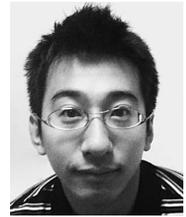


# SKA 計画で迫る宇宙大規模構造の磁場

赤堀 卓也

〈日本学術振興会海外特別研究員（シドニー大学），44 Rosehill Street, Redfern, NSW 2016, Australia〉  
e-mail: akahori@physics.usyd.edu.au



宇宙大規模構造には銀河間磁場が満ちていると考えられています。銀河間磁場は地球に降り注ぐ宇宙線や銀河団での電波放射などに寄与しています。電波観測の一つであるファラデー回転測定（RM）の調査などから、銀河団中の銀河間磁場の性質は徐々に解明されつつあります。しかしながら、銀河団の外、広大なフィラメント構造の銀河間磁場の性質は、理論予測ならびに観測実証が容易でないために、まだほとんど謎に包まれたままです。私は乱流ダイナモと呼ばれる物理機構が予測する銀河間磁場を用いて、フィラメントのRMの振る舞いを予測してきました。そして銀極方向におけるRMの観測値に、フィラメントのRMが大きく寄与している可能性を見つけました（本稿図7）。この予測はALMA計画と対をなすもう一つの国際電波望遠鏡計画 Square Kilometer Array (SKA) にて、検証できる可能性があります。ここでは私の研究成果に加えて、その背景やSKA計画についてもご紹介していきたいと思えます。

## 1. 銀河間磁場の研究状況

### 1.1 はじめに

宇宙には銀河が無数に存在していますが、それらはクモの巣状の「宇宙大規模構造」を形成しています。糸の部分は「フィラメント構造」と呼ばれ、糸の交点には「銀河団」があります。宇宙大規模構造には、水素やヘリウムを主成分とした「銀河間物質」が満ちていると宇宙進化の標準理論は予測します。本稿の主人公「銀河間磁場」は、この銀河間物質が帯びている磁場です。

銀河間磁場は宇宙大規模構造の形成や宇宙論的事象にかかわるため、その理解はたいへん重要です。例えば、銀河系外から地球に飛来する宇宙線は、磁場からローレンツ力を受け偏向します<sup>1)</sup>。ガンマ線エコー・ハローと呼ばれる現象も、中間荷電粒子の偏向が本質的です<sup>2)</sup>。銀河団で観測されているシンクロトロン放射は、磁場が引き起こす現象ですし、放射をしている高速荷電粒子の加速にも関係します<sup>3)</sup>。銀河間物質の加熱現象<sup>4)</sup>や

局所構造への影響<sup>5), 6)</sup> もあります。さらに、宇宙背景放射のゆらぎにも影響を及ぼし<sup>7)</sup>、銀河磁場の起源にも関係します<sup>8)</sup>。このように、銀河間磁場なしに宇宙のダイナミックな現象を語ることはできません。

### 1.2 ファラデー回転の観測

銀河間磁場はX線やガンマ線の観測でも推定できますが、センチメートル波の電波観測が直接的で多数の実績があります<sup>9)</sup>。方法は偏波ファラデー回転とシンクロトロン放射の観測ですが、本稿では偏波ファラデー回転に焦点を絞って紹介します。

偏波（偏光）とは、電場または磁場の振動に規則性がある電磁波（光）です。身の回りでは水面や雪による日光の照り返しは偏光します。宇宙では高速荷電粒子が磁場の周りを旋回する際に生じるシンクロトロン放射光が本質的に偏光です。

さて、偏波が磁化したプラズマを通り抜けると、振動面（偏波角）が回転する現象が起こります。これを「ファラデー回転」と呼びます。ファラデー回転は波長の2乗に比例する特性があり、



す。例えばインフレーション期の磁場生成<sup>20)</sup>や相転移、宇宙の非一様性による宇宙晴れ上がり期の磁場生成<sup>21)</sup>です。このシナリオは宇宙の全域でMpcスケール以上の整った磁場を生成しうる特徴があります。また、宇宙再電離期にも第一世代天体の形成進化に伴って磁場が作られると指摘されています<sup>22)</sup>。ただ、いずれの場合も、予想される磁場強度は実際に銀河団で観測されている値に比べ何桁も小さい傾向にあります。何か増幅過程が必要です。

二つ目は銀河の磁化した星間物質が銀河間空間に流出することによる磁場転化です。確かに、銀河団の銀河間物質で見つかった鉄や酸素などの重元素は、星間物質の流出を裏づけています。流出機構の候補は活動銀河核ジェット<sup>23), 24)</sup>や、銀河風、それに銀河間物質とのラム圧が考えられます。宇宙論的な数値実験によれば、数 $\mu\text{G}$ 程度の銀河間磁場が銀河団で期待されます。ただ、流出過程には仮定や近似を多く含みます。

三つ目は宇宙構造形成で銀河間物質に生じる磁場の生成増幅です。構造形成では銀河・銀河群・銀河団の衝突が頻繁に起こり、そのたびに銀河間物質に衝撃波が発生すると予想されます。その衝撃波ではジェマン効果<sup>25), 26)</sup>やワイベル不安定性<sup>27)</sup>といったプラズマ現象で種磁場が生成される可能性があります。さらに、度重なる衝突で銀河間物質の運動は乱れ、乱流へ至ると予想されます。その際に渦のカスケードが磁力線を伸長し、磁束密度が増大する現象が期待されます(乱流ダイナモ)<sup>28)</sup>。乱流ダイナモは種磁場の由来が何であれそれを増幅する利点がありますが、再現には数値分解能をはじめとする計算科学上の問題があり実証は容易ではありません。

## 2. 銀河間磁場RMの模擬計算

### 2.1 研究の動機と着想

最近、乱流ダイナモのモデルを構築し、構造形成の数値実験に適用した画期的な研究がなされました<sup>28)</sup>(図3)。銀河団の磁場強度は数 $\mu\text{G}$ 、典型的なサイズは数十kpcと見積もられ、観測値とおおむね一致します。最近の銀河団観測では、RMの構造にコルモゴロフ乱流的<sup>\*1</sup>な特徴があることが指摘されています<sup>10)-12)</sup>。乱流ダイナモの作用が示唆される結果です。

このような動向から、私は乱流ダイナモが銀河間磁場を解明するカギだと着目しました。そこで乱流ダイナモモデルに基づいてフィラメント構造のRMを理論予測することにしました。そして、将来の観測で検証するための道筋を探りました。

### 2.2 近傍宇宙のRM

まず、近傍宇宙(赤方偏移 $z=0$ )の数値実験データを使い視線距離100 Mpc/h<sup>\*2</sup>だけRMを足

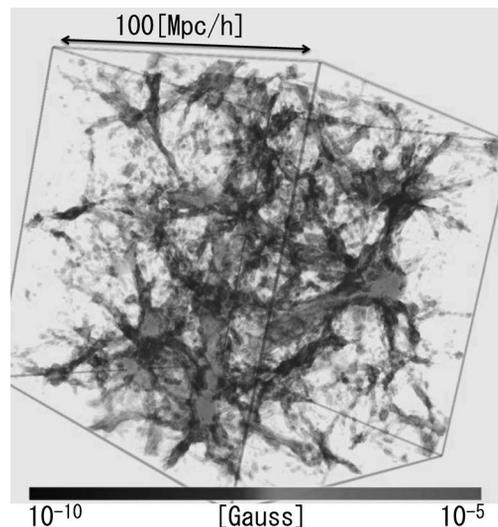


図3 赤方偏移0での銀河間磁場の強度分布<sup>28)</sup>。分布は銀河間物質のクモの巣構造を反映する。

\*1 アンドレイ・コルモゴロフは1941年に理想的な乱流が満たすべき法則を提唱しました。密度場などの3次元パワースペクトルのべきが $-5/3$ に従うことなどで知られています。現在、べきの値は乱流速度や磁場強度によって異なることがわかっていますが、結果的にべきが $-5/3$ になっている場合「コルモゴロフ乱流的」と呼ぶことがあります。

\*2 hはハッブル定数で、測定されている最尤値は0.7くらいです。宇宙論的距離はhで規格化して示すことができます。

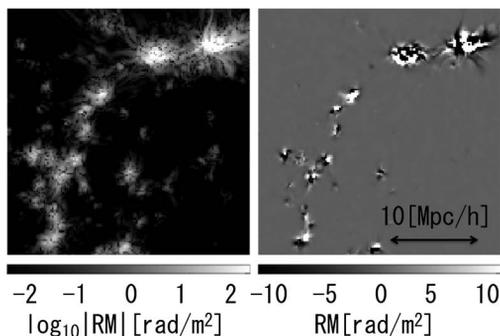


図4 宇宙大規模構造の2次元RMマップ<sup>29)</sup>. 左図は対数で、右図は符号付きの実数でRMを示す.

し合わせました. 得られたRMの2次元マップを図4に示します. 図の右上にRMが100 rad/m<sup>2</sup>を超える領域が2カ所ありますが, これらはガス温度から銀河団と推定されます. そして銀河団から左下方向に伸びる構造が, フィラメント構造です. RMはフィラメント内の銀河群では10 rad/m<sup>2</sup>程度, 密度の高いフィラメントでは1 rad/m<sup>2</sup>程度とわかりました.

RMの符号(白黒)に注目してみると, 場所ごとに反転しているのがわかります. 磁場が3次元的にうねって分布しているので, その曲がりの典型的なサイズの間隔で視線方向の磁場の向きが反転し, RMの符号も反転するのです.

視線方向の分布を図5に示します. フィラメントの中心部では磁場強度が0.1 μGに達しています<sup>\*3</sup>. また, 磁場の向きがフィラメントの内部で何度も反転しています. その典型的な間隔は数百kpcです. このランダムな反転は, RMの励起がランダムウォーク過程になることを意味します. もう一つわかることは, RMが密度中心付近で最大になることです. 結果的に, RMの観測値(積分値)はフィラメント中心部のRMの値に近くなります. RM観測は中心部の磁場を主に観測するとも言えます.

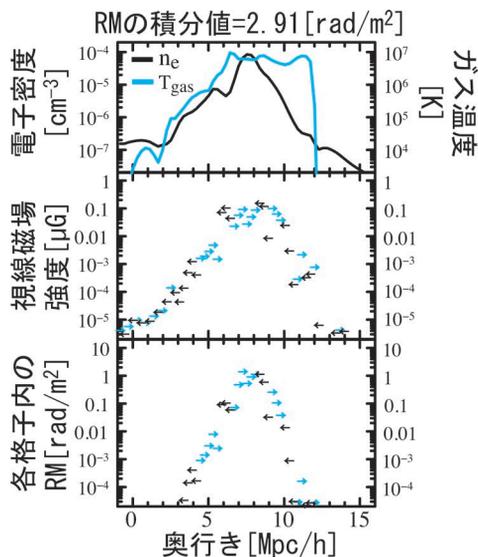


図5 フィラメント構造を貫く視線の物理量の分布<sup>29)</sup>. 上段黒線が電子密度, 青線がガス温度, 中段が磁場強度, 下段が計算格子(約200 kpc)ごとのRM. 磁場が観測者の向きの場合を黒矢印, 反対向きの場合を青矢印で示す.

私はさらに, フィラメントのRMの平均2乗偏差を多数の数値実験データを用いて調べました<sup>\*4</sup>. その結果, 1.4 rad/m<sup>2</sup>と求まりました. 近傍の宇宙では距離100 Mpc/hの間に平均1回フィラメントを通過するので, 近傍宇宙のフィラメントあたりのRMの平均2乗偏差が大体1 rad/m<sup>2</sup>であると結論づけることができます.

ほかにも確率分布が対数正規に従うことや, RMパワースペクトルのピークが1 Mpc/hくらいにあることなど, ダイナモ増幅された磁場を起源とするRMの特徴が明らかにされました.

### 2.3 宇宙論的な寄与

RM観測に用いられる電波銀河や準星は, 赤方偏移z=1あたりをピークに3から5程度まで広く分布しています. そのため偏波は宇宙論的な距離を旅し, 何度もフィラメント構造を通過します.

<sup>\*3</sup> フィラメント全体の体積平均は0.01 μG程度です.

<sup>\*4</sup> 平均値は0 rad/m<sup>2</sup>です. 宇宙の等方性を仮定しているので統計的には磁場の向きに偏りがありません.

次にそのRMの宇宙論的な寄与を調べました。

はじめに簡単な見積もりをします。まず遠方宇宙で起きたファラデー回転は、観測される波長より短波長で起きたものです。同じRMに対しては波長の2乗でファラデー回転は小さくなるため、RMは観測される波長においては実効的に $RM(1+z)^{-2}$ で寄与します。次に視線上におけるフィラメントの厚みの総和を計算データから求めると、赤方偏移で単調増加しながら $z>1$ ではほぼ飽和し100 Mpc/hくらいとわかります。フィラメント一つの厚みが10 Mpc/hくらいなので、10回フィラメントを通過するという事です。さらに電子密度の進化を考慮するために、密度の重みをかける、つまり柱密度でこれを計算すると、値は40くらいになります。そこで各通過でのRMを1 rad/m<sup>2</sup>、これが正負無作為のランダムウォーク過程の加算と予測されるので、合算値は1 rad/m<sup>2</sup> ×  $\sqrt{40}$  = 6.4 rad/m<sup>2</sup>となります。加えて、ある温度の銀河間物質では、磁場は因子2くらい過去の方が強度は大きいので<sup>27)</sup>、それまで考慮すればRMは数-10 rad/m<sup>2</sup>になると予測されます。

より定量的に探るために、赤方偏移ごとに出力された数値実験データをつなぎ、RMの宇宙論的距離の足し合わせを行いました。観測に基づく偏波源の赤方偏移分布も考慮しました。得られたマップを図6に示します。宇宙論的寄与によって空の大半が銀河間磁場のRMで埋めつくされるのがわかります。

フィラメントのRMの平均2乗偏差を複数の数値実験データから調べた結果、偏差は積分距離の増加で単調増加しますが、赤方偏移3程度までには数-10 rad m<sup>-2</sup>の値に飽和することがわかりました。赤方偏移効果の影響です。なおX線表面輝度や温度の情報から銀河団の領域をどのように取り除くかによって結果に幅が出ています。

ほかにも確率分布が対数正規に従うことも再確認できました。RMのパワースペクトルは高赤方偏移にあるフィラメントほど見かけの大きさが小

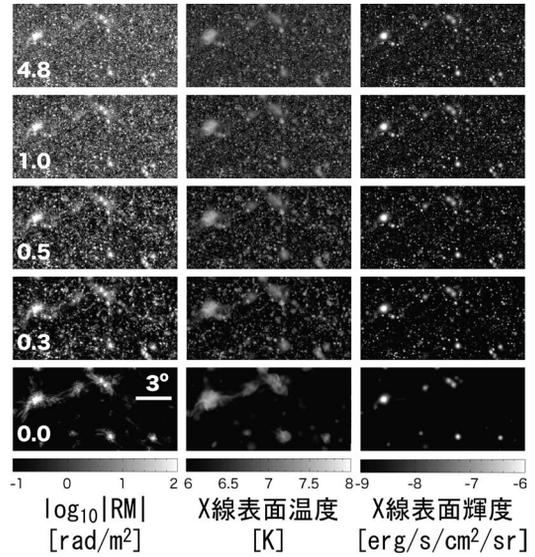


図6 左からRM, X線表面温度, X線表面輝度の2次元マップ<sup>30)</sup>。下から上に積分距離を $z=0.03, 0.3, 0.5, 1.0, 4.8$ と増やした結果。RMは偏波源の赤方偏移に至ったら積分を打ち切る。

さくなることから、近傍の寄与だけでは1度くらいにピークがありますが、高赤方偏移まで加味していくと0.1度までなだらかに横ばいしていき、0.2度付近にピークができることがわかりました。

さらに、2次構造関数という指標を調べました(図7)。構造関数はパワースペクトルと同様にデータの位置相関を示す指標です。銀河系の寄与が少ない銀極方向の調査があるので、それと比較が可能です。計算の結果、0.1度以上では100-200 rad<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>で平坦な曲線になることがわかり、そして銀極方向の観測値に近い値を示すことがわかりました。つまり、大規模構造のRMが観測値に大きく寄与している可能性があるということです。これは世界で初めての発見です。

## 2.4 銀河系の影響

図7の結果から、大規模構造のRMを見つけたと結論づけるのは早計です。なぜならRMの観測値には明らかに銀河系の寄与が含まれているからです。そこで銀極方向の観測に銀河系の寄与がどの程度あるのかを調べることにしました。

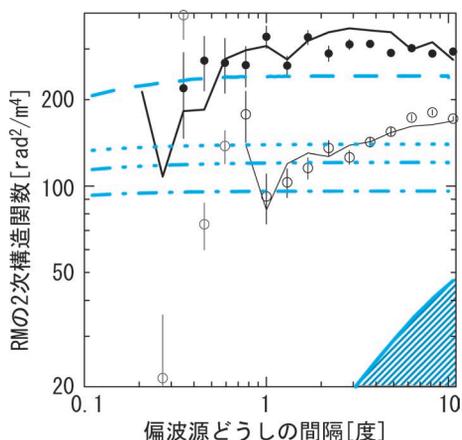


図7 RMの2次構造関数. 黒の太実線ならびに黒丸は南銀極, 黒の実線ならびに白丸は北銀極方向の観測値<sup>31), 32)</sup>. 実線と点は異なる独立した観測から得られたものである. 青の破線, 点線, 3点破線, 1点破線は宇宙論的距離を積分した銀河間磁場のRMから得られる理論値<sup>30)</sup>. それぞれ異なる手法で銀河団の成分を取り除き, フィラメントの成分のみを示している. 青の斜線領域は銀極方向の銀河系RMから得られる理論値<sup>34)</sup>. 銀河系RMだけでは観測値の強度とべきを説明できない.

ここで問題となるのは, 既存の銀河系モデルの大半は乱流磁場を精密に考慮していないことです. 一方で銀極方向は乱流磁場が卓越しているため<sup>31), 32)</sup>, 乱流磁場をきちんと取り扱わなければ正しく議論ができません. そこで, 従来の銀河系モデル<sup>33)</sup>に磁気流体乱流の数値実験結果を盛り込むという新しい方法を考案しました. そして平均的な磁場強度, 星間ガスの温度, 乱流の速度, 分散測度 (DM), 放射測度 (EM) などの観測値と矛盾しないモデルを構築し, そのうえで銀極方向の銀河系RMを調べました.

その結果, 銀河系RMの分散は $2-5 \text{ rad m}^{-2}$ であって, 観測値の $9 \text{ rad m}^{-2}$ <sup>31)</sup>よりずっと小さいことがわかりました. 2次構造関数は10度くらいで大きくても数十 $\text{rad}^2/\text{m}^4$ で, かつ明らかな幕があり, 観測結果と一致しません (図7). これらの結果は, 観測値には何らかの考慮されていない成分が含まれていることを強く示唆します. な

お地球磁気圏RMの較正誤差は $1-2 \text{ rad/m}^2$ なので, その不定性だけでは違いを説明できません.

では観測値を説明する成分とは何でしょうか? 銀河間磁場のRMが挙げられます. 確かに構造関数が $0.1$ 度くらいまで $100-200 \text{ rad}^2/\text{m}^4$ で平坦なのは, 観測結果に類似しています. 私の研究は銀河間磁場のRMの構造関数は $0.1$ 度程度から減少し始めると予想しているので, 将来それが検証されれば, 強度だけでなく構造の特徴からも, 銀河間磁場のRMの可能性が高まるでしょう.

別の可能性は, この研究では考慮されていない銀河系の局所構造です. パーカー不安定性で励起された局所磁場<sup>35)</sup>や, 超新星残骸などの星間物質が挙げられます. 観測されている平坦な構造関数を再現するような, 角度スケールの小さい構造が必要です. もう一つの可能性は, 偏波源そのものがもっているRMです. この場合, 偏波源同士に因果関係はないため, 構造関数は平坦と推測されます. ただこの場合, 前述の赤方偏移効果によって遠方天体ほどRMが小さくなると期待されますが, 観測データにはそのような傾向は見られていません<sup>17)</sup>. ほかに, 系外銀河が偶然視線を遮っている可能性もあります. この場合も構造関数は平坦と推測されます. 視線を遮る頻度がどのくらいなのかは自明ではないので, ケーサーの可視光吸収線の調査などが重要です.

残念ながら, 既存の観測は構造関数の小スケールの成分に大きな不定性を含んでいるため, どの成分が本質的か結論づけるのは難しい状況にあります. 小スケールの成分を探るには, よりたくさん偏波源を見つけ, 近接する偏波源ペアを得る必要があります. それを可能にする将来計画・SKAについて, 次の節で紹介していきます.

### 3. 銀河間磁場研究の展望

#### 3.1 SKA計画

SKA (エスケーエー, Square Kilometer Array) は2020年頃の運用を目指す電波望遠鏡です. ア

ルマ望遠鏡（ミリ波・サブミリ波）と相補的な、センチ波・メートル波を網羅する唯一の国際大型計画です。SKAは「宇宙磁場の起源と進化」を含む、この波長帯で果たすべき五つの科学目標の達成を目指します。SKAは目標達成のため、従来（米国Very Large Array）比で100倍の高感度、200平方度の広視野、0.1-10 GHzの広帯域、この波長帯で0.1秒角という高分解能を要求します。この要求を満たすため、直径15 mパラボラアンテナ3,000台、離散型開口アンテナ（TVアンテナ風）250万台、そして密集型開口アンテナ200台を、南アと豪を中心に3,000 kmの範囲に数百の基地局に分けて設置します。100 MWの電力消費（10万人都市規模）に1 EFLOPsのデータセンター（京100台分）、1,500億円の予算で臨む、人類史上最大級の天文台になる予定です。周辺地域の発展を図りながら、太陽光発電、蓄電池、スマートグリッドなどを活用した環境に配慮した天文台を目指しています。

### 3.2 SKAと銀河間磁場研究

さて、具体的にどのくらいSKAがすごいのか、例を二つ紹介します。一つ目は感度です。一般に感度がよいほどよりたくさんの天体を発見できます。図8にはその発見してきた数の推移を示します。大体20年で10倍、2012年時点で37,543偏波源です（図2）。これがSKAでは爆発的に増えて、全天の走査で数億の偏波源、深宇宙探査では1平方度あたり2万強の偏波源を発見する見込みです。このデータを用いれば、構造関数の小スケールの振る舞いをかつてない高精度で調べることがかなうでしょう。

二つ目は広帯域です。広帯域化で得られる革新技術に「直線偏波ファラデー回転測定合成法」というのがあります（別名ファラデートモグラフィ）。トモグラフィとはCTスキャンに代表される断層可視化技術です。SKA時代では、視線上のRMの各成分が区別できるようになります（図9）。この方法を用いれば、銀河系RMを

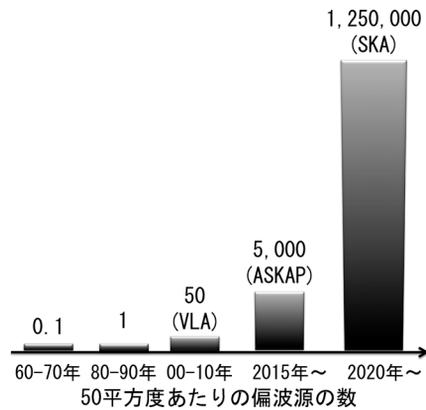


図8 RMが測定された系外偏波源の個数推移。各年代の代表的カタログや計画推進書から引用し、50平方度あたりに規格化した。将来の観測では膨大な数の偏波源が得られる見込み。

広帯域偏波データが・・・偏波強度の分布に！

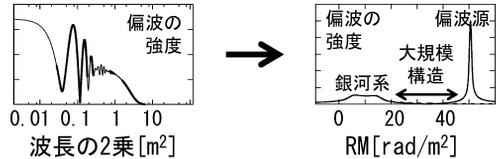


図9 直線偏波ファラデー回転測定合成法。上の例では、広帯域偏波データから、銀河系と電波源の放射、そして銀河間磁場のRM分布が合成されている<sup>36)</sup>。

効果的に取り除き、直接銀河間磁場のRMを推定できると期待されます。

### 3.3 国際協力と日本の取り組み

SKAは既存の天文台の単なる拡張ではなく、技術革新に挑戦する計画です。その実現に向けて世界中で実証実験が進んでいます。現参加国は南ア・豪・ニュージーランド・英・伊・蘭・中・加・独・スウェーデンです。これに仏・印・日・韓などが興味を表明しています。

日本では120名を超える研究者が日本SKAコンソーシアム（SKAJP）を組織し調査を進めています。磁場領域は、国内で磁場研究をリードする研究者が集まったSKAJP「宇宙磁場」科学検討班が、2010年の発足以降40回を超える定例会議によって研究を進めています。私はそのとりまと

めをしながら、豪の諸計画に直接携わって調査を進めています。

SKAという野心的な計画に、科学・技術の先進国である日本は世界から期待されています。その期待と責任にどのように応えていくか、今後さらに議論が必要でしょう。確かなことは、SKA計画は次世代の電波天文学をどのように進めるかという問いに対する一つの答えであり、そして全く新しい宇宙磁場の世界をわれわれに見せてくれるだろうということです。これからの10年間の道のりを着実に歩んでいくことが、計画の成功のために極めて重要でしょう。

## 謝 辞

忠南大学のDongsu Ryu氏には自由で刺激的な研究環境を提供していただき、かつ多くの助言と励ましをいただいたことを御礼申し上げます。銀河間磁場の研究は氏とともに行ったものです。銀河系磁場の研究ではシドニー大学のBryan Gaensler氏に数々の有益な助言をいただいたことを御礼申し上げます。また氏の受入れの下で、日本学術振興会から支援を受けていることを御礼申し上げます。SKAJP「宇宙磁場」科学検討班の皆様には、日頃から数々の助言と協力をいただき心から感謝いたします。最後に、私の研究活動を応援してくれる妻にいつもどうもありがとう。

## 参考文献

- 1) Takami H., et al., 2009, JCAP 6, 31
- 2) Takahashi K., et al., 2012, ApJ 744, L7
- 3) Fujita Y., et al., 2007, ApJ 663, L61
- 4) Fujita Y., Ohira Y., 2011, ApJ 738, 182
- 5) Asai N., et al., 2005, Adv. in Space Res. 36, 636
- 6) Takizawa M., 2008, ApJ 687, 951
- 7) Yamazaki D. G., et al., 2012, Physics Report 517, 141
- 8) Sofue Y., et al., 2010, PASJ 62, 1191
- 9) Feretti L., et al., 2012, A&A Rev. 20, 54
- 10) Vogt C., Ensslin T. A., 2005, A&A 434, 67
- 11) Guidetti D., et al., 2008, A&A 483, 699
- 12) Bonafede A., et al., 2010, A&A 513, 30
- 13) Xu Y., et al., 2006, ApJ 637, 19

- 14) Taylor A. R., et al., 2009, ApJ 702, 1230
- 15) Schnitzeler D. H. F. M., 2010, MNRAS 409, 99
- 16) Bernert M., et al., 2012, ApJ 761, 144
- 17) Hammond A. M., et al., 2012, ApJ, submitted
- 18) Ryu D., et al., 2012, SSR 166, 1
- 19) Widraw L., et al., 2012, SSR 166, 37
- 20) Bamba K., et al., 2008, JCAP 11, 13
- 21) Ichiki K., et al., 2006, Nature 311, 827
- 22) Ando M., et al., 2010, ApJ 716 1566
- 23) Xu H., et al., 2008, ApJ 681, L61
- 24) Donnert J., et al., 2009, MNRAS 392, 1008
- 25) Ryu D., et al., 1998, A&A 335, 19
- 26) Kulsrud R. M., et al., 1997, ApJ 480, 481
- 27) Okabe N., Hattori M., 2003, ApJ, 599 964
- 28) Ryu D., et al., 2008, Science 320, 909
- 29) Akahori T., Ryu D., 2010, ApJ 723, 476
- 30) Akahori T., Ryu D., 2011, ApJ 738, 134
- 31) Mao S. A., et al., 2010, ApJ 714, 1170
- 32) Stil J., et al., 2011, ApJ 764, 4
- 33) Waelkens A., et al., 2009, A&A 495, 697
- 34) Akahori T., et al., 2013, ApJ 767, 150
- 35) Machida M., et al., 2013, ApJ 764, 81
- 36) Akahori T., et al., 2012, ApJ, submitted

## Exploration of Magnetic Fields in the Cosmic Web with the SKA

Takuya AKAHORI

*JSPS Postdoctoral Fellow for Research Abroad,  
The University of Sydney, 44 Rosehill Street,  
Redfern, NSW 2016, Australia*

Abstract: The origin and evolution of the intergalactic magnetic field (IGMF) are not known well. We investigated Faraday rotation measure (RM) due to the IGMF, using a model IGMF based on turbulence dynamo. We found that the root-mean-square value of RM for filaments of galaxies is several-ten  $\text{rad}/\text{m}^2$ . We also calculated Galactic RM toward high Galactic latitudes, using data of MHD turbulence simulations. We found that the standard deviation of Galactic RM toward high Galactic latitudes is 2–5  $\text{rad}/\text{m}^2$ , while the observed one is 9  $\text{rad}/\text{m}^2$ . These results imply that RM due to the IGMF significantly contributes to the observed RM toward high Galactic latitudes. The IGMF could be further investigated with future SKA and SKA pathfinders.