

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21540270

研究課題名(和文)次世代ダークエネルギー探査を用いた宇宙論スケールの重力理論の検証

研究課題名(英文)Testing gravity theory on the cosmological scales using the next generation dark energy surveys

研究代表者

山本 一博(Yamamoto, Kazuhiro)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50284154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、宇宙の加速膨張の説明に動機を持った重力理論の拡張モデルがその有効な解決法になるかどうかを明らかにするための研究を行った。主に三つの側面から研究を進め、次のような成果を得た。(1) SDSS銀河データの多重極パワースペクトル解析から宇宙論的スケールの重力検証法を確立した。(2)  $f(R)$ モデル、ガリレオンモデルなどの修正重力理論の宇宙論的振る舞いを明らかにしてモデルに対する強い制限を得た。(3) 銀河団スケールにおいては、外縁部で修正重力理論の特徴が現れる可能性を示して、銀河団の重力レンズ、X線、スニヤエフ-ゼルドビッチ効果の観測の組み合わせにより強い制限が得られることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We studied the problem of whether the modified gravity models, which are proposed to explain the cosmic accelerated expansion, can be really viable solutions or not. To this end, we studied the aspects from the view points of the cosmological consistency, and obtained the following results. (1) We established the method of testing the gravity theory on the cosmological scales using the multipole power spectrum in the galaxy distribution, and demonstrated the usefulness of the method with the SDSS galaxy samples. (2) We clarified the characteristic behaviors and properties of the cosmological models of an  $f(R)$  model, the galileon models and its extended versions. We obtained the useful constraints on each model. (3) We found the possibility that a characteristic feature of modified gravity models may appear in the outskirts of galaxy clusters, and developed a new method for testing gravity by combining X-ray, lensing, and Sunyaev-Zeldovich effect observations of a cluster.

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：修正重力 大規模構造 重力レンズ 銀河団 ダークエネルギー パワースペクトル解析 銀河サーベイ 観測的宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙の加速膨張は、物理学および天文学分野における大きな謎として、その起源の解明に向けた銀河探査プロジェクトが進行している。また将来の大規模プロジェクトも議論されており、日本のすばる望遠鏡を使った計画も進められている。

(2) 一方で、宇宙の加速膨張に動機を持った理論的研究が進んでおり、ダークエネルギー模型を超えて、重力理論の見直しと新しい重力模型の可能性を探求する試みが活発になされている。このような重力理論を応用した宇宙模型の特徴を明らかにすることが新しい研究課題となっている。

## 2. 研究の目的

大規模銀河サーベイの進展を利用して、宇宙論スケールの重力理論の検証を行う。そのために必要な理論的、観測的両面からの研究を進める。観測で得られる銀河データのパワースペクトル解析技術を構築し、拡張された重力模型の宇宙論的振る舞い理論的に調べて観測と比較する。宇宙の加速膨張の説明において重力理論の拡張が有効な解決法になるかどうか明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) で得られる銀河の三次元分布データを利用する。LRG サンプルの多重極パワースペクトル解析を行い、バリオン音響振動および赤方偏移空間歪みの定量化によって、重力理論の検証に応用する。

(2) 拡張された重力理論に基づいた宇宙論模型の密度揺らぎの進化、ダークマターハローの形成と構造、宇宙背景放射の温度揺らぎ等に関する理論予想を調べて、上記の銀河分布の多重極パワースペクトル等、観測からえられる情報と比較し、観測的整合性までを明らかにする。

(3) 宇宙論的重力レンズ観測から得られる情報を重力検証に応用し、モデルに制限を与える。

## 4. 研究成果

初めに成果の概要を(1)-(3)に述べる。

(1) SDSS 銀河データを用いたパワースペクトル解析を進めた。SDSS の最終的データである DR7 に加え、SDSS BOSS サーベイで中間報告された DR10 の解析までを行った。多重極スペクトルの測定を修正重力模型との比較に応用し、宇宙論的スケールの重力検証法を確立した。また、多重極パワースペクトルの小スケールの振る舞いの起源を明らかにし、小スケールと線形領域への重要なインパクトがあることを示した。

(2) 宇宙の加速膨張を説明する修正重力理論として  $f(R)$  模型、ガリレオン模型とその一般化された重力理論の宇宙論的振る舞いを詳細に調べた。宇宙背景放射の温度揺らぎと

銀河分布との相互相関関数や、重力チェレンコフ放射といった過程も修正重力理論の制限に重要であることを示した。これらは、太陽系スケールから宇宙論スケールまで整合性のある修正重力理論を構築することが大変難しいことを示している。

(3) 銀河団スケールにおける修正重力理論の影響に着目し、重力レンズ効果による質量プロファイルの観測と比較することによって重力の検証ができることを示した。また、銀河団の X 線観測、スニヤエフ-ゼルドビッチ効果の観測と重力レンズによる観測と組み合わせることによって銀河団ガス模型の検証を行い、さらに重力理論の検証まで可能であることを実証した。これらは今後の観測を利用して応用が可能な方法である。

成果の詳細を以下に述べる。

(1a) DR7 の解析では、LRG サンプルのパワースペクトルからバリオン音響振動を取り出し、その減衰から得られる宇宙論的制限を明らかにした。非線形効果によるバリオン音響振動の減衰が質量密度揺らぎの振幅によって決まっていることを示し、実際のデータから制限を得た。重力理論の制限に有用である可能性を指摘した。

(1b) 銀河分布の多重極パワースペクトル解析においてウィンドウ効果について新しい解決法を開発した。これまでのパワースペクトル解析では、銀河サーベイの領域の大きさに依存したウィンドウ効果が畳み込まれ、理論との精密な比較の際には注意が必要となる。特に高速フーリエ変換 (FFT) を用いて多重極パワースペクトルを測定する場合には、この影響は大きくなる。この問題に対して、共同研究者とともにフーリエ変換の逆畳み込み法を用いてウィンドウ効果を除去した多重極スペクトルの測定に初めて成功した。この成果は、以下の研究でも用いた。

(1c) SDSS LRG サンプルの多重極パワースペクトルの小スケールの振る舞いがハローアプローチに基づいた理論模型によって説明できることを初めて見いだした。高次多重極パワースペクトルは、one-halo 項がその振る舞いを決定していることを発見し、これがサテライト銀河の分布と非線形領域の新しい情報を与えることを示した。さらに、コヒーレントな速度場の測定の不定性を大きく解消する有益な情報となることも分かった。また、この発見をもとに、多重極パワースペクトルを用いたハロースケールでの重力の検証法について指摘した。SDSS BOSS, CMASS, LOWZ サンプルの測定と理論との比較も試験的に行った。

(2a)  $f(R)$  拡張重力模型における宇宙論的密度揺らぎの進化を数値的および解析的に調べ、上記 SDSS LRG サンプルの多重極パワースペクトルとの比較から  $f(R)$  模型の理論パラメーターに制限を与えた。さらに、N 体シミュレーションによる系統誤差の評価まで含め、制限の厳密化を行い、MCMC 解析を用い

た制限を与えた。

(2b) ガリレオン模型を拡張し、あるパラメーターで宇宙膨張が宇宙項模型と一致する模型を提案した。さらにこの模型の密度揺らぎ進化の振る舞いを明らかにして上記の SDSS LRG サンプルの多重極スペクトル等との比較から理論模型に課される制限を明らかにした。

(2c) さらにこのガリレオン模型では、宇宙背景放射の温度揺らぎと銀河分布の相互相関関数が積分ザックス-ヴォルフ効果によって最も強い制限を与えることを実証した。この理由は修正重力が密度揺らぎに対して引力として影響することに起因するもので、多くの修正重力理論に対し、一般に強い制限を与えることを示した。

(2d) ガリレオン重力模型の特徴として知られているヴァインシュタイン機構が、一般化された模型でも作用するかどうかを明らかにした。運動方程式が2階の微分方程式となるよう最大限一般化されたスカラーテンソル理論においては、ヴァインシュタイン機構は働くが、必ずしもニュートン重力が回復するとは限らないことを示した。ニュートン重力が回復する場合としない場合とを分類した。

(2f) 上記最も一般的なスカラーテンソル理論を応用した宇宙模型において、ヴァインシュタイン機構を持つ場合の密度揺らぎの標準摂動理論を構築した。極めて一般的な理論でありながら、バースペクトルの表式は非線形を表すパラメーター1つによって記述されることを明らかにした。また3次までの高次摂動解を求め、非線形パワースペクトルの表式を得た。ヴァインシュタイン機構が働く可能性のある模型に限ると、非線形の高次では修正重力による多様性がほとんどなく、同じような振る舞いを示すことが分かった。成果は論文として投稿予定である。

(2e) 一般化されたスカラーテンソル理論では、重力波の音速が光速より遅くなる場合があることに着目し、このような模型での重力チェレンコフ放射過程と帰結について議論した。重力チェレンコフ放射過程が起こると超高エネルギー宇宙線の観測と矛盾することから、一般化されたスカラーテンソル理論の中でも、拡張ガリレオン理論はスカラー場の運動項と曲率が相互作用する模型は強く制限されることを示した。

(3a) 太陽系スケールの制限を回避できるよう、密度の高い領域ではニュートン重力が回復する修正する機構をガリレオン模型や  $f(R)$  模型は備えている。修正重力理論において球対称ハローの密度プロファイル模型の構築を行い、ハローの外縁部ではその回復が十分ではない可能性を指摘した。この発見をもとに、一般化されたガリレオン模型固有の特徴が銀河団ハローの外縁部で見られることを示し、重力レンズを用いた観測から制限する方法を新たに開発した。

(3b) 修正重力模型を銀河団に応用した場合、外縁部でガス分布に影響のあることを示した。これは、外縁部でのニュートン重力の回復が十分でなく、第五の力が影響するためであった。この効果が銀河団外縁部での X 線観測に影響することを示し、うみへび座銀河団の X 線観測と比較して、修正重力模型の新しい検証法を提案した。

(3c) 上記の方法論において銀河団ガスが静水圧平衡をなしているかどうかは、自明な問題ではなく、宇宙物理学的観点からも問題となっている。そこで、X 線観測だけではなく、スニヤエフ-ゼルドビッチ効果、重力レンズ効果の観測を同時に組み合わせ、静水圧平衡の検証と修正重力模型の検証とを合わせて行った。必要な多波長観測が行われている近傍の髪座銀河団に着目し、解析を行ったところ、質量プロファイルが数 10% 程度の範囲で静水圧平衡が成り立っていることが示された。この検証をもとに行った  $f(R)$  模型の制限では、宇宙論的制限としてはこれまでのところ最も強い制限が得られた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 22 件) 全て査読あり。

1. L. Heisenger, R. Kimura, K. Yamamoto, Cosmology of the proxy theory to massive gravity, *Phys. Rev. D* **89** (2014) 103008, doi:10.1103/PhysRevD.89.103008
2. Y. Takushima, A. Terukina, K. Yamamoto, Bispectrum of cosmological density perturbations in the most general second-order scalar tensor theory, *Phys. Rev. D* **89**, (2014) 104007, doi:10.1103/PhysRevD.89.104007
3. A. Terukina, L. Lombriser, K. Yamamoto, D. Bacon, K. Koyama, R. C. Nichol, Testing chameleon gravity with the Coma cluster, *JCAP* **04** (2014) 013, doi:10.1088/1475-7516/2014/04/013
4. A. Oka, S. Saito, T. Nishimichi, A. Taruya, K. Yamamoto, Simultaneous constraints on the growth of structure and cosmic expansion from the multipole power spectrum of the SDSS DR7 LRG sample, *MNRAS*, **439** (2014) 2515, doi:10.1093/mnras/stu111
5. T. Sato, G. Huetsi, G. Nakamura, K. Yamamoto, Window effect in the power spectrum analysis of a galaxy redshift survey, *Int. J. of Astron. and Astrophys.* **3** (2013) 243 doi:10.4236/ijaa.2013.33029
6. C. Hikage, K. Yamamoto, Impacts of satellite galaxies in measuring the redshift-space distortions, *JCAP* **08**(2013) 019, doi:10.1088/1475-7516/2013/08/019
7. A. Terukina, K. Yamamoto, Gas density profile in dark matter halo in chameleon cosmology, *Phys. Rev. D* **86** (2012) 103503, doi:10.1103/PhysRevD.86.103503
8. G. Nakamura, K. Yamamoto, Quantum Larmor

radiation from moving charge in an electromagnetic plane wave background, *Int. J. of Modern Phys. A* **24** (2012) 1250142, doi:10.1142/S0217751X12501424

9.T.Narikawa, K. Yamamoto, Testing gravity with halo density profiles observed through gravitational lensing, *JCAP* **05** (2012) 016, doi:10.1088/1475-7516/2012/05/016

10.R. Kimura, T. Kobayashi, K. Yamamoto, Observational constraints on kinetic gravity braiding from the integrated Sachs-Wolfe effect. *Phys. Rev. D* **85** (2012) 123503, doi:10.1103/PhysRevD.85.123503

11.R. Kimura, K. Yamamoto, Constraints on general second-order scalar-tensor models from gravitational Cherenkov radiation, *JCAP* **07** (2012) 050, doi:10.1088/1475-7516/2012/07/050

12.R. Kimura, T. Kobayashi, K. Yamamoto, Vainshtein screening in a cosmological background in the most general second-order scalar tensor theory, *Phys. Rev. D* **85** (2012) 24023, doi:10.1103/PhysRevD.85.024023

13.T. Narikawa, R. Kimura, T. Yano, K. Yamamoto, Halo models in modified gravity theories with self-accelerated expansion, *Int. J. Mod. Phys. D* **20** (2011) 2383, doi:10.1142/S0218271811020421

14.R. Kimura, K. Yamamoto, Large scale structure in kinetic gravity braiding model that can be unbraided, *JCAP* **04** (2011) 025, doi:10.1088/1475-7516/2011/04/025

15.Y. Habara, K. Yamamoto, Analytic approach to perturbed Einstein ring with elliptical NFW lens model, *Int. J. Mod. Phys. D* **20** (2011) 371, doi:10.1142/S0218271811018834

16.R. Kimura, G. Nakamura, K. Yamamoto, Quantum Larmor radiation in conformally flat universe, *Phys. Rev. D* **83** (2011) 045015, doi:10.1103/PhysRevD.83.045015

17.K. Yamamoto, G. Nakamura, First order quantum correction to Larmor radiation from a moving charge in a spatially homogeneous time-dependent electric field, *Phys. Rev. D* **83** (2011) 045030, doi:10.1103/PhysRevD.83.045030

18.T. Sato, G. Huetsi, K. Yamamoto, Deconvolution of window effect in galaxy power spectrum analysis, *Prog. Theor. Phys.* **125** (2011) 187 doi:10.1143/PTP.125.187

19.K. Yamamoto, G. Nakamura, G. Huetsi, T. Narikawa, T. Sato, Constraint on the cosmological  $f(R)$  model from the multipole power spectrum of the SDSS luminous red galaxy sample and prospects for a future survey, *Phys. Rev. D* **81** (2011) 103517, doi:10.1103/PhysRevD.81.103517

20.T.Narikawa, K. Yamamoto, Characterizing the linear growth rate of cosmological density perturbations in an  $f(R)$  model *Phys. Rev. D* **81** (2010) 043528, doi:10.1103/PhysRevD.81.043528

21.G. Nakamura, T. Sato, G Huetsi, K. Yamamoto, Constraint on the growth factor of the cosmic structure from the damping of the baryon acoustic oscillation signature, *Phys. Rev. D* **80** (2009) 123524, doi:10.1103/PhysRevD.80.123524

22.K. Yamamoto, T. Kobayashi, G. Nakamura, Breaking the scale invariance of the primordial power spectrum in Horava-Lifshitz cosmology, *Phys. Rev. D* **80** (2009) 063514, doi:10.1103/PhysRevD.80.063514

〔学会発表〕(計 50 件)

1. 山本一博, G.Huetsi, 金丸達郎, 照喜名歩, 日影千秋, SDSSIII DR9 CMASS 銀河サンプルの多重極パワースペクトルとハローアプローチ, 日本物理学会 2014 年春季大会, 2014 年 3 月 27 日-30 日, 東海大学湘南キャンパス
2. 宅島祐一郎, 照喜名歩, 山本一博, 最も一般的なスカラーテンソル理論における宇宙論的密度揺らぎの標準摂動理論, 日本物理学会 2014 年春季大会, 2014 年 3 月 27 日-30 日, 東海大学湘南キャンパス
3. 山本一博, 日影千秋, Impact of satellite galaxies on the redshift-space distortions, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 20 日-23 日, 高知大学
4. 宅島祐一郎, 照喜名歩, 山本一博, 最も一般的なスカラーテンソル理論における宇宙論的密度揺らぎのバイスペクトル, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 23 日, 高知大学
5. 照喜名歩, L.Lombriser, 山本一博, D. Bacon, K.Koyama, R.C.Nichol, 銀河団のガス分布を用いた修正重力理論の検証, 日本天文学会 2013 年秋季年会, 2013 年 9 月 19 日-22 日, 東北大学
6. 日影千秋, 山本一博, Impacts of satellite galaxies in measuring the cosmic growth rate, 日本天文学会 2013 年秋季年会, 2013 年 9 月 19 日-22 日, 東北大学
7. 宅島祐一郎, 照喜名歩, 山本一博, 最も一般的なスカラーテンソル理論における宇宙論的密度揺らぎのバイスペクトル, 第 2 回観測的宇宙論ワークショップ, 2013 年 12 月 4 日-6 日, 国立天文台(三鷹市)
8. 照喜名歩, L.Lombriser, 山本一博, D. Bacon, K.Koyama, R.C.Nichol, 髪の毛銀河団の多波長観測を用いた chameleon 重力モデルの検証, 第 2 回観測的宇宙論ワークショップ, 2013 年 12 月 4 日-6 日, 国立天文台(三鷹市)
9. 照喜名歩, L.Lombriser, 山本一博, D. Bacon, K.Koyama, R.C.Nichol, Hydrostatic equilibrium of gas distribution in Coma cluster and a test of chameleon gravity

model, JGRG, 2013年11月5日-8日, 弘前大学

10. 山本一博, Halo approach and testing gravity with redshift-space distortions, APC-YITP collaboration mini-workshop on gravitation and cosmology, 2014年2月6日-7日, 京都大学基礎物理学研究所

11. 日影千秋, Impacts of satellite galaxies on the redshift-space distortions, The 19-th International symposium on Particle, Strings, and Cosmology, 2013年11月20日-26日, Taipei

12. 照喜名歩, L.Lombriser, 山本一博, D. Bacon, K.Koyama, R.C.Nichol, 髪の毛座銀河団の多波長観測を用いたカメレオン重力模型の検証, 第26回理論懇シンポジウム, 2013年12月27日, 東京大学柏キャンパス

13. 照喜名歩, 山本一博, 銀河団の X 線観測を用いた Chameleon 重力模型の検証 2, 日本物理学会 2013 年春季大会, 2013 年 3 月 26 日-29 日, 広島大学

14. 山本一博, On radiation from a detector in de Sitter spacetime, Nishinomiya Yukawa Symposium New waves in gravity and cosmology, 2012年12月4日-6日, 京都大学基礎物理学研究所

15. 照喜名歩, 山本一博, Gas density profile in dark matter halo in chameleon cosmology, 2012年12月4日-6日, 京都大学基礎物理学研究所

16. 山本一博, 銀河団で探る修正重力, 観測的宇宙論ワークショップ, 2012年11月27日-29日, 東京大学

17. 山本一博, Testing modified gravity models with cluster of galaxies, The 5-th KIAS cosmology workshop, 2012年10月29日-11月3日, KIAS, KOREA

18. 照喜名歩, 銀河団の X 線観測を用いた Chameleon 重力模型の検証, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 11 日-14 日, 京都産業大学

19. 山本一博, Constraints on general second order scalar tensor models on a cosmological background from gravitational Cherenkov radiation, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 11 日-14 日, 京都産業大学

20. 木村蘭平, 小林努, 山本一博, Vainshtein screening in a cosmological background in the most general second-order scalar tensor theory, COSMO 2012, 2012年9月10日-14日, Beijing, China

21. 木村蘭平, 小林努, 山本一博, Observational constraints on Galileon gravity, YITP international moderule type workshop, Nonlinear massive gravity theory and its observational test, 2012年7月23日-8月9日, 京都大学基礎物理学研究所

22. 照喜名歩, 山本一博, Chameleon 重力模型におけるハローモデル, 日本物理学 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学

23. 成川達也, 山本一博, ハローを用いた重力理論の検証, 日本物理学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学

24. 木村蘭平, 小林努, 山本一博, Vainshtein screening in a cosmological background in the most general scalar-tensor theory, 日本物理学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 25 日, 関西学院大学

25. 中村元, 山本一博, 非線形コンプトン散乱における 1 次の量子効果, 日本物理学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 25 日, 関西学院大学

26. 木村蘭平, 小林努, 山本一博, Vainshtein screening in a cosmological background in the most general scalar-tensor theory, 2012 年アジア太平洋宇宙論と重力スクール研究会, 2012 年 3 月 3 日, 京都大学基礎物理学研究所

27. 成川達也, 山本一博, Testing modified gravity with halo density profile, 2012 年アジア太平洋宇宙論と重力スクール研究会, 2012 年 3 月 3 日, 京都大学基礎物理学研究所

28. 山本一博, Accelerating expansion of the universe and testing gravity on cosmological scales, The 4<sup>th</sup> GCOE international symposium, weaving science wev beyond particle-matter hierarchy, 2012 年 2 月 21 日, 東北大学

29. 木村蘭平, 小林努, 山本一博, Vainshtein screening in a cosmological background in the most general scalar-tensor theory, KASI-YITP joint workshop, 2012 年 2 月 18 日, Sejon hall at KASI, KOREA

30. 木村蘭平, 小林努, 山本一博, ISW 効果を用いた kinetic gravity braiding モデルの制限, 第 24 回理論懇シンポジウム, 2011 年 11 月 5 日, 国立天文台(三鷹市)

31. 木村蘭平, 中村元, 山本一博, Quantum Larmor radiation in conformally flat universe, 日本物理学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 18 日, 弘前大学

32. 成川達也, 木村蘭平, 矢野竜之介, 山本一博, 修正重力模型におけるダークマターハローの構造, 日本物理学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 18 日, 弘前大学

33. 木村蘭平, 小林努, 山本一博, Observational constraints on kinetic gravity braiding model from the integrated Sachs-Wolfe effect, 日本物理学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 18 日, 弘前大学

34. 成川達也, 木村蘭平, 矢野竜之介, 山本一博, Halo properties in modified gravity theories with self-accelerated expansion, COSMO11, 2011 年 8 月 22 日, Porto, Portugal

35. 木村蘭平, 山本一博, Large scale structures in kinetic gravity braiding

model and observational implications, 第 11 回宇宙における時空・物質・構造の進化研究会, 2011 年 7 月 28 日, 三愛高原ホテル(熊本)

36. 木村蘭平, 山本一博, Evolution of cosmological perturbations in kinetic gravity braiding model, YITP workshop, cosmological perturbations and cosmic microwave background, 2011 年 3 月 22 日, 京都大学基礎物理学研究所

37. 木村蘭平, 山本一博, 宇宙論的観測からの kinetic gravity braiding モデルの制限, INSAM シンポジウム精密宇宙科学の展望, 2011 年 3 月 22 日, 広島大学

38. 成川達也, 矢野竜之介, 木村蘭平, 山本一博, Halo models in galileon gravity theory, INSAM シンポジウム精密宇宙科学の展望, 2011 年 3 月 22 日, 広島大学

39. 佐藤貴浩, G. Huetsi, 山本一博, 逆畳み込みを利用した銀河分布のパワースペクトル解析, INSAM シンポジウム精密宇宙科学の展望, 2011 年 3 月 22 日, 広島大学

40. 山本一博, 佐藤貴浩, G. Huetsi, 中村元, Multipole power spectrum analysis and test of modified gravity, The observational pursuit of dark energy after Astro2010, 2010 年 10 月 8 日, Cahill Center for Astronomy and Astrophysics, Pasadena, CA, USA

41. 木村蘭平, 山本一博, 佐藤貴浩, 中村元, G. Huetsi, 大規模構造からの Galileon 重力理論の制限, 日本物理学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 12 日, 九州工業大学

42. 成川達也, 山本一博, 中村元, G. Huetsi, 佐藤貴浩, 宇宙の大規模構造を用いた  $f(R)$  模型の制限, 日本物理学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 12 日, 九州工業大学

43. 中村元, 山本一博, G. Huetsi, 成川達也, 佐藤貴浩, SDSS LRG サンプルによる  $f(R)$  模型への制限, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 24 日, 金沢大学

44. 中村元, 山本一博, G. Huetsi, 佐藤貴浩, Constraint on the growth factor of the cosmic structure from the damping of the baryon oscillation signature, YITP symposium, Cosmology - next generation -, 2010 年 6 月 28 日, 京都大学

45. 成川達也, 山本一博, 中村元, G. Huetsi, 佐藤貴浩, Growth rate of cosmological density perturbations in a  $f(R)$  model and cosmological constraints from large survey of galaxy, YITP symposium, Cosmology - next generation -, 2010 年 6 月 28 日, 京都大学

46. 中村元, 山本一博, G. Huetsi, 佐藤貴浩, バリオン音響振動の減数を用いた質量揺らぎの振幅の制限, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 24 日, 広島大学

47. 成川達也, 山本一博,  $f(R)$  模型における密度揺らぎの進化, 日本物理学会 2010 年春

季年会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学

48. 成川達也, 山本一博, Characterizing linear growth rate in  $f(R)$  gravity, The 19-th workshop on general relativity and gravitation in Japan, 2009 年 11 月 30 日, 立教大学

49. 山本一博, Uniform approximation and primordial power spectrum, DeNET サマースクール, 2009 年 9 月 2 日, 宜野湾市

50. 山本一博, Testing gravity on the scales of cosmology, Science Opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe, 2009 年 11 月 10 日, Princeton University, USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 一博 (YAMAMOTO KAZUHIRO)

広島大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 50284154