



記載の記事は宇宙線研究所ホームページ (<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/cat-icrr/>) からでも御覧になれます。

CONTENTS

宇宙線研究所外部評価委員会開催の報告	手嶋 政廣	1
ハッブル宇宙望遠鏡による深宇宙探査の進展 I	小野 宜昭・大内 正己	4
人事異動		8
ICRR-Report		8

報告

宇宙線研究所外部評価委員会開催の報告

手嶋 政廣

【宇宙線研究所】

1月16日から18日の3日間の日程で、宇宙線研究所外部評価委員会が開かれました。外部評価委員は、釜江常好(委員長)、海部宣男、鈴木厚人、西村純、また海外から Francis Halzen (University Wisconsin-Madison), Werner Hofmann (MPIK), David Reitze (Caltech), Alan Watson (University Leeds) の8名の委員で構成されました。宇宙線研究所の研究活動、共同利用研究、教育活動を評価していただき、研究所運営に関してさらなる改善への助言、提言を頂くための重要な会議で、過去6年毎に開催されてきました。今回は、各分野をリードする世界的な研究者の方達に評価委員として参加いただき委員会を開催することができました。

委員会でのプロジェクトのレビューは、釜江委員長の意向で、完全にオープンな形式で行なわれました。また、2日目の昼食時には、評価委員と若手研究者との昼食会を催し、活発な意見交換が行なわれたようです。梶田所長による研究所のオーバー



ビューから始まり、各プロジェクトのレビューが2日間にわたり、行なわれました。また、二日目の午後には、伊藤 CRC 実行委員長より宇宙線将来計画検討小委員会中間報告、宇宙線研究所将来計画検討委員会寺澤幹事より中間報告がなされました。レビュー、報告の詳細につきましては、全てのプレゼ

ンテーションが宇宙線研究所のウェブサイトに掲載されていますので、そちらを参考にさせていただきたいと思います。3日目には、報告書のコアとなる部分の最初のドラフトがすでにできあがっており、きわめて効率的に委員会が運営されていました。今年度末までには、最終報告書が外部評価委員会より提出される予定で、報告書は宇宙線研究所のウェブサイトに掲載する予定です。

今回の外部評価委員会にて、熱意溢れるプレゼンテーションをしていただいたプロジェクトリーダーの方達、また、委員会準備、運営にひとかたならぬ支援をしていただいた事務部の方達に感謝いたします。



Name	Affiliation
Kamae, Tsuneyoshi (chair)	Stanford University / University of Tokyo
Nishimura, Jun	University of Tokyo / Institute of Space and Astronautical Science
Suzuki, Atsuto	High Energy Accelerator Research Organization
Kaifu, Norio	The Open University of Japan / National Astronomical Observatory of Japan
Watson, Alan	University of Leeds
Halzen, Francis	University of Wisconsin-Madison
Reitze, David	Ligo Laboratory, California Institute of Technology
Hofmann, Werner	Max-Planck-Institut für Kernphysik
Observer: Kajita, Takaaki, Secretary: Teshima, Masahiro	

外部評価委員会プログラム

Social Activities

Closed Sessions

16. Jan. 2013 (Wed)

9:00 Pickup at Hotel

9:30 Arrival at ICRR

Coffee

10:00 Discussion on the review (Closed session)	"Reviewers, Director, Secretary"	-30
10:30 Introduction of ICRR	Takaaki Kajita	(20+10)
11:00 Telescope Array	Hiroyuki Sagawa	(20+10)
11:30 CANGAROO	Takanori Yoshikoshi	(20+10)
12:00 Tibet AS-gamma	Masato Takita	(20+10)
12:30 Lunch at Cafeteria		
14:00 Ashra	Makoto Sasaki	(20+10)
14:30 CTA R&D	Masahiro Teshima	(20+10)
15:00 High Energy Astrophysics (theory)	Toshio Terasawa	(20+10)
15:30 Coffee break		
16:00 Gravitaitonal Wave	Kazuaki Kuroda	(20+10)
16:30 Observational Cosmology	Masami Ouchi	(20+10)
17:00 Primary Cosmic Ray	Hiroko Miyahara	(10+5)
17:15 Discussion (Closed session)	Reviewers	-30
18:00 Dinner at Cafeteria (Reviewers and ICRR faculty members)		
20:30 Return to Hotel		

17. Jan. 2013 (Thu)

9:00 Pickup at Hotel

9:30 Arrival at ICRR

Coffee

10:00 Super-K

Yoichiro Suzuki

(30+10)

10:40 T2K

Yoshinari Hayato

(15+10)

11:05 Hyper-K R&D

Masato Siozawa

(15+10)

11:30 XMASS

Shigetaka Moriyama

(20+10)

12:00 Theory

Masahiro Kawasaki

(20+10)

Lunch with young scientists at the lecture hole

12:30 in the Kashiwa research complex building 6F

Interim report from Cosmic Ray Committee (CRC)

14:30 for Japanese strategy on astro-particle physics

Yoshitaka Itow

(15+5)

14:50 Interim report from the future planning committee of ICRR

Toshio Terasawa

(15+5)

15:10 Discussion (Closed session)

Reviewers

-30

15:40 Coffee

16:00 "Interviews with project A/B/C/D..."

Reviewers + individual project leader

-90

17:30 Discussion (Closed session)

Reviewers

-30

18:30 Dinner at the restaurant Kisoji with division leaders

20:00 Return to Hotel

18. Jan. 2013 (Fri)

9:00 Pickup at Hotel

9:30 Arrival at ICRR

Coffee

10:00 Discussion (Closed session)

Reviewers

-60

11:00 Preliminary Report from Review committee

"Reviewers, Director, Secretary"

-60

12:00 Lunch

14:00 Return to Hotel

研究紹介

ハッブル宇宙望遠鏡による深宇宙探査の進展 I

小野 宜昭・大内 正己

【宇宙線研究所】

本研究所の観測的宇宙論グループが参加する国際研究チームは、ハッブル宇宙望遠鏡による深宇宙探査プロジェクト（Hubble Ultra Deep Field 2012；以下UDF12）を推進し、赤方偏移(z)8.5-12の時代にあると考えられる星形成銀河候補7天体を検出することに成功した（Ellis et al. 2013、図1）。この時代を探索することは、宇宙再電離の物理過程を解明する上で重要である。クエーサーのスペクトルに現れる銀河間物質の水素による吸収（Gunn-Peterson テスト）から、宇宙は少なくとも $z \sim 6$ でほぼ完全に電離されていたことがわかっている（Fan et al. 2006）。一方、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測から、宇宙再電離が起きたのは $z \sim 10.6 \pm 1.2$ という示唆が得られている（Komatsu et al. 2011、注1）。このように赤方偏移8.5-12は、宇宙再電離が起きたと考えられる時代にあたる。宇宙再電離をめぐる未解決問題のひとつは、当時の宇宙空間を電離するための電離光子を放射した宇宙再電離源が特定できていないことである（詳しくはICRR ニュース第75号参照）。その候補のひとつが星形成銀河である。星形成銀河には、質量が大きく有効温度の高い早期型星が多く含まれる。これらの高温の星からは13.6eVよりエネルギーの高い電離光子が効率良く放射されるため、銀河間空間の中性水素の再電離に大きく寄与すると考えられている。そのため、宇宙再電離期の星形成銀河がもたらす紫外線の光度密度を正確に測定することが宇宙再電離源を明らかにする上で鍵となる。

赤方偏移8以上の高赤方偏移銀河を検出するには、きわめて暗い天体まで検出できる、「深い」近赤外線画像が必要である。一般に、銀河間物質の水素がもたらすライマンアルファ吸収により静止系波長121.6nmにスペクトルのブレイク（ライマンアルファブレイク）が現れ、短波長側の連続光は観測できない。赤方偏移8以上になると観測可能な連続光は約 $1 \mu\text{m} (= [1 + 8] \times 121.6\text{nm})$ より長い波長に赤方偏移してしまうため、近赤外線の波長域をカバーするデータが必要となる。また、遠方にあるほど見かけ上暗くなってしまうため、検出するには深

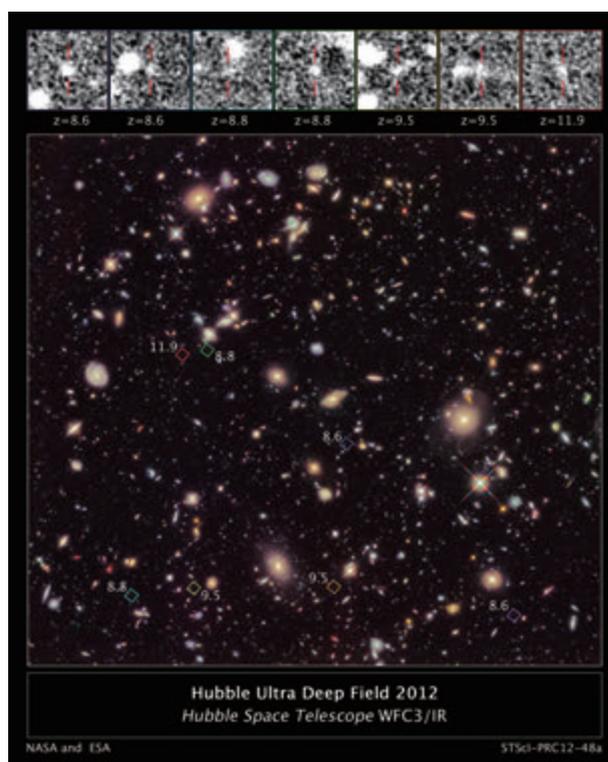


図1：UDF12により同定された、 $z > 8.5$ にあると考えられる7個の遠方銀河候補（上）と、それらの同定を可能にした、これまでで最も深い近赤外データの擬似カラー画像（下）。上の拡大画像には各銀河候補の赤方偏移 z の推定値を添えている。 $z = 8.6$ と 11.9 は、それぞれ宇宙年齢約3.8億年と5.9億年に相当する。下の擬似カラー画像は、いずれもハッブル宇宙望遠鏡の近赤外カメラWFC3のデータが元になっており、青色は $1.05 \mu\text{m}$ データ、緑色は $1.25 \mu\text{m}$ データであり、赤色は $1.4 \mu\text{m}$ と $1.6 \mu\text{m}$ データの重ね合わせである。擬似カラー画像内の色のついた四角は、今回同定された遠方銀河の位置を表している（クレジット：NASA、ESA、Caltech、and the UDF12 team）。

い撮像データが要求される。このような深い近赤外線データを取得することは長い間困難であった。地上の観測では、大気中のOHラジカルがもたらす背景光が明るすぎるため、必要な深さに到達するのはほぼ不可能である。大きな進展がもたらされたのは、2009年にハッブル宇宙望遠鏡に高感度の近赤外カメラWFC3が搭載されてからである。WFC3の登場以

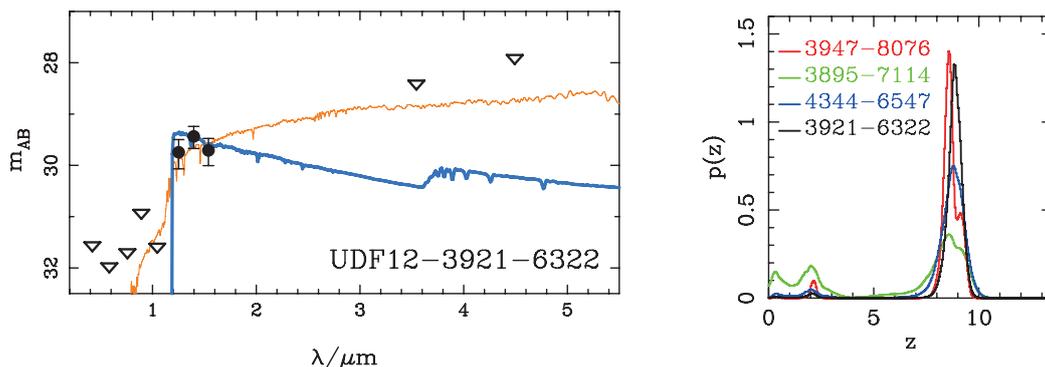


図2：UDF12により検出された赤方偏移8.8の銀河候補 UDF12-3921-6322のスペクトルエネルギー分布 (SED；左) と赤方偏移確率密度分布 (右)。左図の黒丸は各波長での観測点、下向きの三角は 1σ 上限値を表している。観測により得られた SED は、 $1.05\mu\text{m}$ と $1.25\mu\text{m}$ の間に大きなブレークがあり、それより短い波長では検出されていないため上限値で示されている。また、より長波長側の比較的浅い $3.6\mu\text{m}$ と $4.5\mu\text{m}$ の画像でも検出されておらず、それぞれから上限値が得られている。水色の実線は、観測された SED と、星の種族合成モデルから予測される銀河の SED とを比較した結果、最も当てはまりのよかった (χ^2 が最小となった) SED である。この天体の赤方偏移 z の推定値は 8.8 であり、実際に水色の SED が $1.19\mu\text{m} (= [1 + 8.8] \times 121.6\text{nm})$ にライマンアルファブレークを持っていることがわかる。一方、オレンジ色の実線は $z < 4$ にある銀河の中で観測データに最もよく当てはまった $z \sim 2$ 銀河の SED を表している。 $z \sim 2$ 銀河の場合、バルマー系列の吸収等がもたらすブレークが $1.2\mu\text{m}$ 付近に赤方偏移するが、このブレークはライマンアルファブレークと比べて緩やかであるため、 $1.05\mu\text{m}$ と $1.25\mu\text{m}$ の間で観測されている大きなブレークを再現するのは難しい。実際、オレンジの実線は $1.05\mu\text{m}$ における観測の上限値を越えている。このようにして低赤方偏移の解を棄却することができるようになったのは、 $1.05\mu\text{m}$ 画像の積分時間を 4 倍に延ばした UDF12 プロジェクトの戦略的な観測の賜物である。右図の黒線は、UDF12-3921-6322 の観測データに最もよく当てはまる銀河の SED を赤方偏移ごとに探し、それらの当てはまりの良さを調べた結果得られた赤方偏移確率密度分布を表している。黒線は $z = 8.8$ と $z \sim 2$ にピークを持っており、左図で示された水色とオレンジ色の実線はそれぞれに対応する SED である。 $z = 8.8$ における確率密度のピーク値に対し、低赤方偏移でのピーク値がきわめて低いことがわかる (Ellis et al. 2013 より転載)。

後、 $z \sim 7$ から 8 に渡る星形成銀河が探査され、それらがもたらす紫外光度密度が高赤方偏移に向かうにしたがって緩やかに減少していくことが示された (Bouwens et al. 2011a; Oesch et al. 2012)。しかし、 $z \sim 8$ を超える時代の星形成銀河の探査結果は混沌としたものであった。Bouwens et al. (2011b) は、WFC3 を用いた深宇宙探査から、 $z \sim 10$ にある遠方銀河候補を 1 天体同定したと報告した。この天体は、 $1.25\mu\text{m}$ より短い波長で検出されず、それより長波長の F160W フィルターを用いて得られた $1.6\mu\text{m}$ 画像 (F160W 画像) でのみ検出された。しかし、それ以前に彼らは $z > 8.5$ の遠方銀河候補を 3 天体報告していたが、この $z \sim 10$ 銀河候補はそれら 3 天体とは別の天体であった。一方、Yan et al. (2010) は同じデータを解析し、 $1.25\mu\text{m}$ でスペクトルにライマンアルファブレークが見えるとして 20 個もの遠方銀河候補を報告した。しかし、これらには Bouwens et al. (2011b) が検出したいずれの銀河候補も含まれていなかった。このため、得られた紫外線光度密

度は大きく異なる結果となった。

違うグループ間で結果が異なる要因としては、これまで得られた画像データの質が $z > 8.5$ 銀河を検出するには不十分であったことが指摘されている。見かけ上極めて暗い遠方銀河候補の信号雑音比 (SNR) が低く、雑音の影響を大きく受けて偽天体を誤って同定した可能性がある。さらに、赤方偏移が大きいため、このような銀河候補天体は F160W 画像 1 枚でしか検出できないことも要因の一つだろう。加えて F160W 画像より短波長側の画像の質も十分でなく、赤方偏移を決定するのに必要なライマンアルファブレークの同定が正しく行われていなかった可能性もある。実際、ライマンアルファブレークは、 $z \sim 2$ 銀河のスペクトルに見られるバルマー系列の吸収等がもたらすブレークと間違えられることが多い。このブレークは波長に対して緩やかであり、急激なトラフとして見えるライマンアルファブレークとは異なる (例えば図 2 の水色およびオレンジ色の線)。これら異なる 2 つのブレークを見分け

るにはブレークの短波長側で極めて感度の高いデータを取得する必要がある。

これらの問題点を解決するため、UDF12ではハッブル宇宙望遠鏡のWFC3を用いた戦略的な観測を行った。まず、遠方銀河候補のSNRを上げるため、最も長波長側の $1.6\mu\text{m}$ をサンプルするF160W画像をさらに深くすることにした。また、偽検出を減らすため、遠方銀河候補を複数の画像で検出できるように中心波長 $1.4\mu\text{m}$ のフィルターF140Wで画像を取得した。さらに、 $z \sim 2$ 銀河を $z > 8.5$ 銀河と誤同定してしまうことを防ぐため、短波長側の $1.05\mu\text{m}$ フィルターF105Wでの露出時間をこれまでの4倍にした。このようにして得られたUDF12プロジェクトの観測画像に過去約10年間に渡り取得された画像データを組み合わせることで、 $\text{SNR} = 5$ に対して29.5-30等級にも達する極めて深い可視光、近赤外線画像が得られた。これらの画像に対して詳細な解析を行った結果、スペクトルが明らかに $z \sim 2$ 銀河と異なり（図2）、有意なライマンアルファブレークを示す7個の $z > 8.5$ 銀河候補が検出された（図1）。この中の1天体は、赤方偏移11.9程度にあると見られる。分光同定がなされていないため確定的な事は言えないが、この天体はこれまでに報告された、いかなる天体と比べても最も遠方の天体の候補である。赤方偏移11.9はビッグバン後僅か3.8億年後の時代に相当する。これは宇宙再電離初期の時代であるばかりでなく、現在の宇宙年齢のたった2.8%の時代である。このような初期の宇宙にまで人類の天体観測が届いた可能性があることは特筆に値する。

これら7個の遠方銀河候補をもとに、宇宙の紫外光度密度の赤方偏移進化を見積もった結果が図3である。紫外光度密度は $z \sim 5$ から $z \sim 8$ にかけての赤方偏移進化を外挿したものと大きく異ならず、緩やかに上昇してきたことが示された。従来の研究では赤方偏移 $z \sim 10$ から $z \sim 8$ の間の2億年に満たない短い時間の間に、紫外光度密度が1桁程度増加した（Bouwens et al. 2011b）と主張されていたことは対照的である。なお、この観測結果から得られる宇宙再電離に関する示唆はRobertson and the UDF12 team et al. (2013) in preparationで報告する予定である。

今回の観測により、宇宙再電離期の初期と考えられている時代まで遡って銀河候補が発見された。さらに、その紫外光度密度の赤方偏移進化が緩やかであることから、 $z \sim 12$ より遠方にも相当数の銀河がすでに形成されていたと期待される。残念ながら、ハッブル宇宙望遠鏡WFC3では、これ以上遠方の宇

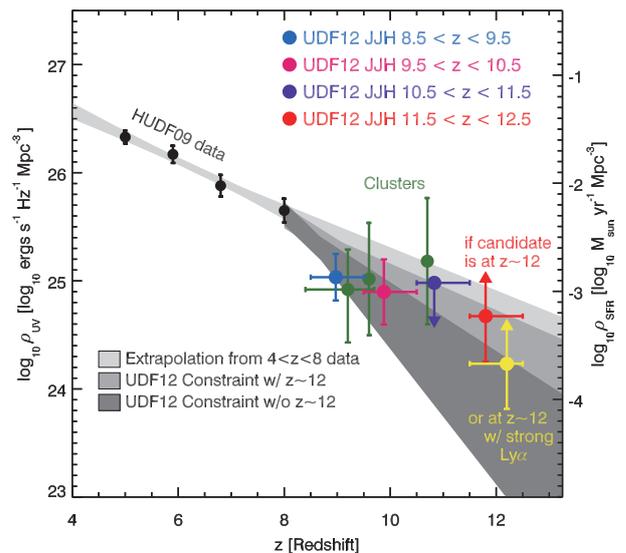


図3：宇宙の紫外光度密度の赤方偏移進化。先行研究では、赤方偏移 $z \sim 10$ から $z \sim 8$ の間の2億年に満たない短い時間の間に、紫外光度密度は急激に1桁ほど大きくなったと主張されていた（Bouwens et al. 2011b）。UDF12により、これまで得られた中で最も深い近赤外線画像が取得され、可視画像と組み合わせることで、 $8.5 < z < 12$ にある遠方銀河候補を7天体発見した。その結果は、紫外光度密度が $z \sim 8$ 以前に急激に大きくなったのではなく、緩やかに上昇してきたことを示している。黒丸はダスト吸収を補正した紫外光度密度を表している（Bouwens et al. 2007；Bouwens et al. 2011b）。その赤方偏移進化を高赤方偏移側へ外挿したものが、薄灰色の領域である。緑色の丸は、手前の銀河団による重力レンズ効果を使った超遠方銀河サーベイCLASHの結果（Zheng et al. 2012；Coe et al. 2012；Bouwens et al. 2013）。UDF12による深宇宙探査の結果、赤方偏移 $8.5 < z < 9.5$ に4天体、 $9.5 < z < 10.5$ に2天体が発見された。これらを紫外光度密度に換算した値がそれぞれシアンとマゼンタの丸で示されている。また、 $10.5 < z < 11.5$ には天体が見つからなかったため、それに対応する値を上限値として紫矢印で示している。さらに、 $z = 11.9$ に同定された1天体をもとに見積もった紫外光度密度の下限値を赤矢印で示している。黄色の矢印は、 $z = 11.9$ 天体が強いライマンアルファ放射（静止系等価幅 260\AA ）をともなっていた場合の、ライマンアルファ輝線の寄与を差し引いた紫外光度密度である。中程度の濃さの灰色の領域と、最も濃い灰色の領域は、それぞれ $z = 11.9$ 天体を考慮した場合としなかった場合に、紫外光度密度が $z \sim 8$ から線形に赤方偏移進化する場合のmaximum likelihood 68%信頼区間である。右側の縦軸は紫外光度密度をMadau et al. (1998)の式を用いて星形成率密度に換算したものである（Ellis et al. 2013より転載）。

宙を探索することは原理的に難しい。 $z \sim 12$ を超えると、ライマンアルファブレイクがWFC3で観測可能な波長範囲より長い波長にまで赤方偏移してしまうためである。さらに初期の宇宙の銀河探索は、たとえば2010年代後半の打ち上げを予定している次世代の赤外衛星望遠鏡（James Webb Space Telescope）、さらには2020年頃にファーストライトを目指す30m望遠鏡（TMT）などが可能にしてくれるだろう。

（注1）この宇宙再電離時期の見積もりは、宇宙再電離が瞬時に起きたと仮定している。宇宙再電離が瞬時に起こることは物理的に考えにくいですが、宇宙再電離史が明らかでない現時点ではこのような仮定をおいて宇宙再電離期の目安を与えている。

参考文献

- Bouwens et al. 2007, ApJ, 670, 928
Bouwens et al. 2011a, ApJ, 737, 90
Bouwens et al. 2011b, Nature, 469, 504
Bouwens et al. 2013, ApJ, submitted (arXiv : 1211. 2230)
Coe et al. 2013, ApJ, 762, 32
Ellis et al. 2013, ApJ, 763, L7
Fan et al. 2006, AJ, 132, 117
Komatsu et al. 2011, ApJS, 192, 18
Madau et al. 1998, ApJ, 498, 106
Oesch et al. 2012, ApJ, 759, 135
Yan et al. 2010, RAA, 10, 867
Zheng et al. 2012, Nature, 489, 406

人 事 異 動

発令日	氏名	異動内容	職
H25. 1. 1	山下 雅 樹	再採用	特任准教授

(H25.1.1~H25.1.31)

ICRR-Report 2012年度

ICRR-Report-639-2012-28

“Smooth hybrid inflation in a supersymmetric axion model”

Masahiro Kawasaki, Naoya Kitajima, Kazunori Nakayama.

ICRR-Report-640-2012-29

“Opening the window to the co genesis with Affleck-Dine mechanism in gravity mediation”

Ayuki Kamada, Masahiro Kawasaki, Masaki Yamada.

ICRR-Report-641-2012-30

“Mass Splitting between Charged and Neutral Winos at Two-Loop Level”

Masahiro Ibe, Shigeki Matsumoto, Ryosuke Sato.

ICRR-Report-642-2012-31

“Extended analysis of CMB constraints on non-Gaussianity in isocurvature perturbations”

Chiaki Hikage, Masahiro Kawasaki, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi.

ICRR-Report-643-2012-32

“Axions : Theory and Cosmological Role”

Masahiro Kawasaki, Kazunori Nakayama.

ICRR-Report-644-2012-33

“Testing general scalar-tensor gravity and massive gravity with cluster lensing”

Tatsuya Narikawa, Tsutomu Kobayashi, Daisuke Yamauchi, Ryo Saito.

No.84

2013年3月31日

東京大学宇宙線研究所

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5

TEL (04) 7136-5148

編集委員 林田美里