langle 1+z \rangle}{f_{DM}} \frac{C_D RM}{C_R DM}$$



Magnetic fields [nG]



3. 将来に向けたキーワード

UHF全帯域受信システムの開発

SQUARE KILOMETRE ARRAY

国産技術!

25

❖ UHF(300-3000 MHz) の両偏波を一度に受信

- 革新的なフィードの開発
- 急峻なフィルタの実装
- 高速な信号処理



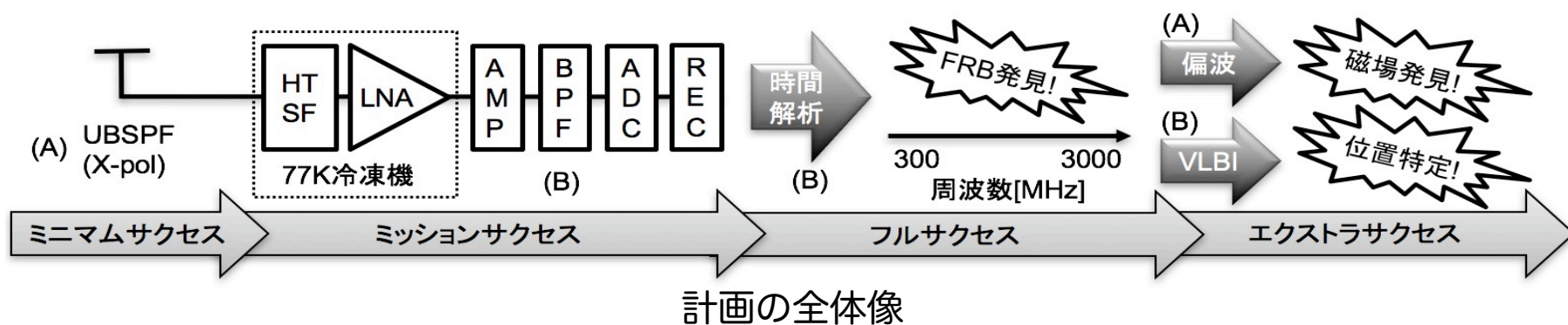
広帯域
フィード



高温超伝導
フィルタ



高速AD
変換器



❖ 低周波電波観測と宇宙磁場

- Stokes I, Q, U, V, RM, トモグラフィーと偏波解消

❖ 研究最前線

- 銀河・銀河団・大規模構造のプラズマ
- 銀河の可視化
- 銀河団・大規模構造の広がった放射の探査
- 粒子加速とAGNフィードバック

❖ 将来にむけたキーワード

- ファラデートモグラフィー
- UHF全帯域の同時観測・装置開発