

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01110

研究課題名（和文）長波長電波観測による宇宙再電離と磁場研究の新展開

研究課題名（英文）New Developments in Research on Cosmic Reionization and Cosmic Magnetic Fields  
by Long Wave Length Radio Observations

研究代表者

杉山 直 (Sugiyama, Naoshi)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：70222057

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,900,000円

研究成果の概要（和文）：豪州で実施中のMWA計画に参加し、宇宙再電離(EoR)に関する研究を行った。MWAの観測データの自己相関パワースペクトル、および宇宙マイクロ波背景輻射との相互相関スペクトル解析より、EoR中性水素21cmシグナルへの上限を得た。輻射輸送を詳細に取り扱った数値計算から初代天体質量関数と21cm線シグナルとの関係を調べ、21cm線のグローバルシグナルから初代星の性質に迫る道筋をつけた。加えて、銀河と21cm線との相互相関シグナルの理論モデルを構築し、この手法が将来の銀河探査によるデータと組み合わせること、前景放射を避けてEoR21cm線シグナルを得ることに有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙から届く100MHz帯の低周波電波には、宇宙が誕生してから数億年の頃の宇宙（宇宙再電離期と呼ばれる）の様子が刻まれていると考えられている。本研究ではオーストラリアの砂漠地帯で実施されている低周波電波望遠鏡MWA実験に参加し、宇宙再電離期からの信号の初検出を目指し、理論モデルの構築を行った。近い将来得られる低周波電波の観測データと本研究の理論モデルとを比較することで、宇宙で最初の星や銀河はいつ、どのように誕生したのかという学術的な問いに答えることができるようになると期待される。

研究成果の概要（英文）：We have studied the Epoch of Reionization (EoR) as part of the ongoing MWA project in Australia, obtaining upper limits on the EoR neutral hydrogen 21cm signal from analysis of the auto-correlation power spectra of the MWA radio maps and cross-correlation spectra with the cosmic microwave background maps. Numerical calculations with a detailed treatment of radiation transfer are used to investigate the relationship between the initial mass function of the first stars and the 21cm line signal and show that the global signal of the 21cm line can provide information on the nature of the first stars. In addition, a theoretical model of the cross-correlation signal between galaxies and the 21cm line is developed. This method, in combination with data from future galaxy surveys, is shown to be effective in obtaining the EoR 21cm line signal while avoiding foreground radiation.

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：宇宙再電離

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の晴れ上がり後、数億年程度で宇宙を満たす水素が再び電離（宇宙再電離）したことは観測的に示されているが、宇宙再電離の開始時期や経過、主たる電離光子源など、再電離過程の詳細は未だ分かっていない。研究開始当初までに遠方銀河およびクェーサーの観測や、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の非等方性からも宇宙再電離についての示唆が得られているが、観測から得られる情報は再電離期終盤に限られている。そのような中、宇宙再電離期開始頃に宇宙空間を満たしていたと考えられる中性水素を直接観測することができる、中性水素の超微細構造 21 cm 線観測が、宇宙再電離期を探る有力な手法として注目されている。宇宙再電離期の 21 cm 線は赤方偏移して 100MHz 帯の低周波電波として観測される。このような広帯域低周波電波観測は宇宙磁場研究にも飛躍的な進展をもたらしてくれると期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究分野の目的は宇宙再電離期からの中性水素 21 cm 線シグナルを検出することである。この目的に向かって本研究計画では、シグナル検出の最大の障壁になると思われる前景放射問題を軽減するために遠方銀河や CMB と低周波電波の相互相関をとることで 21 cm 線シグナルの初検出および再電離史の解明を目指すものである。実際に得られるであろう観測データから再電離の物理を理解するためには観測と比較可能な理論モデルが不可欠である。しかし宇宙再電離では星・銀河形成やこれら天体から発せられる光の輻射輸送等、多くの物理過程が複雑に絡み合うためシミュレーションの計算コストが高く、決定的な理論モデルが未だない。そこで本研究では様々な理論を取り扱えるよう、汎用性が高く、高速で観測データとの比較に耐えうる予言能力のある数値シミュレーションコードの開発も行う。

## 3. 研究の方法

オーストラリアの砂漠地帯で実施される Murchison Widefield Array (MWA) 計画 (図 1) に参加し、低周波電波データを用いた研究を行う。相互相関に用いる予定の遠方銀河については圧倒的広視野をもったすばる望遠鏡を用いて研究分担者大内らによって取得するデータを用いる。これら両方の観測装置に容易にアクセスできるのは申請者の研究グループの強みである。MWA 実験の実際のデータを用いて解析手法を取得していくとともに、開発する数値シミュレーションが生成するデータを用いた模擬観測を通じて、理論モデルの開発を行っていく。



図 1 : MWA 実験のアンテナ

## 4. 研究成果

### (1) CMB-21cm 相互相関パワースペクトルへの制限と系統誤差について

宇宙再電離期からの中性水素 21 cm 信号の観測は、非常に明るい銀河系や、系外からの電波源、そして複雑な検出器からの系統誤差のために難しくなっている。これらの困難を少しでも軽減するために有効な手法として他の観測量との相互相関解析がある。ここでは MWA で観測された広視野の低周波電波画像と CMB 観測衛星 PLANCK で測定された CMB の相互相関解析を世界で初めて行い、パワースペクトルのポインティング依存性、周波数依存性を精査した。得られたパワースペクトルを図 2 に示す。その結果、現在の観測精度では誤差がまだ前景放射に支配されており、クロスパワースペクトルは信号なしと矛盾しないという結論が得られた。またそのクロスパワースペクトルの形状から観測範囲の最も小スケールにおいて、予期していなかった系統誤差の存在が明らかになった。多項式フィッティング法を用いて前景放射の寄与をさらに一桁減らすことに成功したが、現在の MWA の観測から理論的に期待される 21cm-CMB 相互相関のシグナルを検出するには 99.95% の前景放射除去に加えて、2000 時間の観測時間と全天の 50% の観測領域が必要となることを見出した。

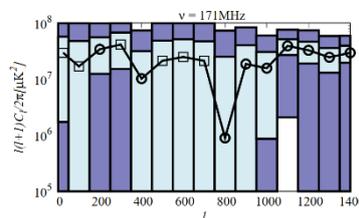


図 2 : MWA で取得された低周波電波画像と Planck 衛星によって得られた CMB 画像の相互相関パワースペクトル (Yoshiura et al., MNRAS, 2019)

(2) MWA phase II 実験での、赤方偏移 7 における EoR パワースペクトル解析初期成果

本研究では低周波電波観測における較正や前景放射の特性を調べ、系統誤差の評価を行い中性水素 21 cm 自己相関パワースペクトルに対する上限を得ることに成功した。前景放射問題を解決する手段の一つは視線方向と視線方向に垂直なフーリエ空間において、前景放射が卓越する領域を使用しないことである。解析によって得られた 2 次元パワースペクトルを図 3 に示す。この 2 次元パワースペクトル解析において、実験に使用したケーブルに由来する MWA 実験特有の系統誤差がある特定の視線方向の波数に現れることが分かった。この問題は MWA phase III 実験で最初に解決すべき問題として認識されるようになった重要な知見であり、引き続き継続中の基盤研究 (A) (代表杉山) によってその改善を目指しているものである。

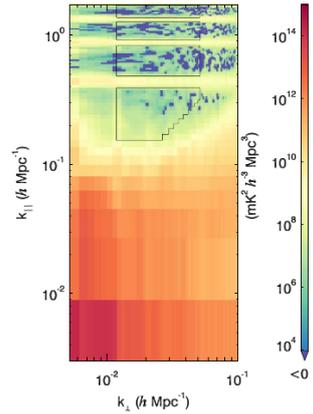


図 3: 21 cm シグナルの 2 次元パワースペクトル (Li et al., ApJ, 2019)

(3) 初代星周辺における 21 cm シグナルの質量依存性と宇宙再電離グローバルシグナルへの影響

初代星近傍にある中性水素からの 21 cm シグナルは、星の性質を反映したものとなることが予想される。本研究ではハロー内の高密度ガスを解像した高解像度の放射流体シミュレーションを行い、大スケールの中性水素の分布に影響を与える電離光子の脱出割合の時間発展を追跡した。その結果、21 cm 輝度温度分布は電離光子の脱出割合の時間発展を通じて初代星とハローの質量に特に敏感であることを見出した。小質量星の場合、電離光子はハローガスに吸収され、ハローの外側で 21cm の深い吸収が長く続く。一方、大質量星では、放出された光子が周囲の銀河間物質を加熱するため、21cm の発光が空間的に広がって現れる。このような違いは将来の SKA のような巨大望遠鏡を用いても観測的に分解することは困難であるものの、シグナルを全天平均したグローバルシグナルの振幅が、この構成質量に依存した加熱率によって変化することを明らかにした。

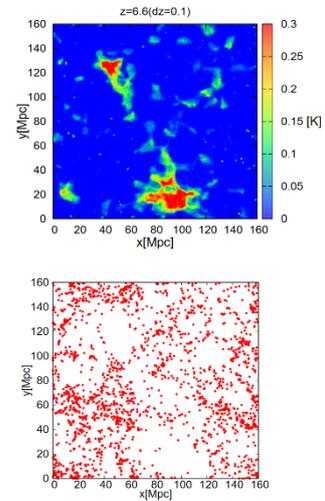


図 4: 数値シミュレーションで得られた 21 cm シグナル (上) とライマンアルファ銀河の分布 (下) (Kubota et al., MNRAS, 2018)

(4) 遠方銀河-21cm シグナル相互相関解析にむけたシミュレーション解析

再電離期の銀河分布は銀河系内のシンクロトロン放射に由来する前景放射の分布とは統計的に独立であるため、21 cm 線と再電離期のライマンアルファ銀河との相互相関シグナルは前景放射問題を軽減する方法として注目されている。ライマンアルファ銀河探査はすばる望遠鏡の HSC 計画で進行中であり、さらに次世代計画の PFS ではその正確な赤方偏移が得られる予定である。そこで、その観測に先駆けて、我々の宇宙再電離シミュレーションデータを用いてこの相互相関シグナルの検出可能性について調査を行った。これは期待されるシグナルの特徴を理論的に見出すとともに、銀河探査の拡張や探査パラメータの最適化について検討するためでもある。解析の結果見積もられた相互相関シグナルのパワースペクトルを、MWA および将来の低周波望遠鏡計画である SKA で期待される感度曲線とともに示す。影の幅は有限のサンプル数からくる統計誤差でありノイズよりも大きい誤差を与えているが、PFS による位置情報を加えることにより統計力が大幅に改善することを明らかにした。

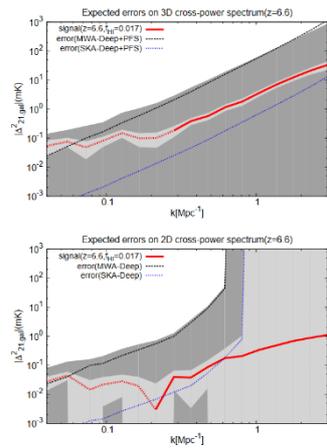


図 5: 期待される相互相関のパワースペクトル (赤線) および MWA (黒点線)、SKA (青点線) で期待されるノイズ振幅。 (Kubota et al., MNRAS, 2018)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計37件（うち査読付論文 36件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Akahori Takuya, Ideguchi Shinsuke, Aoki Takahiro, Takefuji Kazuhiro, Ujihara Hideki, Takahashi Keitaro	4. 巻 70
2. 論文標題 Optimum frequency of Faraday tomography to explore the intergalactic magnetic field in filaments of galaxies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 8 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yonemaru Naoyuki, Kumamoto Hiroki, Takahashi Keitaro, Kuroyanagi Sachiko	4. 巻 478
2. 論文標題 Sensitivity of new detection method for ultra-low-frequency gravitational waves with pulsar spin-down rate statistics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1670 ~ 1676
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty976	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kubota Kenji, Yoshiura Shintaro, Takahashi Keitaro, Hasegawa Kenji, Yajima Hidenobu, Ouchi Masami, Pindor B, Webster R L	4. 巻 479
2. 論文標題 Detectability of the 21-cm signal during the epoch of reionization with 21-cm Lyman emitter cross-correlation ? I	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2754 ~ 2766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiura S, Line J L B, Kubota K, Hasegawa K, Takahashi K	4. 巻 479
2. 論文標題 Detectability of the 21 cm-signal during the Epoch of Reionization with 21-cm Lyman-emitter cross-correlation ? II. Foreground contamination	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2767 ~ 2776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1472	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Machida M, Akahori T, Nakamura K E, Nakanishi H, Haverkorn M	4. 巻 480
2. 論文標題 Radio broadband visualization of global three-dimensional magnetohydrodynamical simulations of spiral galaxies ? I. Faraday rotation at 8 GHz	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 17 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1799	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka Toshiyuki, Hasegawa Kenji, Yajima Hidenobu, Kobayashi Masato I N, Sugiyama Naoshi	4. 巻 480
2. 論文標題 Stellar mass dependence of the 21-cm signal around the first star and its impact on the global signal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1925 ~ 1937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1967	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimoda Jiro, Akahori Takuya, Lazarian A, Inoue Tsuyoshi, Fujita Yutaka	4. 巻 480
2. 論文標題 Discovery of Kolmogorov-like magnetic energy spectrum in Tycho 's supernova remnant by two-point correlations of synchrotron intensity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2200 ~ 2205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyashita Yoshimitsu, Ideguchi Shinsuke, Nakagawa Shouta, Akahori Takuya, Takahashi Keitaro	4. 巻 482
2. 論文標題 Performance test of QU-fitting in cosmic magnetism study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2739 ~ 2749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2862	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Machida M, Akahori T, Nakamura K E, Nakanishi H, Haverkorn M	4. 巻 482
2. 論文標題 Radio broad-band visualization of global three-dimensional magnetohydrodynamical simulations of spiral galaxies ? II. Faraday depolarization from 100 MHz to 10 GHz	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3394 ~ 3402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2940	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshiura S, Ichiki K, Pindor B, Takahashi K, Tashiro H, Trott C M	4. 巻 483
2. 論文標題 Study of systematics effects on the cross power spectrum of 21-cm line and cosmic microwave background using Murchison Widefield Array data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2697 ~ 2711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Huang Fa Peng, Kadota Kenji, Sekiguchi Toyokazu, Tashiro Hiroyuki	4. 巻 97
2. 論文標題 Radio telescope search for the resonant conversion of cold dark matter axions from the magnetized astrophysical sources	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.123001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.123001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshiura Shintaro, Takahashi Keitaro, Takahashi Tomo	4. 巻 98
2. 論文標題 Impact of EDGES 21-cm global signal on the primordial power spectrum	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.063529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.063529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akahori Takuya	4. 巻 6
2. 論文標題 Strategy to Explore Magnetized Cosmic Web with Forthcoming Large Surveys of Rotation Measure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 118 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies6040118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakemi Haruka, Machida Mami, Ohmura Takumi, Ideguchi Shinsuke, Miyashita Yoshimitsu, Takahashi Keitaro, Akahori Takuya, Akamatsu Hiroki, Nakanishi Hiroyuki, Kurahara Kohei, Farnes Jamie	4. 巻 6
2. 論文標題 Faraday Tomography of the SS433 Jet Termination Region	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 137 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies6040137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Minoda Teppei, Hasegawa Kenji, Tashiro Hiroyuki, Ichiki Kiyotomo, Sugiyama Naoshi	4. 巻 6
2. 論文標題 Thermal Sunyaev Zel'dovich Effect in the IGM due to Primordial Magnetic Fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 143 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies6040143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sekiguchi Toyokazu, Takahashi Tomo, Tashiro Hiroyuki, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Probing primordial non-Gaussianity with 21 cm fluctuations from minihalos	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 033 ~ 033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/02/033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 O' Sullivan S. P., ... Takahashi K. (30名中24番目)	4. 巻 622
2. 論文標題 The intergalactic magnetic field probed by a giant radio galaxy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A16 ~ A16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201833832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Solarz Aleksandra, Pollo Agnieszka, Bilicki Maciej, Papiak Agata, Takeuchi Tsutomu T, Piatek Pawe	4. 巻 71
2. 論文標題 Radio-infrared correlation for local dusty galaxies and dusty AGNs from the AKARI All-Sky Survey	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 9 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tamura Yoichi, ... Takeuchi Tsutomu T. (22名中10番目)	4. 巻 874
2. 論文標題 Detection of the Far-infrared [O iii] and Dust Emission in a Galaxy at Redshift 8.312: Early Metal Enrichment in the Heart of the Reionization Era	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 27 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Minoda Teppei, Hasegawa Kenji, Tashiro Hiroyuki, Ichiki Kiyotomo, Sugiyama Naoshi	4. 巻 96
2. 論文標題 Thermal Sunyaev-Zel'dovich effect in the intergalactic medium with primordial magnetic fields	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.123525	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshiura Shintaro, Hasegawa Kenji, Ichiki Kiyotomo, Tashiro Hiroyuki, Shimabukuro Hayato, Takahashi Keitaro	4. 巻 471
2. 論文標題 Constraining the contribution of galaxies and active galactic nuclei to cosmic reionization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3713 ~ 3726
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1754	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimabukuro Hayato, Yoshiura Shintaro, Takahashi Keitaro, Yokoyama Shuichiro, Ichiki Kiyotomo	4. 巻 468
2. 論文標題 Constraining the epoch-of-reionization model parameters with the 21-cm bispectrum	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1542 ~ 1550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx530	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horii Toshihiro, Asaba Shinsuke, Hasegawa Kenji, Tashiro Hiroyuki	4. 巻 69
2. 論文標題 Can HI 21-cm lines trace the missing baryons in the filamentary structures?	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ouchi Masami, Harikane Yuichi, Shibuya Takatoshi, Shimasaku Kazuhiro, Taniguchi Yoshiaki, Konno Akira, Kobayashi Masakazu, Kajisawa Masaru, Nagao Tohru, Ono Yoshiaki, Inoue Akio K, Umemura Masayuki, Mori Masao, Hasegawa Kenji, Higuchi Ryo, Komiyama Yutaka, Matsuda Yuichi, Nakajima Kimihiko, Saito Tomoki, Wang Shiang-Yu	4. 巻 70
2. 論文標題 Systematic Identification of LAEs for Visible Exploration and Reionization Research Using Subaru HSC (SILVERRUSH). I. Program strategy and clustering properties of $\sim 2000$ Ly $\alpha$ emitters at $z \sim 6.7$ over the $0.3 \times 0.5 \text{ Gpc}^2$ survey area†	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimabukuro Hayato, Yoshiura Shintaro, Takahashi Keitaro, Yokoyama Shuichiro, Ichiki Kiyotomo	4. 巻 468
2. 論文標題 Constraining the epoch-of-reionization model parameters with the 21-cm bispectrum	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1542 ~ 1550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx530	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamauchi Daisuke, Yokoyama Shuichiro, Tashiro Hiroyuki	4. 巻 96
2. 論文標題 Constraining modified theories of gravity with the galaxy bispectrum	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.123516	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saga Shohei, Tashiro Hiroyuki, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 474
2. 論文標題 Magnetic reheating	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L52 ~ L55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slx195	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Durrive Jean-Baptiste, Tashiro Hiroyuki, Langer Mathieu, Sugiyama Naoshi	4. 巻 472
2. 論文標題 Mean energy density of photogenerated magnetic fields throughout the Epoch of Reionization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1649 ~ 1658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Akahori Takuya, Nakanishi Hiroyuki, Sofue Yoshiaki, Fujita Yutaka, Ichiki Kiyotomo, Ideguchi Shinsuke, Kameya Osamu, Kudoh Takahiro, Kudoh Yuki, Machida Mami, Miyashita Yoshimitsu, Ohno Hiroshi, Ozawa Takeaki, Takahashi Keitaro, Takizawa Motokazu, Yamazaki Dai G	4. 巻 70
2. 論文標題 Cosmic magnetism in centimeter- and meter-wavelength radio astronomy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ideguchi Shinsuke, Tashiro Yuichi, Akahori Takuya, Takahashi Keitaro, Ryu Dongsu	4. 巻 843
2. 論文標題 Study of the Vertical Magnetic Field in Face-on Galaxies Using Faraday Tomography	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 146 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa79a1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshiura Shintaro, Takahashi Keitaro	4. 巻 473
2. 論文標題 The variance of dispersion measure of high-redshift transient objects as a probe of ionized bubble size during reionization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1570 ~ 1575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2462	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murata Katsuhiro L., Yamada Rika, Oyabu Shinki, Kaneda Hidehiro, Ishihara Daisuke, Yamagishi Mitsuyoshi, Kokusho Takuma, Takeuchi Tsutomu T.	4. 巻 472
2. 論文標題 A relationship of polycyclic aromatic hydrocarbon features with galaxy merger in star-forming galaxies at $z < 0.2$	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 39 ~ 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1902	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayatsu Natsuki H., ..., Takeuchi Tsutomu T., ...	4. 巻 69
2. 論文標題 ALMA deep field in SSA22: Blindly detected CO emitters and [CII] emitter candidates	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Konno Akira, Ouchi Masami, ...	4. 巻 70
2. 論文標題 SILVERRUSH. IV. Ly luminosity functions at z=5.7 and 6.6 studied with ~1300 Ly emitters on the 14-21 deg <sup>2</sup> sky	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shibuya Takatoshi, Ouchi Masami, ...	4. 巻 70
2. 論文標題 SILVERRUSH. III. Deep optical and near-infrared spectroscopy for Ly and UV-nebular lines of bright Ly emitters at z=6-7	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shibuya Takatoshi, Ouchi Masami, ...	4. 巻 70
2. 論文標題 SILVERRUSH. II. First catalogs and properties of 2000 Ly emitters and blobs at z=6-7 identified over the 14-21 deg <sup>2</sup> sky	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ouchi Masami、...	4. 巻 70
2. 論文標題 Systematic Identification of LAEs for Visible Exploration and Reionization Research Using Subaru HSC (SILVERRUSH). I. Program strategy and clustering properties of 2000 Ly $\alpha$ emitters at z=6-7 over the 0.3-0.5 Gpc $^2$ survey area	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx074	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計32件(うち招待講演 21件/うち国際学会 15件)

1. 発表者名 T. Akahori
2. 発表標題 Unresolved Problems in Cosmic Magnetism
3. 学会等名 Science at Low Frequency V at Nagoya (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Akahori
2. 発表標題 Probing the Galactic and intergalactic magnetic field structures from rotation measures of extragalactic radio sources
3. 学会等名 Polarimetry in the ALMA era: a new crossroads of astrophysics at Mitaka (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ichiki
2. 発表標題 Current status and future prospects of CMB and 21cm cosmology
3. 学会等名 Second international workshop Particles, Gravitation and the Universe (PGU 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Ouchi
2. 発表標題 Galaxy Formation and Cosmic Reionization over the History of the Universe
3. 学会等名 JSPS-FAPESP Workshop on Dark Energy, Dark Matter and Galaxies at Brasil (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Ouchi
2. 発表標題 Early Results of the HSC Narrowband Survey for Emission-Line Galaxies
3. 学会等名 Understanding Emission Line Galaxies for the next generation of cosmological surveys at Spain (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Ouchi
2. 発表標題 HSC Survey for High-z Galaxies: Interplay between Galaxies and IGM
3. 学会等名 IGM2018 Workshop at Mitaka (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Ouchi
2. 発表標題 Reionization: Its Sources and Imprints
3. 学会等名 EWASS 2018 - European Astronomical Society at England (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keitaro Takahashi
2. 発表標題 Pulsar studies in SKA Japan
3. 学会等名 Asia SKA Initiative On NS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Takahashi
2. 発表標題 Toward the Detection of Cosmological HI 21cm line Emission
3. 学会等名 「加速宇宙」シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Takahashi
2. 発表標題 Pulsar Timing Array
3. 学会等名 RESCEU workshop on Space Gravitational Wave Detection (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤堀卓也
2. 発表標題 SKAで探る背景クエーサー偏波の吸収線系による解消と宇宙磁場研究
3. 学会等名 Cosmic Shadow 2018 ~クエーサー吸収線系でみる宇宙 石垣島 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 次世代低周波電波望遠鏡Square Kilometre Array
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝搬研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 SKAとVLBIによるパルサー研究の未来
3. 学会等名 VLBI懇談会シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 機械学習によるパルサーサーチ
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 21cm線で探る宇宙初期の構造形成と宇宙再電離
3. 学会等名 初代星初代銀河研究会2018 茨城大学(茨城)(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 宇宙の夜明けから再電離が起こるまで：これまでの理解と残された課題
3. 学会等名 第31回理論懇シンポジウム「宇宙物理の標準理論：未来へ向けての再考」京都大学(京都)（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 2020年代の電波観測で期待される宇宙初期サイエンスの進展
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2018「電波天文学の将来サイエンス」国立天文台三鷹キャンパス(東京)（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内努
2. 発表標題 Construction of Multidimensional Luminosity/Mass Function of Galaxies with Vine Copula
3. 学会等名 2018年度日本天文学会秋季年会 兵庫県立大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉山直
2. 発表標題 低周波電波観測が切り開く宇宙物理学
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 市来浄與
2. 発表標題 Hydrogen 21cm line and Dark Matter
3. 学会等名 The first KMI school "Dark Matter" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市来浄與
2. 発表標題 SKAJPサイエンスグループのサイエンスと要望
3. 学会等名 第2回 SKA技術開発ワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 Development of a novel simulation code for exploring cosmic reionization
3. 学会等名 MWA project meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 Development of a novel simulation code for exploring cosmic reionization
3. 学会等名 Science At Low Frequency IV (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 H/He再電離過程の放射源スペクトル依存性について
3. 学会等名 CHORUS+Galaxy+IGM研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川賢二
2. 発表標題 宇宙再電離の光子源種別と水素・ヘリウムの電離分布の関係について
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田代寛之
2. 発表標題 21cm線と宇宙論
3. 学会等名 観測的宇宙論ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内努
2. 発表標題 Dust Grain Growth Explains Huge Dust Mass in Galaxies at $z = 7$ to $8$ ?
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内努
2. 発表標題 The Observed Huge Amount of Dust at High Redshift Is Explained by the Grain Growth
3. 学会等名 第4回銀河進化研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内努
2. 発表標題 Galaxy Evolution
3. 学会等名 3rd Cosmology School: Introduction to Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 Scientific activities in the Japanese consortium
3. 学会等名 MWA Project Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 中性水素21cm線で探る初代天体と宇宙再電離
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 次世代電波望遠鏡SKAによるパルサー研究の将来
3. 学会等名 中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	市来 淨與 (Ichiki Kiyotomo) (10534480)	名古屋大学・理学研究科・准教授  (13901)	
研究分担者	田代 寛之 (Tashiro Hiroyuki) (40437190)	名古屋大学・理学研究科・特任准教授  (13901)	
研究分担者	大内 正己 (Ouchi Masami) (40595716)	東京大学・宇宙線研究所・教授  (12601)	
研究分担者	赤堀 卓也 (Akahori Takuya) (70455913)	国立天文台・水沢V L B I観測所・特任研究員  (62616)	
研究分担者	高橋 慶太郎 (Takahashi Keitaro) (80547547)	熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・准教授  (17401)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	竹内 努  (Takeuchi Tsutomu)  (90436072)	名古屋大学・理学研究科・准教授    (13901)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Science at Low Frequencies (SALF) V	開催年 2018年～2018年
---	--------------------

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関