

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 23 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24340048

研究課題名(和文) 電波による中性水素探査を用いた銀河および宇宙大規模構造の起源と進化の解明

研究課題名(英文) Study on the evolution of galaxies and the large scale structure through HI 21cm line observations

研究代表者

市来 淨與 (Ichiki, Kiyotomo)

名古屋大学・基礎理論研究センター・講師

研究者番号：10534480

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙誕生38万年後、宇宙が晴れ上がり中性化してから最初の星が誕生し宇宙が再び電離するまでの期間については観測的な事実が乏しくよく分かっていない暗黒時代である。その時代には、星は少ないが大量の中性水素が存在することに着目し、宇宙全体に広がった中性水素の分布や、銀河の種となるミニハローと呼ばれる天体中の中性水素を輝線および吸収線で観測することによって、宇宙論パラメタおよび再電離の物理についての情報がどのように引き出せるかについて明らかにしました。

研究成果の概要(英文)：The epoch after recombination and reionization of the universe by UV lights emitted from the first class of stars and galaxies is called the dark age, because still there are few observational information on that epoch. Here we focus on 21cm line of neutral hydrogen atoms because they should be abundant at that epoch. Through the distribution of neutral hydrogen gas and the number of mini-halos that hosted first stars and galaxies by using 21cm emission and absorption lines, we investigate how we can extract information on cosmological parameters and physical conditions of reionization of the universe.

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

本研究の学術的な特色は、将来の電波天文学の世界的大規模プロジェクトである SKA のキーサイエンス「銀河進化と宇宙論」に注目したところである。世界が注目するこのテーマの中で成果を挙げるため、日本 SKA コンソーシアムの下結成された、「銀河進化と高赤方偏移宇宙」サブワーキンググループのコアメンバーが、分野横断的な研究体制を構築し、将来の観測データとの比較に耐える理論モデル構築を目指すことからスタートした。

ここでは特に(1)クウエーサーの連続光を電波で観測し、中性水素の吸収線を 21 cm で観測するという新しい手法により、無バイアスに星間ガスが豊富な「原始的な銀河」およびミニハローを観測することに着目した。国際的にもセンチ波・メートル波における中長期的な大型電波望遠鏡計画が多数あり、21cm 吸収線はそれらの主要なターゲットの 1 つとなっている。また、(2)広がった電波天体とみなせる宇宙背景輻射(CMB)を背景光として中性水素を観測する場合には、その 21 cm 線は広がった銀河間水素ガスの物理的な状態に応じて輝線や吸収線として観測されるため、現在観測的な情報の乏しい宇宙再電離期の究極的な観測手法として注目されはじめていた。

2. 研究の目的

このような電波探査の利点を最大限に生かす為に、現在急務なのが理論モデルの整備である。大規模サーベイの理論予測の為に、宇宙スケールでの宇宙年齢にわたる理論モデルが必要になる。特に、観測される 21cm 吸収線は星間ガスの豊富な銀河をサンプルするため、理論サイドからは宇宙の構造形成の骨格を決めるダークマターだけでなく、ガス成分も含めた計算が必要になる。この為に、まず宇宙論構造形成をダークマターとバリオン成分の両成分を解いて、電波域でのクウエーサーの個数・明るさの進化史とその視線方向にあるガス雲の両方を統合的に解く。これによって、21cm 吸収線の統計的サンプルから、どのような物理的情報が得られるのかを明らかにする。

本研究では、宇宙論的シミュレーションを軸とし、今後大きな発展が期待できる長波長電波観測に着目し(1)クウエーサーを背景光として用いることで宇宙の構造の種となる小スケールの密度揺らぎの統計的性質と 21cm 吸収線系の強度と分布との関係を明らかにする。また、(2)CMB を背景光源とした中性水素 21 cm の観測、特にその空間的分布の統計的性質と時間進化に再電離期の天体の情報がどのように刻まれるのかについて明らかにすることを目的とする。(2)の研究

は(1)の研究を進めていく途中で着想し、研究に至ったものである。

3. 研究の方法

(1)初期宇宙においては非線形段階にまで重力的に収縮したものの、冷却が十分でないために圧力と釣り合ったままそれ以上収縮することなく存在するミニハローと呼ばれる天体が存在したと考えられている。そのミニハローがクウエーサーなどの明るい電波源の電波スペクトルに刻む吸収線の数を宇宙初期密度揺らぎの性質を変えながら計算する。そしてその数を数えることにより、密度揺らぎの性質に迫る。

(2)CMB を背景光とする場合は、放射温度がクウエーサーの場合のように高くないため、中性水素ガスのスピン温度によって、輝線となる場合や、吸収線となる場合もある。したがって、ガスの密度だけでなく、そのスピン温度、電離度などを知る必要がある。スピン温度や電離度は初代天体から放たれる紫外線や X 線、ライマンアルファ線の強度に依存するため、その空間分布は非ガウス分布を示すことが予想される。ここでは、歪み度やバイスペクトルなどの高次の統計量を多数の数値シミュレーションを用いて計算し、天体をホストすることが可能なダークマターハローの最小質量、電離効率や電離光子の平均自由行程などの再電離期のパラメータにどのように依存するかを調べる。

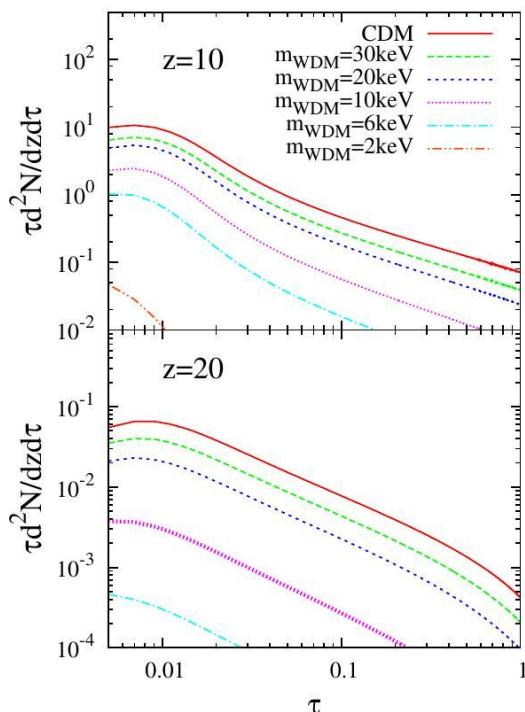
4. 研究成果

(1)「クウエーサーなどの電波源を背景光源とした、21cm 吸収線系についての研究」

我々はまず、このミニハローの数をその質量ごとに、与えられた宇宙モデルの下で計算した。さらにミニハローに期待される密度分布および温度分布を用いることで、ミニハローが刻む吸収線数分布を光学的厚みの関数として解析的に計算するモデルを構築した。そして、様々に異なる宇宙モデルの下で、吸収線の数の期待値がどのように変化するかについて明らかにした。具体的には、ニュートリノ質量、ダークマターの質量、初期密度揺らぎのパワースペクトルに対する依存性である。その結果、吸収線の数の期待値は特にダークマターの質量に大きく依存することが分かった(図1)。この結果は主に論文としてまとめ、出版済みである。

また、高赤方偏移に存在するガンマ線バーストの残光のスペクトルに刻まれる 21cm 吸収線系の検出可能性について検討を行った。これは当初の研究計画にあるように、再電離期の数値シミュレーションと、高赤方偏移に存在するガンマ線バーストの電波領域の残光のフラックス強度の見積もりを組み合わせ

せ、既存の長波長電波検出器(LOFAR)の能力を考慮することにより行った。これにより、i)赤方偏移 $z=7$ で Pop III 起源の巨大ガンマ線バーストを想定すればぎりぎり検出可能であること ii)SKA1-low で想定されているノイズレベルまでノイズを減らすことができれば検出が容易になること、が明らかに出来た。一方で、標準的なガンマ線バーストでは光度が小さすぎるため、SKA1-low から感度を 10 倍高めたとしても、検出は難しいことがわかった。(MNRAS453, 2015,)



(図1: 暗黒物質の質量を変えたときに期待される、ミニハロー内の中性水素による 21 cm吸収線の数の変化の期待値。横軸が吸収線の光学的深さ、縦軸が個数。論文 より)

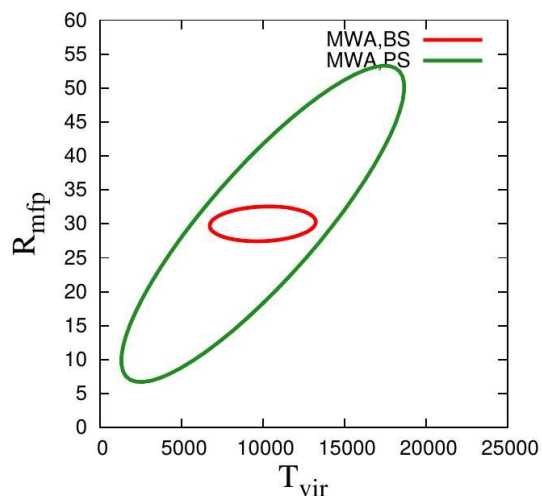
(2) 中性水素 21 cm線高次相関を用いた再電離期の研究

宇宙の再電離の様子は統計的には非ガウスのため、高次相関の統計量に大きな情報が含まれていることが予想される。我々は多数のシミュレーションを用いて温度揺らぎ分布の歪み度を用いることにより、X線による初期の銀河間ガスの過熱、特に過熱開始時期についての情報が得られることを示した(MNRAS451, 467, 2015)。

次に波数空間のバイスペクトルを用いることにより、非ガウス性のスケール依存性まで考慮できるように解析を進めた(MNRAS458, 3003, 2016)。この研究から、赤方偏移 $z=20$ でのバイスペクトルは物質の密度揺らぎ起源である一方で、他の赤方偏移ではスピン温度および中性率揺らぎ起源であることが明らかにできた。上述の研究結果をも

とに、既存の望遠鏡および将来の望遠鏡を用いてバイスペクトルの感度曲線の計算を行い、既存の MWA では検出は難しいものの、LOFARやSKA1-lowでは十分検出可能であることを明らかにした(MNRAS451, 2015)。

この成果を受けて私達はさらにバイスペクトルを観測量として用いることにより宇宙再電離を特徴づけるパラメータ、具体的には天体を保持する最低ピリアル質量、電離光子発生率、および電離光子の平均自由行程が、既存する長波長電波望遠鏡である MWA, LOFAR の熱雑音の元でどの程度制限できるかについての研究を行った。結果として、パワースペクトルとは異なるパラメータ依存性を示すおかげでモデルパラメータの縮退の一部が解けて、1/3 からひと桁以上制限が改善されることを明らかにした(図2)。但し、これらの研究は強烈な前景放射の除去がうまくいくことを暗に仮定しており、前景放射の影響を考慮した解析は今後の課題として残っている。(MNRAS458, 2016,)



(図2: 再電離期のパラメータに対する制限。横軸が最小天体質量(単位は太陽質量)、縦軸が電離光子の自由行程(Mpc)。緑色の範囲がパワースペクトルから制限が期待できる範囲で、赤色はバイスペクトルの情報を加えたときの範囲を表す。高次相関の情報により制限がより厳しくなっていることがわかる。論文 より)

また、これらの研究がきっかけで、SKA のサイエンスチームの一員として迎えられ、SKA Science Book の著者として、研究分担者井上が ” 21cm forest with the SKA ” の章の執筆に、代表者市来が ” Cosmology from EoR/Cosmic Dawn with the SKA ” へ、加わることになったのも大きな成果の一つである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計 17 件)

Daisuke Yamauchi, Shuichiro Yokoyama, and Keitaro Takahashi, Multitracer technique for galaxy bispectrum - An application to constraints on non-local primordial non-Gaussianities -, Physical Review D, 査読有, 95, 2017, 10.1103/PhysRevD.95.063530

Hayato Shimabukuro, Shintaro Yoshiura, Keitaro Takahashi, Shuichiro Yokoyama, Kiyotomo Ichiki, Constraining the EoR model parameters with the 21cm bispectrum, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 468, 2017, p1542-1550, 10.1093/mnras/stx530

Shintaro Yoshiura, Hayato Shimabukuro, Keitaro Takahashi, Takahiko Matsubara, Studying topological structure of 21-cm line fluctuations with 3D Minkowski functionals before reionization, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 465, 2017, p395-402, 10.1093/mnras/stw2701

Kenji Kubota, Shintaro Yoshiura, Hayato Shimabukuro and Keitaro Takahashi, Expected constraints on models of the epoch of reionization with the variance and skewness in redshifted 21cm-line fluctuations, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 68, 2016, 10.1093/pasj/psw059

Hayato Shimabukuro, Shintaro Yoshiura, Keitaro Takahashi, Shuichiro Yokoyama and Kiyotomo Ichiki, 21cm-line bispectrum as method to probe Cosmic Dawn and Epoch of Reionization, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 458, 2016, p3003-3011, 10.1093/mnras/stw482

Yamauchi, Daisuke; Ichiki, Kiyotomo; Kohri, Kazunori; Namikawa, Toshiya; Oyama, Yoshihiko; Sekiguchi, Toyokazu; Shimabukuro, Hayato; Takahashi, Keitaro; Takahashi, Tomo; Yokoyama, Shuichiro; Yoshikawa, Kohji, Cosmology with the Square Kilometre Array by SKA-Japan, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 68, 2016, 10.1093/pasj/psw098

Shimabukuro, Hayato; Yoshiura, Shintaro; Takahashi, Keitaro; Yokoyama, Shuichiro; Ichiki, Kiyotomo, Studying 21cm power spectrum with

one-point statistics, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 451, 2015, p467-474, 10.1093/mnras/stv965

Asaba, Shinsuke; Ichiki, Kiyotomo; Tashiro, Hiroyuki, Effect of supersonic relative motion between baryons and dark matter on collapsed objects, Physical Review D, 査読有, 93, 2015, id.023518, 10.1103/PhysRevD.93.023518

Ciardi, B.; Inoue, S.; Abdalla, F. B.; Asad, K.; Bernardi, G.; Bolton, J. S.; Brentjens, M.; de Bruyn, A. G.; Chapman, E.; Daiboo, S.; and 19 coauthors, Simulating the 21 cm forest detectable with LOFAR and SKA in the spectra of high-z GRBs, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 453, 2015, p101-105, 10.1093/mnras/stv1640

Ciardi, B.; Inoue, S.; Mack, K.; Xu, Y.; Bernardi, G., 21-cm forest with the SKA, Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14), 査読有, 1, 2015, id.6

Koopmans, L.; Pritchard, J.; Mellema, G.; Aguirre, J.; Ahn, K.; Barkana, R.; van Bemmel, I.; Bernardi, G.; Bonaldi, A.; Briggs, F.; Ichiki, K.; Inoue, S.; and 34 coauthors, The Cosmic Dawn and Epoch of Reionisation with SKA, Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14), 査読有, 1, 2015, id.1

Pritchard, J.; Ichiki, K.; Mesinger, A.; Metcalf, R. B.; Pourtsidou, A.; Santos, M.; Abdalla, F. B.; Chang, T. C.; Chen, X.; Weller, J.; Zaroubi, S., Cosmology from EoR/Cosmic Dawn with the SKA, Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14), 査読有, 1, 2015, id.12

Yoshiura, Shintaro; Shimabukuro, Hayato; Takahashi, Keitaro; Momose, Rieko; Nakanishi, Hiroyuki; Imai, Hiroshi, Sensitivity for 21 cm bispectrum from Epoch of Reionization, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 451, 2015, p266-274, 10.1093/mnras/stv855

Shimabukuro, Hayato; Ichiki, Kiyotomo; Inoue, Susumu; Yokoyama, Shuichiro, Probing small-scale cosmological fluctuations with the 21 cm forest: Effects of neutrino mass, running spectral index, and warm dark matter, Physical

Review D, 査読有, 90, 2014, id.83003, 10.1103/PhysRevD.90.083003

Kadota, Kenji; Mao, Yi; Ichiki, Kiyotomo; Silk, Joseph, Cosmologically probing ultra-light particle dark matter using 21 cm signals, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, 6, 2014, 11, 10.1088/1475-7516/2014/06/011

Shiraishi, Maresuke; Tashiro, Hiroyuki; Ichiki, Kiyotomo, 21 cm fluctuations from primordial magnetic fields, Physical Review D, 査読有, 89, 2014, id.103522, 10.1103/PhysRevD.89.103522

Daisuke Yamauchi, Keitaro Takahashi, Masamune Oguri, Constraining primordial non-Gaussianity via a multitracer technique with surveys by Euclid and the Square Kilometre Array, Physical Review D, 査読有, 90, 2014, id.83520, 10.1103/PhysRevD.90.083520

[学会発表](計 29 件)

Susumu Inoue, Fast Radio Bursts as Cosmological Probes: Small-Scale Power Spectrum and Cosmic Reionization, Fast Radio Bursts: New Probes of Fundamental Physics and Cosmology (国際学会), 2017年02月12日~2017年02月17日, Aspen, USA

Susumu Inoue, Status of the FRB Program, MAGIC Collaboration Meeting (国際学会), 2016年11月21日~2016年11月25日, Dortmund, Germany

Susumu Inoue, Kiyotomo Ichiki, Hayato Shimabukuro, Probing Small-Scale Density Fluctuations of Baryons and Dark Matter with Fast Radio Bursts, Signals from the Deep Past (国際学会), 2016年07月18日~2016年07月22日, Valletta, Malta

Susumu Inoue, AGN Winds and NGC 1068, MAGIC Collaboration Meeting (招待講演) (国際学会), 2016年06月13日~2016年06月17日, Zurich, Switzerland

Susumu Inoue, Fast Radio Bursts and VHE Prospects, MAGIC Collaboration Meeting (招待講演) (国際学会), 2016年06月13日~2016年06月17日, Zurich, Switzerland

高橋慶太郎, Pulsars and gravitational waves measured with the SKA, Australia-Japan School on Low Frequency Astrometry in the SKA Era (招待講演), 2016年03月31日, 鹿児島大学

井上進, 高速電波バーストで探るバリオンおよび暗黒物質の小スケール密度揺らぎ, 日本物理学会春季年会, 2016年03月21日, 東北学院大学

井上進, 高速電波バーストで探るバリオンおよび暗黒物質の小スケール密度揺らぎ, 日本天文学会春季年会, 2016年03月16日, 首都大学東京

井上進, Probing the Universe with Distant Radio Sources, Physics of Cosmic Dawn and Reionization in the SKA Era (招待講演) (国際学会), 2016年01月27日, イタリア・セスト

井上進, 高速電波バーストで探る暗黒物質および銀河形成, 第28回理論懇シンポジウム, 2015年12月23日, 大阪大学

市来淨與, 長波長電波による宇宙論, 初代星・初代銀河研究会2015 (招待講演), 2015年11月30日~2015年12月02日, 草津セミナーハウス

井上進, 高速電波バーストと小スケール揺らぎ, 第4回観測的宇宙論ワークショップ, 2015年11月18日, 京都大学基礎物理学研究所

井上進, 活動銀河核の ultra-fast outflow における宇宙線加速と電波・ガンマ線放射, 日本物理学会秋季年会, 2015年09月27日, 大阪市立大学

高橋慶太郎, Square Kilometre Array: 現状と展望, VERA ユーザーズミーティング (招待講演), 2015年09月25日, 岩手県奥州市水沢観測所

井上進, CTA transient factory: divergent pointing による広視野突発天体サーベイの展望, 日本天文学会秋季年会, 2015年09月12日, 甲南大学

井上進, Potential synergy between SKA and CTA for Transient Observations, SKA パルサー・突発天体・EWG 合同研究会, 2015年09月12日, 神戸市教育会館

高橋慶太郎, SKA-Japan パルサーグループ活動報告, 日本天文学会秋季年会, 2015年09月11日, 甲南大学

高橋慶太郎, EoR21cm 線観測の現状と MWA について, SKA-Japan 遠方宇宙研究会 (招待講演), 2015年09月08日, 神戸市教育会館

井上進, 21cm Forest: Challenges and

Prospects, 銀河進化と遠方宇宙 (III),
2015年09月07日, 神戸市教育会館

高橋慶太郎, Cosmology with Square
Kilometre Array and synergies with CMB,
Fourteenth Marcel Grossmann Meeting (招
待講演)(国際学会), 2015年07月17日, イ
タリア・ローマ

②高橋慶太郎, Probing EoR and Cosmic
Dawn with SKA, 銀河・銀河間物質に関する観
測・理論合同ミニワークショップ(招待講演),
2015年06月10日, 筑波大学

②高橋慶太郎, "SKA and cosmology", The 3rd
workshop on Large Aperture mm/submm
Telescopes in the ALMA era(招待講演), 2015
年03月10日~2015年03月11日, 国立天文
台三鷹

③市来浄与, SKA で探る宇宙の夜明けと再電
離, SKA-Japan ワークショップ 2015 (招待講
演), 2015年03月03日~2015年03月05
日, 国立天文台三鷹

④高橋慶太郎, 「Square Kilometre Array の
概要」, 宇宙電波懇談会シンポジウム(招待
講演), 2015年01月27日, 国立天文台三鷹

⑤高橋慶太郎, 「SKAによる宇宙論」, 第
3回観測的宇宙論ワークショップ(招待講
演), 2014年11月26日~2014年11月28
日, 名古屋大学

⑥島袋隼士, 吉浦伸太郎, 高橋慶太郎, 横
山修一郎, 市来浄与, Studying 21cm power
spectrum with one-point statistics, 天文
学会, 2015年03月18日~2015年03月21
日, 大阪大学

⑦吉浦伸太郎, 島袋隼士, 高橋慶太郎, 市来
浄与, 21cm線のバイスペクトルで探る再電離
期の情報, 物理学会, 2014年09月18日~
2014年09月21日, 佐賀大学

⑧吉浦伸太郎, 島袋隼士, 高橋慶太郎, 市来
浄与, 再電離期 21cm線 bispectrum の観測に
ついて, 天文学会, 2014年09月11日~2014
年09月13日, 山形大学

⑨島袋隼士, 吉浦伸太郎, 市来浄与, 高橋慶
太郎, 21cm線輝度温度場のバイスペクトルの
評価, 天文学会, 2014年09月11日~2014
年09月13日, 山形大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

アウトリーチ活動

2016年度 NHK 文化センター宇宙講座
『宇宙の晴れ上がりと宇宙の夜明け』 市来
浄与 <https://www.nhk-cul.co.jp/>

2015年度 NHK 文化センター宇宙講座
『宇宙の晴れ上がりと宇宙の夜明け』 市来
浄与 <https://www.nhk-cul.co.jp/>

2014年金沢大学夏の学校招待講師
『B-mode 偏光による宇宙論』 市来浄与

2014年度 NHK 文化センター宇宙講座
『宇宙誕生38万年後の宇宙地図を読み解
く』 市来浄与 <https://www.nhk-cul.co.jp/>

2013年度 NHK 文化センター宇宙講座
『観測的宇宙論最前線』 市来浄与
<https://www.nhk-cul.co.jp/>
など

6. 研究組織

(1)研究代表者

市来浄与 (ICHIKI Kiyotomo)

名古屋大学・基礎理論研究センター・講師
研究者番号: 10534480

(2)研究分担者

高橋慶太郎 (TAKAHASHI Keitaro)

熊本大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号: 80547547

井上進 (INOUE Susumu)

国立研究開発法人理化学研究所・主任研究
員研究室等・研究員
研究者番号: 80413954

(3)連携研究者

竹内努 (TAKEUCHI Tsutomu)

名古屋大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 90436072

横山修一郎 (YOKOYAMA Shuichiro)

立教大学・理学部物理学科・助教
研究者番号: 80529024

(4)研究協力者

なし