

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22253002

研究課題名（和文）

銀河の星間ガス循環の大域的構造の研究

研究課題名（英文）

Study of the Global Structure of Interstellar Gas Cycle in Galaxies

研究代表者

吉井 讓 (YOSHII YUZURU)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：00158388

研究成果の概要（和文）：南米チリの標高 5640m に設置した miniTAO 1m 望遠鏡とその近赤外線観測装置 ANIR を用い、通常地上観測はほとんど不可能な水素輝線 Pa α (1.87 μ m) で我々天の川銀河及び系外銀河 41 天体の星形成領域の観測を行った。この観測により、分子ガス量と星形成率の関係にある分散の原因を明らかにするとともに、銀河の爆発的星形成活動に從來知られていない活動モードがある可能性を示し、銀河の形成と進化について新たな知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：We have carried out hydrogen Paschen- α (1.87 μ m) narrow-band imaging observations of the Galactic Plane and 41 nearby starburst galaxies, utilizing the near-infrared camera ANIR installed on the miniTAO 1m telescope. As the miniTAO is located at the summit of Co. Chajnantor with extremely high altitude of 5640m, it enables us to carry out observations of Pa- α emission from the ground, which is otherwise very difficult. We obtained new insights into the galaxy formation and evolution that (1) the dispersion known in the Kennicutt-Schmidt law (the correlation between molecular gas masses and star-formation rates) seems to be dependent on the age of star forming regions, and that (2) there may be a previously unknown star-forming mode in the starburst activities of galaxies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	14,400,000	4,320,000	18,720,000
2011年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2012年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
年度			
年度			
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：銀河形成・赤外線・パッシェン α

1. 研究開始当初の背景

銀河におけるガス循環の基本過程（星—星間ガス—星のサイクル）を観測データにもとづいて明らかにすることは、いまだ謎の多い「銀河の形成と進化」を理解する上で最も重要な課題である。我々銀河系の「星」については、過去の可視光による数多くの観測から十分信頼に足るモデルが存在しているのに対して、「星間ガス」については、観測データの不足から、実際の銀河形成・進化の研究に応用できるレベルのモデルが未だ存在しない。これは、星間ガスのかなりの部分を担う「電離された星間ガス」について、銀河スケールでの空間分布、化学組成、および、速度構造の情報が大きく欠けているためである。そこで、現在ガス循環が活発に行われている銀河系円盤部（とくに銀河中心方向）の電離ガス分布を調べることは重要かつ緊急の課題であった。

他方、最近の遠方銀河の研究により、我々銀河系クラスの銀河の大部分が、 $z>1$ の時代に赤外線光度が 10^{11} 太陽光度を越えるような爆発的星形成を起こしている赤外線銀河(LIRG)のフェーズを経験したと考えられている。同様の赤外線光度の近傍LIRGは、我々銀河系の過去の姿を見ていると考えることができ、このような銀河での電離ガス分布を現在の銀河系と比較することは銀河系形成時のガス循環を知る上で重要であった。

2. 研究の目的

電離された星間ガス（大質量星形成領域）の観測には、歴史的に紫外・可視域にある水素再結合輝線（ $\text{Ly}\alpha@1216\text{\AA}$ 、 $\text{H}\alpha@6563\text{\AA}$ ）が用いられてきたが、これらは星形成の活発な領域に豊富に存在する星間ダストで容易に隠されてしまう。実際 $\text{H}\alpha$ ですら、銀河系円盤部を 1kpc 程度しか見通せない。そのため、電離ガス質量のほとんどを占める水素の電離状態・量に大きな不定性が生じ、それを基準として導出される化学組成などについても明確な値を得ることができていない。 $\text{Pa}\alpha$ ($1.87\mu\text{m}$) は水素再結合線の中では $\text{H}\alpha$ について強い輝線であり、赤外線波長域にあるため星間吸収を受けにくい(減光量は $\text{H}\alpha$ の約 $1/10$)ことから、ダストに隠された電離ガスを検出するプローブとして期待される。この $\text{Pa}\alpha$ を用い、我々銀河系や近傍で活発な星形成を行なっているスターバースト銀河の観測を行い、そこでダストに隠された電離ガスサーベイを行うことを目的としている。

3. 研究の方法

$\text{Pa}\alpha$ 波長は標高 4200m のハワイ・マウナケア天文台ですら主に大気中の水蒸気による吸収が強く、地上からの観測は非常に困難である。それを克服するために、我々東京大学

のグループがチリ北部の標高 5640m にあるチャナントール山頂に建設した口径 1m の赤外線望遠鏡（通称：miniTAO）/近赤外線カメラ ANIR を用いる。

この ANIR によって、大きく分けて以下の2つのサーベイ観測を行う。

(1) 銀河面電離ガスサーベイ

銀河中心方向を中心とする広い範囲を $\text{Pa}\alpha$ 狭帯域フィルタにより撮像する。これにより、これまでダストに埋もれて発見されていない星形成領域を検出し、銀河系内での電離ガス分布を明らかにする。

(2) 近傍 LIRG の電離ガスサーベイ

我々銀河系が過去に経験したであろう大規模な星形成が、銀河内のどのような環境でどのような分布で起こっていたのかを明らかにするため、スターバースト銀河の $\text{Pa}\alpha$ 撮像観測を行う。IRAS カタログに登録されている $cz = 4,000\text{--}7,000\text{ km/s}$ ($60\text{--}100\text{ Mpc}$) の範囲にある LIRG (約 100 個) を中心に観測する。LIRG は多量のダストをもち、その星形成活動は可視光で隠されているが、 $\text{Pa}\alpha$ を用いて銀河全体としてどのような星形成活動をしているのかを明らかにする。

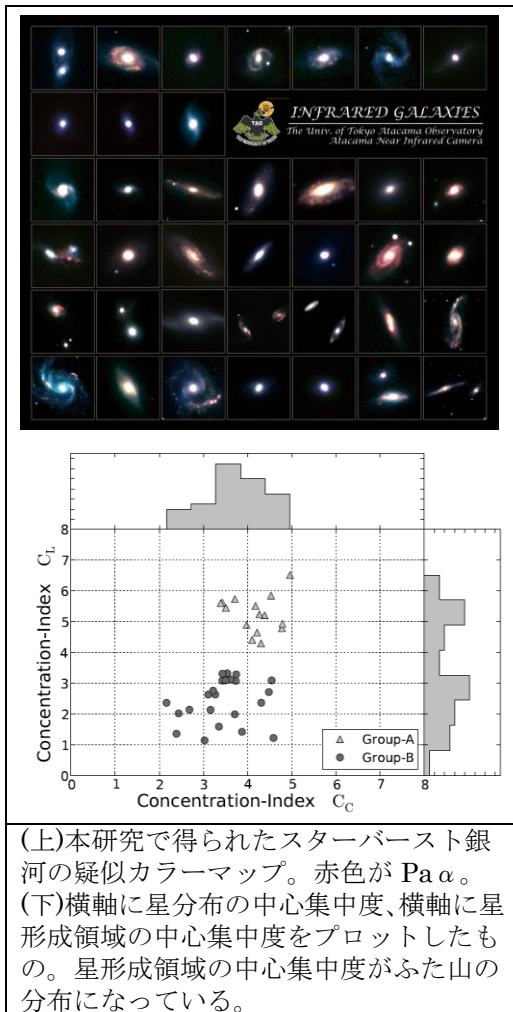
また、miniTAO 望遠鏡は山頂に滞在してのオンサイト観測しか行うことができなかった。そこで安定した観測を行うため、約 50km 離れた山麓の町サンペドロ・デ・アタカマとの無線ネットワークを整備し、遠隔操作で観測が行えるシステムを構築する。

4. 研究成果

(1) 近傍 LIRG の $\text{Pa}\alpha$ 撮像サーベイ

$\text{N}191(\text{Pa}\alpha\text{-off})$ フィルタを用い、総計 41 天体の近傍 ($2800 < cz < 8100\text{ km/s}$) スターバースト銀河の $\text{Pa}\alpha$ 観測を行うことに成功した。取得した天体の 34/41 天体 (80%) が LIRG であり、残りは赤外線光度が一回り小さい銀河である。得られた $\text{Pa}\alpha$ 光度から見積もった星形成率と、AKARI/FIS-PSC で得られた遠赤外線光度による星形成率は一致することを確認でき、 $\text{Pa}\alpha$ 輝線がダスト吸収に十分に強いことが明らかにできた。

さらに各銀河の星形成領域の形態をその中心集中度 (C-index : Conselice et al. 2003) で定量評価したところ、2つのモードに分離することを発見した。

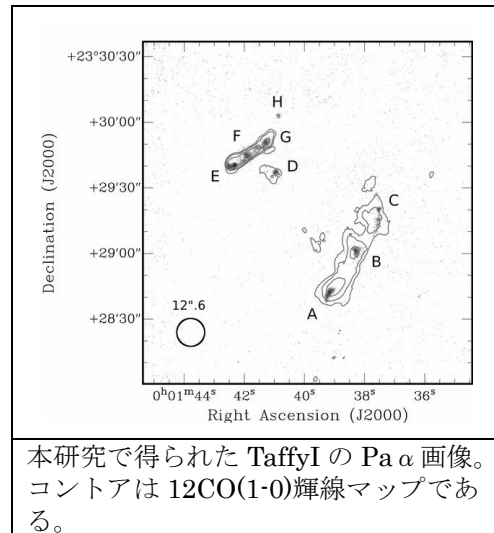


(上)本研究で得られたスターバースト銀河の疑似カラーマップ。赤色が $\text{Pa}\alpha$ 。(下)横軸に星分布の中心集中度、縦軸に星形成領域の中心集中度をプロットしたもの。星形成領域の中心集中度がふた山の分布になっている。

C -index は面輝度の成長曲線を見ており、値が大きいと $1/4$ 乗則に従う楕円銀河的、小さいとそれより広がった渦巻銀河や不規則銀河的な光度曲線プロファイルを持つ指標となる。今後この 2 つのモードの銀河の性質をそれぞれ詳細に調べることで、スターバースト銀河の進化に迫ることができると考えられる。本成果は査読論文として発表済みである (Tateuchi et al. 2012)。

(2) 星形成衝突銀河 Taffy I における星形成活動と星形成則

正面衝突後 20Myr しか経っていない近傍の衝突銀河である Taffy I の $\text{Pa}\alpha$ 撮像を N191($\text{Pa}\alpha$ -off)フィルタを用いて行った。その結果、星形成率が 22 太陽質量/年と、これまで考えられていたより 5 倍以上高く、ほぼ全ての星形成領域が 7Myr と銀河衝突の起きた 20Myr 前よりも若い事なども分かった。また、 ^{12}CO ($J=1-0$)分子輝線から得られた分子ガス量と星形成率を比較したところ、個々の星形成領域について星形成率と分子ガス質量との間に傾き 1.0、分散 14%という極めて強い相関(Schmidt-Kennicutt 則)を示した。



本研究で得られた Taffy I の $\text{Pa}\alpha$ 画像。コントラストは $^{12}\text{CO}(1-0)$ 輝線マップである。

これは、通常の銀河で見られる相関に比べて分散が非常に小さい。星形成領域の年齢がほぼ 7Myr と横並びで Taffy I の系全体にわたって星形成領域と対応する分子雲が同じ進化の段階にある可能性が高い事を考えると、通常の Schmidt-Kennicutt 則に見られる大きな分散は分子雲の進化段階のバラつきに起因することを示唆している。本成果は、査読論文として発表済みである (Komugi et al. 2012)。

(3) 銀河面 $\text{Pa}\alpha$ 撮像サーベイ

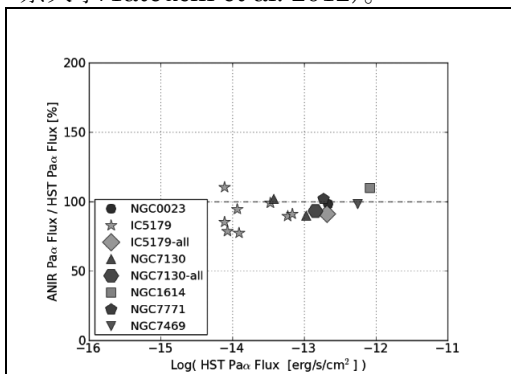
本研究により、銀河中心方向を中心とし、 $1.5^\circ \times 1^\circ$ 角にわたって N187($\text{Pa}\alpha$)フィルタによる撮像を行った。これは、これまでに得られている最も広い $\text{Pa}\alpha$ 撮像データとなる。この画像から、複数の新たな星形成由来の電離ガス雲を検出することに成功した。

(4) 埋もれた大質量星の探索

電離ガス領域の形成過程を明らかにする上で、紫外線源や質量放出源となっている Wolf-Rayet 星, LBV, YHG, RSG などを含む大質量星クラスターの形成・進化過程(年齢), さらにその空間分布や星間物質への寄与などの解明は重要な要素である。しかしながら、その大部分は星間ダストに埋もれており、同定が難しい。本研究では、銀河中心方向、Westerlund クラスタ、大マゼラン雲内の 30 Doradus の大規模星形成領域、大質量星クラスターを Ks バンドに加えて、N187($\text{Pa}\alpha$)フィルタ、N207 フィルタを用いた撮像観測を行い、多数の既知天体に加えて数十個の天体を検出することに成功した。またこの手法は、減光の大きな領域で減光量を補正した Ks 等級及びカラー情報を精度よく求めることが可能であることが示され、若い天体も含めた大質量星の形成から終末に至る各進化段階の天体の検出に有効

であることが実証された。

- (5) Pa α 輝線の地上狭帯域フィルタ観測データのキャリブレーション手法の確立
本研究で最も重要となるのが、狭帯域撮像画像データから Pa α 輝線強度を導出する手法の確立であった。特に、近傍スターバースト銀河については様々な赤方偏移の天体があるが、Pa α 輝線での大気の透過率は波長によって 10%以下から 90%以上まで大きく変動し、更に大気中の可降水量(PWV)によっても時間変動するなど不定性が非常に大きいことが問題であった。そこで本研究では、狭帯域フィルタバンドの実測された大気透過率を ATRAN によるモデルシミュレーションと比較することから PWV を推定し、更に輝線プロファイルを銀河のディスク回転を仮定することによって Pa α 輝線の大気吸収率を推定する新たな手法を確立した。実際に HST/NICMOS によるデータがある 6 天体について、得られた Pa α 輝線強度を比較した所、10%以下の精度で合致することが確認でき、この手法が有効であることが立証されている。本成果は修士論文として、更に国際学会で発表済みである(館内 2011、東京大学/Tateuchi et al. 2012)。



銀河の星形成領域ごとの、ANIR から得られた Pa α 輝線強度と HST/NICMOS で得られたものの比。ばらつきはあるものの、概ね 10%以下に収まっていることが分かる。

- (6) miniTAO 望遠鏡の遠隔観測システムの構築
本研究を遂行する上で問題になるのが、miniTAO 1m 望遠鏡が設置されたチャナントール山頂の過酷な環境である。また、山頂と宿泊場所の間はオフロードで 2 時間の行程であり、この間の事故のリスクも無視できなかつた。これを解決するため、2011 年 2 月に山頂と宿泊場所近くにある山麓施設を結ぶ無線 LAN によるネットワークブリッジの構築を行った。その後半年余りをかけて観測支援機材の整備を進め、2011 年 10 月より本

格的な遠隔観測を行うことに成功した。観測支援機材の整備には、気象モニター、温度センサ、観測装置などの監視カメラ、全天気象監視カメラなどの監視装置の他、電源系統などの遠隔制御装置、KVM や VPN などのネットワーク機器、更に警告装置や制御ソフトウェアなどが含まれる。遠隔観測の実用化により、観測ラン中の作業の安全性が向上し、観測時の疲労軽減と観測効率の向上につながった。一晩あたりの観測時間は 2 割ほど増加し、更に 4 日お気に休憩日を入れる必要もなくなった。

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 15 件)

- (1) Tateuchi K., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Kato, N., Kitagawa, Y., Yoshii, Y., Doi, M., Kohno, K., Kawara, K., Tanaka, M., Miyata, T., Tanabe, T., Minezaki, T., Sako, S., Morokuma, T., Tamura, Y., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., Koshida, S., Kamizuka, T., Asano, K., Uchiyama, M. and Okada, K., "Distributions of Dusty Star Forming Region in Local Starburst Galaxies", ASP Conference Series, 査読無, 2013, in press
- (2) Iono, D., T. Saito, M. S. Yun, R. Kawabe, D. Espada, Y. Hagiwara, M. Imanishi, T. Izumi, K. Kohno, K. Motohara, K. Nakanishi, H. Sugai, K. Tateuchi, Y. Tamura, J. Ueda, and Y. Yoshii, "Active Galactic Nucleus and Extended Starbursts in a Mid-stage Merger VV114", Publication of Astronomical Society of Japan, 査読有, 2013, in press
URL:
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2013arXiv1305.4535I>
- (3) Tanabe, T., Motohara, K., Tateuchi, K., Matsunaga, N., Ita, Y., Toshikawa, K., Konishi, M., Kato, N., and Yoshii, Y., "Paschen Observations of Be Stars Toward the SMC Cluster NGC 330", 2013, Publication of Astronomical Society of Japan, 査読有, Volume 65, 2013, article ID 55
DOI: 未定
- (4) Tateuchi, K., K. Motohara, M. Konishi, H. Takahashi, N. Kato, Y. K. Uchimoto, K. Toshikawa, R. Ohsawa, Y. Kitagawa, Y. Yoshii, M. Doi, K. Kohno, K. Kawara,

- M. Tanaka, T. Miyata, T. Tanabe, T. Minezaki, S. Sako, T. Morokuma, Y. Tamura, T. Aoki, T. Soyano, K. Tarusawa, S. Koshida, T. Kamizuka, T. Nakamura, K. Asano, M. Uchiyama, K. Okada, and Y. Ita, "miniTAO/ANIR Paschen-alpha SURVEY OF LOCAL LIRGs", Publication of Korean Astronomical Society, Volume 27, 査読有, 2012, pp.297-298
DOI:10.5303/PKAS.2012.27.4.297
- (5) Komugi, S., K. Tateuchi, K. Motohara, T. Takagi, D. Iono, H. Kaneko, J. Ueda, T. R. Saitoh, N. Kato, M. Konishi, S. Koshida, T. Morokuma, H. Takahashi, T. Tanabe, and Y. Yoshii, "The Schmidt-Kennicutt Law of Matched-age Star-forming Regions: Paschen-alpha Observations of the Early-phase Interacting Galaxy Taffy I", The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 757, 2012, article ID 138
DOI:10.1088/0004-637X/757/2/138
- (6) Tateuchi, K., K. Motohara, M. Konishi, H. Takahashi, N. Kato, R. Ohsawa, K. Yutaro, Y. Yoshii, M. Doi, T. Handa, K. Kohno, K. Kawara, M. Tanaka, T. Miyata, T. Minezaki, S. Sako, T. Tanabe, T. Morokuma, Y. Tamura, T. Aoki, T. Soyano, K. Tarusawa, S. Koshida, T. Kamizuka, T. Nakamura, K. Asano, and M. Uchiyama, "Development of a new calibration method for ground-based Paschen-alpha imaging data", Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 査読無, Volume 8446, 2012, article ID 84467D
DOI:10.1117/12.924263
- (7) Motohara, K., M. Konishi, N. Mitani, S. Sako, Y. K. Uchimoto, K. Toshikawa, R. Ohsawa, T. Yamamuro, T. Minezaki, T. Tanabe, T. Miyata, S. Koshida, D. Kato, T. Nakamura, K. Asano, Y. Yoshii, M. Doi, K. Kohno, M. Tanaka, K. Kawara, T. Handa, T. Aoki, T. Soyano, K. Tarusawa, Y. Ita, and H. Umeda, "ANIR : Infrared-Optical Simultaneous Imager for miniTAO 1 m Telescope at an Altitude of 5640 m", American Institute of Physics Conference Series, 査読無, Volume 1279, 2010, pp.397-399
DOI:10.1063/1.3509324
- (8) Motohara, K., M. Konishi, K. Toshikawa, N. Mitani, S. Sako, Y. K. Uchimoto, T. Yamamuro, T. Minezaki, T. Tanabe, T. Miyata, S. Koshida, D. Kato, R. Ohsawa, T. Nakamura, K. Asano, Y. Yoshii, M. Doi, K. Kohno, M. Tanaka, K. Kawara, T. Handa, T. Aoki, T. Soyano, K. Tarusawa, Y. Ita, "First Paschen alpha imaging from the ground: the first light of Atacama Near-Infrared Camera on the miniTAO 1m telescope", Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 査読無, 7735, 2010, article ID 77353K
DOI:10.1117/12.856102
- (9) Minezaki, T., D. Kato, S. Sako, M. Konishi, S. Koshida, N. Mitani, T. Aoki, M. Doi, T. Handa, Y. Ita, K. Kawara, K. Kohno, T. Miyata, K. Motohara, T. Soyano, T. Tanabe, M. Tanaka, K. Tarusawa, Y. Yoshii, L. Bronfman, M. T. Ruiz, and M. Hamuy, "The University of Tokyo Atacama 1.0-m Telescope", Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 査読無, 7733, 2010, article ID 773356
DOI:10.1117/12.856694
- [学会発表] (計 33 件)
- (1) Tateuchi K., "Distributions of Dusty Star Forming Region in Local Starburst Galaxies", 2012/12/03-08, "New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era", Hakone, Japan
- (2) 館内 謙、「近傍高光度赤外線銀河の Pa α 輝線狭帯域撮像サーベイプロジェクト II」、2012/9/19-21, 日本天文学会秋季年会、大分大学
- (3) Tateuchi, "Development of a new calibration method for ground-based Paschen alpha imaging data", 2012/07/01-06, SPIE "Astronomical Telescopes and Instrumentation 2012", Amsterdam RAI Convention Centre, Amsterdam, Netherlands
- (4) Tateuchi, K., "Paschen Alpha Survey of Local LIRGs by using miniTAO/ANIR", 2012/06/25-29, "IAP-Subaru Joint International Conference : Stellar Populations across Cosmic Times", IAP, Paris, France
- (5) 館内 謙、「近傍高光度赤外線銀河の Pa α 輝線狭帯域撮像サーベイプロジェクト」、2012/3/19-22, 日本天文学会春季年会、龍谷大学
- (6) Takeuchi, K., "miniTAO/ANIR Paschen Alpha Survey of Local LIRGs", 2012/2/27-29, The Second AKARI

- Conference: Legacy of AKARI: A Panoramic View of the Dusty Universe, Ramada Plaza Hotel, Jeju, KOREA
- (7) 田中 培生、「近赤外線による Wolf-Rayet 星の探索：銀河中心領域クラスター」、2011/9/19-22, 日本天文学会秋季年会、鹿児島大学
 - (8) 高橋 英則、「近赤外線による Wolf-Rayet 星の探索: LMC 30 Doradus クラスター」、2011/9/19-22, 日本天文学会秋季年会、鹿児島大学
 - (9) 越田 進太郎、「miniTAO 1m 望遠鏡遠隔観測システムの構築」、2011/9/19-22, 日本天文学会秋季年会、鹿児島大学
 - (10) 館内 謙、「miniTAO/ANIR Pa α 輝線で探る初期衝突銀河-TaffyI-の星形成活動」2011/3/16-19, 日本天文学会春季年会、筑波大学
 - (11) 館内謙、「Pa α 輝線狭帯域撮像サーベイにより明かされる近傍 LIRGs の性質」、2011/3/16-19, 日本天文学会春季年会、筑波大学
 - (12) Motohara, K., "Site Characteristics Of The Summit of Co. Chajnantor at the 5640 m Altitude", 2010/12/3, Atmospheric Data from Astronomical Site Testing in Chile, Hotel Diego de Almagro, Valparaiso, Chile
 - (13) Minezaki, T., "The University of Tokyo Atacama 1.0-m Telescope", 2010/06/27-07/02, SPIE "Astronomical Telescopes and Instrumentation", Town and Country Resort and Convention Center, San Diego, California, USA
 - (14) Motohara, K., "First Paschen α imaging from the ground: the first light of Atacama Near-Infrared camera on the miniTAO 1m telescope", 2010/06/27-07/02, SPIE "Astronomical Telescopes and Instrumentation", Town and Country Resort and Convention Center, San Diego, California, USA

[その他]

ホームページ等

http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kibans/anir_en/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉井 讓 (YOSHII YUZURU)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：00158388

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

田中 培生 (TANAKA MASUO)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：70188340

川良 公明 (KAWARA KIMIYAKI)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：50292834

田辺 俊彦 (TANABE TOSHIHIKO)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：90179812

半田 利弘 (HANDA TOSHIHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：40202270

峰崎 岳夫 (MINEZAKI TAKEO)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：60292835

宮田 隆志 (MIYATA TAKASHI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：90323500

本原 顕太郎 (MOTOHARA KENTARO)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：90343102

小西 真広 (KONISHI MASAHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・特任助教

研究者番号：50532545

越田 進太郎 (KOSHIDA SHINTARO)

東京大学・大学院理学系研究科・特任研究

員

研究者番号：60548890

酒向 重行 (SAKO SHIGEYUKI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：90533563