

## CONTENTS

P 1.  
すばる望遠鏡の深宇宙観測  
で明らかにされた宇宙再電  
離の加速進化の兆候  
・・・今野 彰  
大内 正己

P 5.  
ピックアップ  
国際宇宙ガンマ線天文台  
CTA の建設サイトが決定

P 6.  
人事異動

P 7.  
ICRR Report

P 7.  
ICRR Seminar

AKIRA KONNO &amp; MASAMI OUCHI, ICRR - Observational Cosmology Group

研究紹介



宇宙線研究所

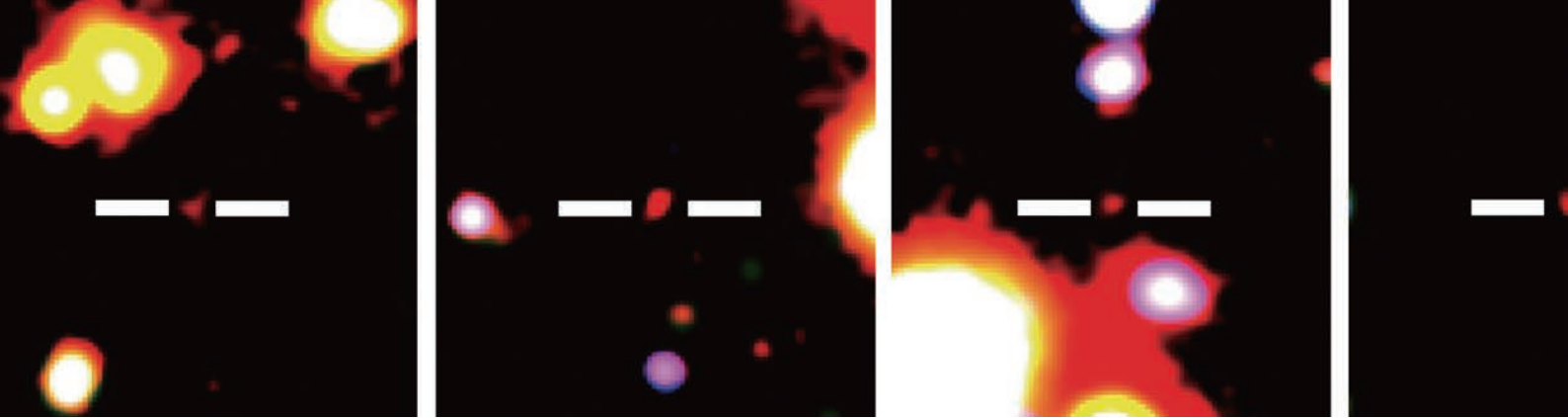
今野 彰・大内 正己

## すばる望遠鏡の深宇宙観測で明らかにされた宇宙再電離の加速進化の兆候

本研究所観測的宇宙論グループが主導する研究チームは、NB101 と呼ばれる独自の狭帯域フィルターを搭載したすばる望遠鏡主焦点カメラ (Suprime-Cam) を用いて、積分時間が約 106 時間の超深撮像探査を行った。その結果、すばる望遠鏡にとって最遠方である赤方偏移 ( $z$ ) 7.3 の宇宙に存在するライマンアルファ輝線銀河 (LAE) を 7 天体発見した<sup>[1]</sup>。この天体数は当初の予想より桁で少なく、LAE が宇宙初期に突然姿を現したことを意味する。この観測結果は、宇宙再電離と銀河形成進化の物理過程を明らかにする一つの手がかりとなった。

宇宙はビッグバンで誕生し、宇宙を満たす陽子と電子は  $z \sim 1100$  で再結合し中性となった。その後天体が形成され始めると、中性の銀河間物質 (IGM) に電離領域が多数生じる。これらの天体には有効温度の高い早期型星が多く含まれ、この高温の星からは 13.6eV より高エネルギーの電離光子が黒体放射により効率よく作られるからである。これらの電離領域が重なりあ

うことで IGM 中の中性水素の電離が進んだと考えられ、これを宇宙再電離と呼ぶ。クエーサーのスペクトルに現れる IGM 中の中性水素による吸収線観測 (例えば<sup>[2]</sup>) や宇宙背景放射 (CMB) の偏光観測 (例えば<sup>[3]</sup>) によると、宇宙再電離は  $z=6-12$  に起きたことが明らかとなっている。しかしこの間に IGM 中の陽子に対する中性水素の割合  $x(\text{HI})$  が赤方偏移と共にどう変



## “陽子に対する中性水素の割合が どう変化したかという宇宙再電離史は 未だ理解されていない”

化したかという宇宙再電離史は未だ理解されていない。クエーサーの観測では  $x(\text{HI}) < 10^{-4}$  程度の  $z < 7$  の時代しか宇宙再電離史を調べることができず、CMBの観測では  $x(\text{HI})$  の時間変化を追うことができないからである。各赤方偏移での  $x(\text{HI})$  を推定する方法の一つとして LAE を使う手法がある。LAE は、宇宙再電離期 ( $z > 6$ ) においても多数存在する、静止系波長 121.6nm の Ly $\alpha$  輝線を放射する星形成銀河である。宇宙再電離期の LAE から放射された Ly $\alpha$  輝線は IGM 中の中性水素による吸収を受け、Ly $\alpha$  光度が暗くなって観測される。従って、ある Ly $\alpha$  光度をもった LAE の個数密度の関数を表す Ly $\alpha$  光度関数を各赤方偏移で求め、その変化量を調べれば、 $x(\text{HI})$  の時間変化を調べることができる。

高赤方偏移銀河からの Ly $\alpha$  輝線を捉えるには、狭帯域フィルターの撮像データを用いる方法がある。狭帯域フィルターは特定の波長範囲 (~100 Å 程度) の光だけを透過させるが、赤方偏移した Ly $\alpha$  輝線が狭帯域フィルターのカバーする透過波長帯に入るとき、狭帯域フィルターの撮像データ上で光度の超過が現れる。一方狭帯域フィルターより広い透過波長帯 (~1000 Å 程度) を持つ広帯域フィルターの撮像データ上では、単位波長あたりのフラックス密度が小さいため、天体の光度は大きく変わらない。このように狭帯域と広帯域のフィルターの間での天体の明るさの差 (色超過) を利用することで、特定の赤方偏移に存在する LAE を検出する事ができる。これまでの研究では、Ly $\alpha$  光度関数は  $z = 3.1 - 5.7$

では進化せず (例えば<sup>[4]</sup>)、 $z = 5.7 - 6.6$  で減少している (例えば<sup>[5]</sup>) ということが明らかとなっている。近年ではより高赤方偏移の  $z \sim 7.3$  LAE 探査も精力的に行われている。しかし  $z = 6.6$  と  $z \sim 7.3$  の間で Ly $\alpha$  光度関数は、無進化であるという主張<sup>[6]</sup> などと、減少しているという主張<sup>[7]</sup> などがあり、 $z = 6.6 - 7.3$  での Ly $\alpha$  光度関数の進化の有無は論争中であった。すばる望遠鏡でも狭帯域フィルターを用いた  $z \sim 7.3$  LAE 探査が行われた<sup>[8]</sup> など、これらの探査では、その浅さのため  $z \sim 7.3$  の Ly $\alpha$  光度関数の明るい側 ( $L(\text{Ly}\alpha) \sim 1 \times 10^{43}$  erg/s) しか調べることができず、 $z = 6.6 - 7.3$  での Ly $\alpha$  光度関数の進化を明確に結論づけることができなかった。

この論争を解決するには、より広い Ly $\alpha$  光度範囲にわたって LAE を多数検出することで系統的・統計的不定性を小さくし、Ly $\alpha$  光度関数を高い精度で求める必要がある。しかし  $z = 7.3$  の LAE を検出するのは、その暗さのため非常に難しい。暗い Ly $\alpha$  輝線を効率よく捉えるために、我々はまず独自の狭帯域フィルター NB101 を開発した。NB101 の特長はその透過波長帯の狭さである。これまでのすばる望遠鏡による  $z \sim 7.3$  LAE 探査で用いられた狭帯域フィルターの透過波長帯は 200 Å なのに対し、NB101 のそれは 90 Å である。透過波長帯

が狭いほど輝線に対する感度が高くなる。さらに探査計画を効率的なものにした結果、NB101 を用いた LAE 探査は、過去のすばる望遠鏡による探査の ~1.6 倍のスピードで Ly $\alpha$  限界光度に達することができる。次に我々は、NB101 をすばる望遠鏡 Suprime-Cam に搭載し、約  $0.5 \text{ deg}^2$  の天域に対し合計約 106 時間の積分観測を行った。この積分時間はすばる望遠鏡にとって最長に匹敵する。NB101 を用いた超深撮像観測により我々は、過去のすばる望遠鏡を用いた  $z \sim 7.3$  LAE 探査より ~4 倍深く、かつ過去の  $z = 3.1 - 6.6$  LAE 探査と同等の Ly $\alpha$  限界光度 ( $L(\text{Ly}\alpha) = 2.4 \times 10^{42}$  erg/s) まで達することができた。これにより、 $z = 7.3$  での Ly $\alpha$  光度関数をこれまで無く高い精度で求めることが可能になっただけでなく、 $z = 6.6 - 7.3$  での Ly $\alpha$  光度関数の進化について初めて統計的に意味のある比較ができるようになった。

我々は、NB101 の撮像データを基に、 $z = 7.3$  LAE 候補を 7 天体発見した (図 1)。もし  $z = 6.6 - 7.3$  で Ly $\alpha$  光度関数が無進化だった場合、今回の観測からは  $z = 7.3$  LAE が約 65 天体発見されるはずである。しかし実際には 1 桁小さい天体数しか同定されなかった。したがって、 $z = 6.6$  から  $7.3$  にかけて Ly $\alpha$  光度関数は減少していると考えられる。実際に  $z = 7.3$  での Ly $\alpha$  光度関数を求め、典型的な Ly $\alpha$  光度  $L^*$  と個数密度  $\Phi^*$  をパラメータとするシェヒター関数でフィットすることで、 $z = 6.6 - 7.3$  で Ly $\alpha$  光度関数が有意に進化していることを 90% 以上の信頼性で結論づけることができた (図 2)。

さらに、 $z = 7.3$  での Ly $\alpha$  光度密度を計算

## “この積分時間はすばる望遠鏡にとって 最長に匹敵する”

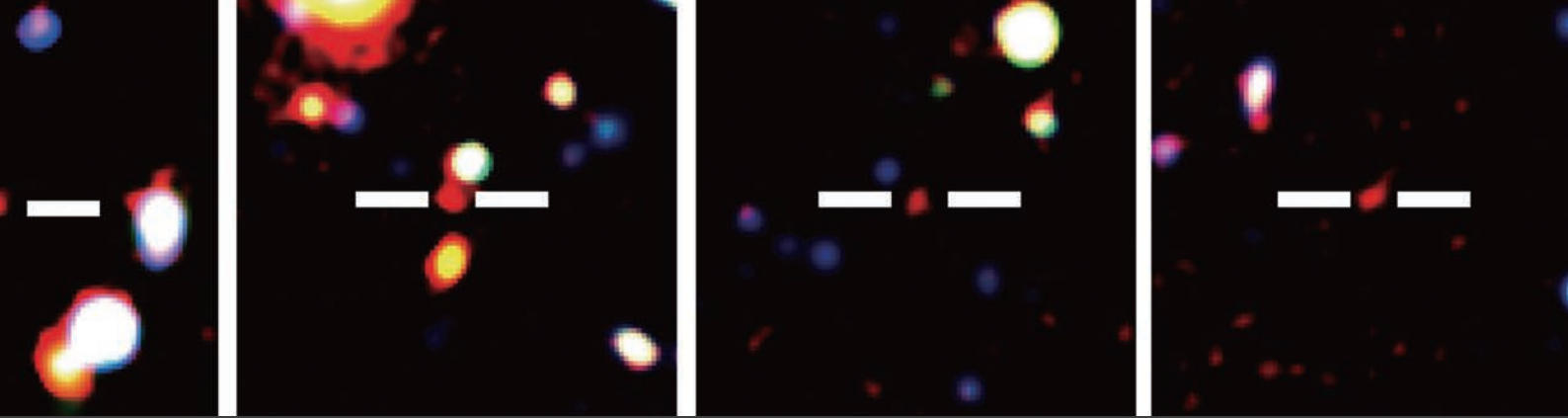


図1：NB101を用いたすばる望遠鏡による超深撮像探索により同定された $z=7.3$  LAE 候補の擬似カラー画像。擬似カラー画像はNB101と2つの広帯域フィルターの3つのデータの合成画像で、青色がBバンドデータ、緑色がiバンドデータ、赤色がNB101データである。2本の白い線の間にある赤い天体が、今回の観測で検出された $z=7.3$  LAEである（プレスリリースの図より）。

## “Ly $\alpha$ 光度関数が $z=7$ で加速的に進化していることを発見した。”

し、 $z=5.7$ と $6.6$ のそれと比較することで、我々は $z=7$ でLy $\alpha$ 光度関数が加速的に進化していることを発見した。これを図3に示す。 $z=6.6-7.3$ でのLy $\alpha$ 光度関数の減少については過去の研究でも指摘されていた<sup>(7)</sup>など。しかし、その急激な進化については我々が初めて明らかにした。図3には紫外線(UV)の光度密度の進化も比較として載せている。図3からUV光度密度については、 $z=7$ では加速的に進化せず、 $z=8$ でその進化が見られる。このUV光度密度は、ライマンブレイク銀河(LBG)と呼ばれるLAEとは別の高赤方偏移銀河から得られた観測値である<sup>(9)</sup>が、宇宙の星形成率密度を反映している。従って、Ly $\alpha$ 光度関数の加速進化は星形成率密度の進化とは異なる物理的メカニズムで生じていることが分かった。

Ly $\alpha$ 光度密度の $z=7$ での加速進化の他のメカニズムとして、宇宙再電離期におけるIGM中の中性水素の急激な増加が考えられる。これを検証するために、宇宙再電離が完了した $z=5.7$ でのLy $\alpha$ 光度密度と、今回得られた $z=7.3$ のそれを比較することで、 $z=7.3$ での $x(\text{HI})$ を推定した。このとき銀河進化によるLy $\alpha$ 光度密度の進化の分は差し引いている。複数の理論モデル(例えば<sup>(10)</sup>)を基に、 $z=7.3$ で $x(\text{HI})=0.3-0.8$ という制限が得られた。この $x(\text{HI})$ の不定性には、Ly $\alpha$ 光度密度の測定誤差と理論モデル間での推定値の不定性が含まれている。 $z=6.6$ では $x(\text{HI})=0.0-0.4$ と推

定されている<sup>(5)</sup>ため、 $z=6$ で $x(\text{HI})\sim 0$ とすると、不定性は大きいものの $x(\text{HI})$ は $z=7$ で急激に増加していることが示唆される。次にこの宇宙再電離史がCMBのトムソン散乱光学的厚み $\tau(\text{el})$ の観測値を説明できるかどうか調べた。CMB観測衛星のWMAPによると、光学的厚みの大きさは $\tau(\text{el})=0.08$ 程度で、これは宇宙再電離が早い時期( $z=10$ 程度)に起きたことを意味する。様々な宇宙再電離史と $\tau(\text{el})$ を予想した理論モデル<sup>(11)</sup>を用いて、 $x(\text{HI})$ の急激な増加とCMBのトムソン散乱光学的厚みを同時に説明できるモデルが存在するか調べたところ、そのようなモデルは無く両者の間には矛盾が生じることが分かった。従って、 $z=7$ でのLy $\alpha$ 光度関数の加速進化は $x(\text{HI})$ の急激な増加でも説明できず、新たな物理的なメカニズムが必要である可能性がでてきた。新たなメカニズムとしては2つ考えられる。1つがIGM中の電離領域内でのクランプ状の中性水素ガス雲の存在である<sup>(12)</sup>。この中性水素ガス雲は、宇宙全体の中性水素割合 $x(\text{HI})$ には大きな影響を与えないが、LAEからのLy $\alpha$ 輝線は吸収するため、実際の $x(\text{HI})$ は小さくてもLy $\alpha$ 光度関数の急激な減少を説明することができる。もう1つはLAEの電離光子の脱出率の増加である<sup>(13)</sup>。Ly $\alpha$ 光子は銀河の電離領域内での再結合によって生じるが、電離光子脱出率が高い状態では再結合率が小さくなるため、Ly $\alpha$ 光子が効率よく生成されない。これによりLAEのLy $\alpha$

“「Planckの最新の結果から」宇宙再電離の加速進化が $z\sim 7$ で起きた可能性が出てきた”

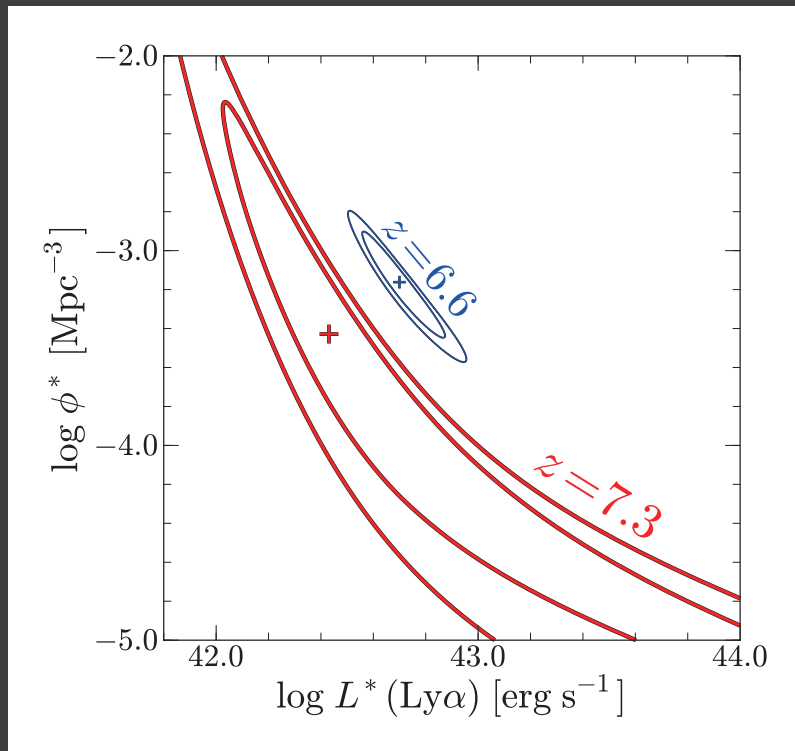


図2: Ly $\alpha$ 光度関数をシェヒター関数でフィットさせたときのパラメータ  $L^*$  と  $\Phi^*$  のエラー分布。赤が  $z=7.3$  に対し、青が  $z=6.6$  の Ly $\alpha$ 光度関数である。内側と外側の楕円がそれぞれ 68% と 90% の信頼度を表す (Konno et al. 2014 の Fig. 10 より)。

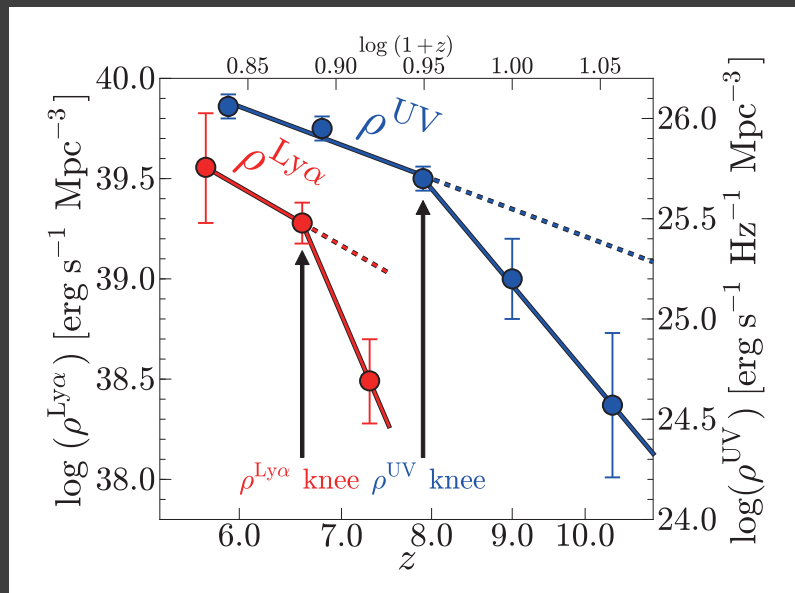


図3: Ly $\alpha$ 光度密度 (赤) と UV 光度密度 (青) の進化を赤方偏移の関数として表したものの。Ly $\alpha$ 光度密度は  $z=7$  付近で急激に減少しているのに対し、UV 光度密度の方は  $z=7$  ではそのような進化はせず、 $z=8$  付近で加速的に進化している (Konno et al. 2014 の Fig. 11 より)。

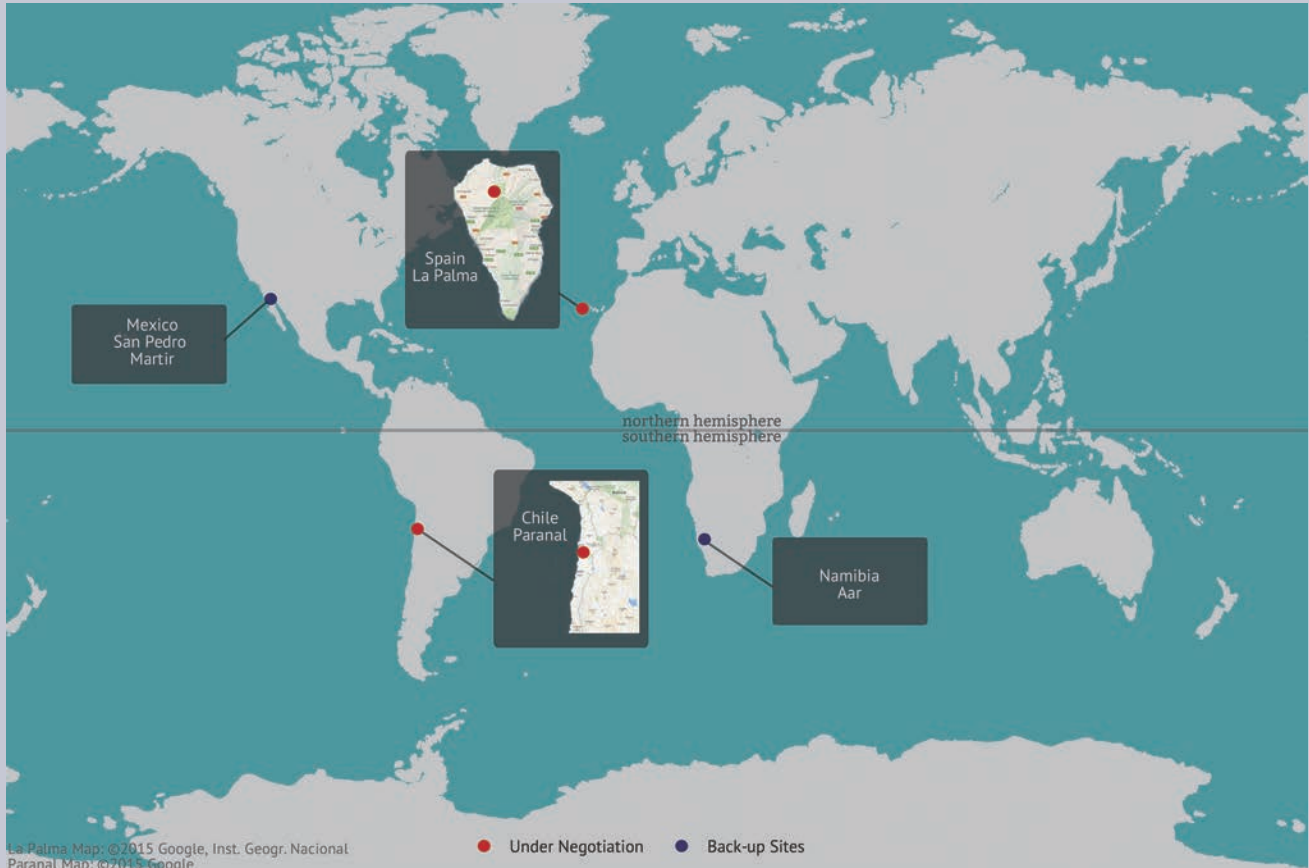
光度が暗くなり、Ly $\alpha$ 光度関数が減少する。

このように Ly $\alpha$ 光度関数の加速進化について様々な可能性が議論されてきた。しかし 2015 年春に発表された CMB 観測衛星 Planck の最新の結果によると  $\tau(\text{el}) = 0.07$  程度と小さくなり、 $x(\text{HI})$  の急激な進化とこの  $\tau(\text{el})$  の観測値との間の矛盾が誤差の範囲で無くなった。従って、宇宙再電離の加速進化が  $z \sim 7$  で起きた可能性が出てきた。ただし今回得られた  $z=7.3$  での  $x(\text{HI})$  の不定性は大きく、宇宙再電離の加速進化を明確に結論づけるには至らなかった。今後我々の研究グループでは宇宙再電離史をより高い精度で調べるため、次世代装置 Hyper Suprime-Cam を用いた大規模探査で宇宙再電離の加速進化の真偽を検証する計画である。

## 参考文献

- [1] Konno et al. 2014, ApJ, 797, 16
- [2] Fan et al. 2006, AJ, 132, 117
- [3] Hinshaw et al. 2013, ApJS, 208, 19
- [4] Ouchi et al. 2008, ApJS, 176, 301
- [5] Ouchi et al. 2010, ApJ, 723, 869
- [6] Krug et al. 2012, ApJ, 745, 12
- [7] Clement et al. 2012, A&A, 538, A66
- [8] Shibuya et al. 2012, ApJ, 752, 114
- [9] Bouwens et al. 2015, ApJ, 803, 34
- [10] McQuinn et al. 2007, MNRAS, 381, 75
- [11] Choudhury et al. 2008, MNRAS, 385, L58
- [12] Bolton & Haehnelt 2013, MNRAS, 429, 1695
- [13] Dijkstra et al. 2014, MNRAS, 440, 3309

# 国際宇宙ガンマ線天文台 CTA の建設サイトが決定



クレジット：CTA コンソーシアム

国際宇宙ガンマ線天文台（CTA）は、非熱的、高エネルギー宇宙を探索する高エネルギーガンマ線天文台で、今までにない感度で高エネルギー放射を測定し、現在稼働している望遠鏡のおよそ 10 倍の感度を得ることを目標にしています。CTA 計画には、1,000 人を超える研究者が 5 大陸 31 カ国、170 を超える研究機関から参加しています。宇宙の観測、観測領域を最適化するために、CTA 天文台は南北の 2 サイトからなり、南半球に約 100 台の望遠鏡、北半球に約 20 台の望遠鏡を設置する予定です。

2015 年 7 月 16 日、オーストリア、ブラジル、チェコ、フランス、ドイツ、イタリア、ナミビア、オランダ、日本、ポーラ

ンド、南アフリカ、スペイン、スイス、英国の各国政府、代表機関の代表者から構成される CTA 評議会は、数ヶ月にわたる交渉、長期にわたる環境調査、装置性能、建設経費、運転経費の評価を行い、ESO チリ・パラナルサイトとスペイン・ラパルマサイトと交渉をはじめるとを決定しました。

今回の決定は、最も先進的な高エネルギーガンマ線観測装置 CTA の実現に向けた大きなステップとなり、今後 10 年以上にわたり、CTA の持てる最大限の出力を提供することで科学コミュニティーへ貢献できると期待されています。

南半球のサイトは、アタカマ砂漠のヨーロッパ南天天文台のパラナル天文台から南東に 10km の位置です。この場所は、地球

上で最も乾燥し、人里離れた場所であり、天文学のための天国といえます。年間を通して素晴らしい観測条件であるだけでなく、ヨーロッパ南天天文台の協力により、存在するインフラ（道路、宿泊施設、水、電気など）の提供を受け、すでに存在する施設を利用すること、CTA 天文台の建設、運用を行うことになっています。

北半球のサイトは、カナリ宇宙物理学研究所の管理するスペイン・カナリ諸島にあるロケ・ムチャチョス天文台です。サイトは、高度 2,200m で火山のクレーターそばに位置し、現在 2 基のガンマ線望遠鏡 MAGIC を擁しています。このサイトは年間を通して理想的な観測条件を提供しているといえます。

# 人 事 異 動

発 令 日	氏 名	移動内容	職
H27.6.16	HAGEN, Alex	受 入	外国人特別研究員
H27.6.23	黒田 和明	称号授与	名誉教授
H27.6.30	黒田 和明	受入終了	協力研究員
H27.6.30	長岡 洋一	辞 職	特任研究員（プロジェクト研究員）
H27.6.30	中村 沙織	転 出	総務係（資産管理部資産課資産経営チーム）へ
H27.7.1	関野 幸市	採 用	技能補佐員（研究支援推進員）
H27.7.1	佐藤 悠	転 入	総務係へ
H27.7.1	白神 良子	採 用	事務補佐員
H27.7.16	豊島 義明	採 用	技能補佐員
H27.7.31	清水 兼壽	辞 職	技能補佐員（研究支援推進員）
H27.7.31	國分やよい	辞 職	事務補佐員
H27.8.1	田阪 茂樹	採 用	特任研究員（シニアフェロー）
H27.8.1	KIERAN, Craig	採 用	特任研究員（研究所研究員）
H27.8.1	清水 光文	採 用	技能補佐員
H27.8.18	HAGEN, Alex	受入終了	外国人特別研究員
H27.8.31	金田 邦雄	辞 職	特任研究員（研究所研究員）
H27.8.31	土井 康平	辞 職	学術支援専門職員
H27.8.31	張ヶ谷啓介	辞 退	学振特別研究員（PD）
H27.8.31	藤江多美子	任期満了	事務補佐員
H27.8.31	眞島千恵子	任期満了	事務補佐員
H27.9.1	DOMINIS PRESTER, Dijana	採 用	特任准教授
H27.9.1	井戸村貴子	採 用	事務補佐員
H27.9.1	岡野 有香	採 用	事務補佐員

(H27.6.2～H27.9.1)

# ICRR Report

2015 年度

ICRR-Report-700-2015-1

“Spontaneous thermal Leptogenesis via Majoron oscillation”

Masahiro Ibe, Kunio Kaneta.

# ICRR Seminar

2015 年度

2015.7.29

大山祥彦 (宇宙線研究所)  
“将来の宇宙論的な 21cm 線観測と CMB 偏光観測によるニュートリノ質量とその階層性の制限”

2015.8.6

阿部 智広 (KEK)  
“Spin-1 particle and the ATLAS Diboson excess”

2015.8.18

K.S. Cheng (The University of Hong Kong)  
“Possible high energy phenomena related to the stellar capture by the galactic supermassive black holes”

2015.9.16

Tanguy Pierog (Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Nuclear Physics)  
“Recent results from Auger and KASCADE-Grande, and introduction to the CORSIKA air shower simulation code”



## 宇宙線研究所常設展示室

今秋、東京大学宇宙線研究所の玄関口に、一般の方向けの常設展示室（平日9：00-17：30）が新設されました。実験装置や模型の展示、交流スペースが設置され、外ガラスやパネル等で宇宙線研究所の実験施設や研究内容が易しく解説されています。

No. 94

東京大学宇宙線研究所

2015.9.30

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 TEL (04) 7136-5148

バックナンバー：<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/cat-icrr/>

編集 林田 美里