

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540261

研究課題名(和文)大型赤外線観測装置用面分光ユニットの開発研究

研究課題名(英文)Development of an Integral Field Unit for a Near Infrared Spectrograph SWIMS

研究代表者

本原 顕太郎(Motohara, Kentaro)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90343102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：東京大学天文学教育研究センターが南米チリ・チャントール山頂に建設を進めている、東大アタカマ天文台(TAO) 6.5m赤外線望遠鏡の近赤外線多天体分光カメラSWIMSに面分光機能を付加する面分光ユニットのプロトタイプの開発を行った。その結果、14秒角×10秒角の視野を0.4秒角で26面に分割する非常に複雑な光学系を、非常にコンパクトな空間(170mm×220mm×60mm)に配置した光学系の設計を行うことに成功した。この光学系は非球面を多数含む多数の反射面を並べたものであり、その製作を超精密切削加工で行う検討を行い、実際に製造できる可能性を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：We have carried out a prototype development of an integral field unit for an infrared multi-object spectrograph SWIMS, which is being built for a 6.5m telescope of the University of Tokyo Atacama Observatory project.

An optical solution is successfully obtained, which divides the field of view of 14 arcsec x 10 arcsec into 26 slitlets with 0.4 arcsec width. The solution fits in a compact dimension of 170mm x 220mm x 60mm, which is the limit to be stored in the MOS-slit-mask storage.

To achieve the required final spot, we have to incorporate non-spherical surfaces. We then carried out a study to fabricate such surfaces using extremely-high precision machining, and confirm that such surface can be fabricated with required surface roughness.

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：赤外線天文学 面分光 観測装置 超精密加工 イメージスライサ

1. 研究開始当初の背景

近年の銀河進化研究により、 $z=1\sim 3$ が銀河の星形成進化のピークであることがわかってきた。これら個々の銀河が大規模な星形成を行うに至った物理過程を明らかにするためには、個々の銀河を分解し、その星形成活動の空間分布や速度構造を調べる必要がある。遠方で分解が難しいことと、赤方偏移のため静止波長可視を近赤外にくることから観測は困難であるが、近年 VLT や Keck に取り付けられた近赤外線面分光装置 (SINFONI, OSIRIS) による近赤外線面分光サーベイが始まり、その様子的一端が明らかになりつつある。しかしながら、観測数は限られているのに対して様々なパラメータ空間(赤方偏移、環境：フィールドか銀河団か、など)が大量に残されており、近赤外面分光の需要は今後も増大すると予想される。しかしながら日本国内の面分光装置開発およびそのための要素技術開発の現状は、すでに多天体化が始まっている欧州に比べ、まだ発展途上にある。特に近赤外域のイメージスライサー型面分光ユニット (IFU) は様々な装置でも採用され、今後近赤外観測装置の標準的な観測モードになるのは間違いないのにも関わらず、国内での開発は可視域と中間赤外波長域で始まったところであった (Ozaki 2012, Kataza 2010)。

2. 研究の目的

東京大学天文学教育研究センターが現在進めている、南米チリ・アタカマ高地にある標高 5640m のチャナントール山頂に 6.5m 赤外線望遠鏡を設置する東大アタカマ天文台 (TAO) 計画の、近赤外線多天体分光カメラ SWIMS (Simultaneous-band Wide-Field Multi-object Spectrograph, PI: 本原顕太郎) に面分光機能を付加する面分光ユニットのプロトタイプの開発を行うことが目的である。

3. 研究の方法

Gemini 望遠鏡の GNIRS を参考に、SWIMS (図 1) の MOS ユニットに収納可能なサイズ (170mm×220mm、総重量は 0.7kg 以下) の面分光ユニットの開発を最終目的とする。具体的には、光学系の設計を行うと同時に、光学素子の制作方法の検討を行い、また、それと平行して IFU による観測対象の選定も進める。

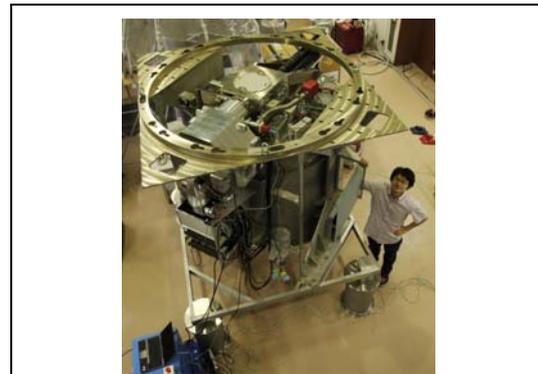


図 1 : TAO6.5m 望遠鏡用近赤外線カメラ分光器 SWIMS

4. 研究成果

SWIMS 焦点面に挿入することにより面分光機能を付加する面分光ユニット光学系の設計を行った。光学系の方式としては、焦点面に挿入することで面分光を実現できる、望遠鏡焦点面を短冊状に分割するイメージスライサを採用した。望遠鏡から入射した光は、まず拡大光学系で拡大され、焦点面におかれた短冊状のスライサミラー (図 2 : Slice mirror) で視野分割される。分割された光線は、瞳ミラー (Pupil mirror) により観測装置の焦点位置に一本のスリット上に再結像され、スリットミラー (Slit mirror) で観測装置に導入される。このユニットは、SWIMS の多天体分光マスク交換機構 (MOSU) 内に収納し、交換可能である必要が有るため、非常に厳しいサイズ制限 (170mm×220mm×60mm) が存在するが、最終的に軸外し非球面を導入することによって最終スポットが 0.3" 以下の結像性能を持ち、視野 14"×10.4" を幅 0.4" の 26 スライスに分割し、SWIMS 焦点面に一列のスリットとして再構成する光学解を得ることに成功した。

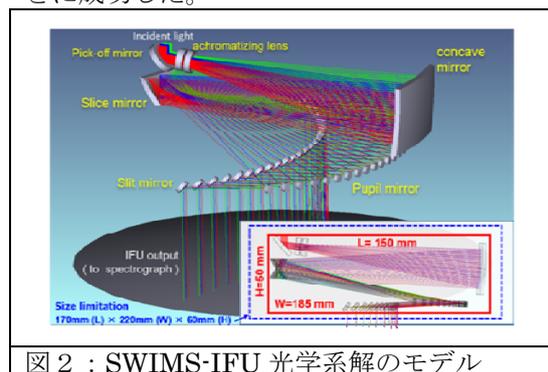


図 2 : SWIMS-IFU 光学系解のモデル

IFU 光学系は多数の微小 (数 mm 角) なミラーを多数並べ、それを高い精度で整列する必要がある。また、可視 IFU と違い、液体窒素温度付近まで冷却する必要が有るため、鏡面や構造体をすべて単一の材料で制作する必要がある。そこで、我々は鏡面を構造材と同じアルミニウム合金で制作することとし、その製造の検討を進めた。

具体的には超精密切削加工を用いる。まず、

一辺 20mm 角の球面鏡の試作を行った。表面精度を出すため、アルミ鏡材の表面に Ni-P メッキを施したものに加工したところ、面形状は 30nm 程度で十分な性能を持っていた。

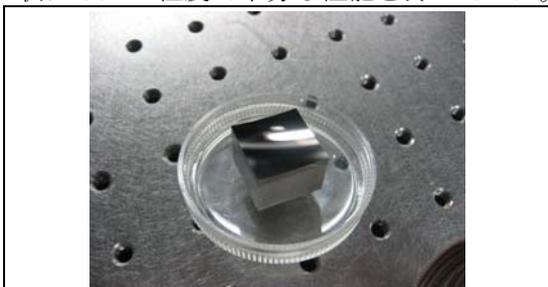


図 3：切削加工で試作した球面鏡。

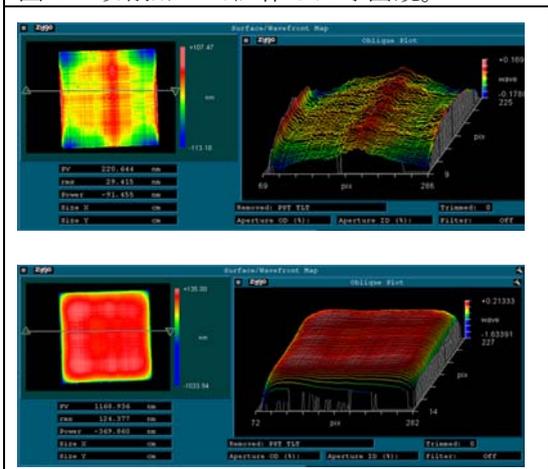


図 4：切削加工ミラーの干渉計による形状測定結果。上が常温時、下が 77K の冷却時。

また、表面粗さは 4nmRMS 程度となり、要求仕様である 5nm を容易に達成できることが確認できた。しかしながら、77K まで冷却した所、面形状精度が 120nmRMS を超え、大幅に悪化することが明らかになった。これは面表面の Ni-P メッキによるバイメタル効果によるものであると考えられ、冷却環境下での使用時には Ni-P メッキ層を大幅に薄くするか、メッキなしで加工する必要があることが明らかになった。

また、実際のスライスミラーの製作についても検討を行った。スライスミラーのダミー(幅 0.5mm, 長さ 10mm の面が角度を 0.1604 度ずらしながら 3 枚重なったもの)をアルミ合金から超精密切削加工で切り出す試験を行った。こちらは表面にメッキ加工はしていない。結果、形状については要求仕様内で、面粗さについても 7nm RMS が達成され、要求仕様 5nm RMS には少し及ばないものの実用的な鏡面をアルミ母材からの切削加工のみで製造することが可能であることを実証した。これらの結果は国内外の学会で発表するとともに、Proceedings として公表されている。



図 5：切削加工によるイメージスライサの試作品。

以上の結果より、あとは光学素子を実際に製作しそれを組み上げることによって SWIMS に IFU 機能が実際に付加できることが示された。

また、この IFU を SWIMS に搭載したサイエンスケースの検討を進めた。特に、TAO 望遠鏡での観測の際には近赤外線 1.8751 μ m の Pa α 輝線観測が重要な観測ターゲットになることから、miniTAO 1.0m 望遠鏡/近赤外線カメラ ANIR による Pa α 輝線の狭帯域フィルタ撮像観測を行い、その結果から、近傍星形成銀河の性質を探る研究を行った。その結果、近傍のスターバースト銀河においてはバルジの形状(Pesudo バルジか Classical バルジか)によって星形成領域の形状が異なることが初めて明らかになり、バルジ形成に重要な示唆を得ることができた(Tateuchi et al. 2012)。また、衝突中の星形成銀河では Pa α から得られた星形成率と分子ガスの面密度がこれまで知られていたよりも非常に強い相関を示すことが明らかになり、星形成領域の Schmidt-Kennicutt 則で見られる大きなばらつきは、星形成段階の違いによるものであるという強い示唆を得ることができた(Komugi et al. 2012)。これらの結果は国内外の学会で発表するとともに、2本の査読論文として出版された。

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 6 件)

1. “Distributions of Dusty Star Forming Region in Local Starburst Galaxies”, Tateuchi, K., K. Motohara, M. Konishi, H. Takahashi, N. Kato, 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, K. Asano, M. Uchiyama, and K. Okada, ASP Conference Series 476, 301 (2013) 査読無
2. “The Schmidt-Kennicutt Law of

Matched-Age Star Forming Regions", Komugi, S., K. Tateuchi, K. Motohara, T. Takagi, D. Iono, H. Kaneko, J. Ueda, T. R. Saitoh, and miniTAO Team, Proceedings of the International Astronomical Union 292, 331 (2013) 査読無

3. "miniTAO/ANIR Pa- α SURVEY OF LOCAL LIRGs", 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, Publications of The Korean Astronomical Society 27, 297-298 (2012) 査読有
4. "The Schmidt-Kennicutt Law of Matched-Age Star Forming Regions: Pa- α Observations of the Early-Phase Interacting Galaxy Taffy I", 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, Astrophysical Journal 757, 138 (2012) 査読有
5. "Development of an integral field unit for a near-infrared multi-object imaging spectrograph SWIMS", Ozaki, S., Y. Kitagawa, K. Motohara, M. Konishi, H. Takahashi, T. Yoshikawa, K. Tateuchi, and N. Kato, Proceedings of SPIE 8450, 84503Y (2012) 査読無
6. "Design and development of SWIMS: a near-infrared multi-object spectrograph for the University of Tokyo Atacama Observatory", Konishi, M., K. Motohara, H. Takahashi, K. Tateuchi, Y. Kitagawa, N. Kato, T. Aoki, M. Doi, T. Handa, T. Kamizuka, K. Kawara, K. Kohno, S. Koshida, T. Minezaki, T. Miyata, T. Morokuma, S. Sako, T. Soyano, Y. Tamura, T. Tanabe, M. Tanaka, K. Tarusawa, and Y. Yoshii, Proceedings of SPIE 8446, 84467P (2012)

[学会発表] (計 13 件)

1. 北川祐太郎, 尾崎忍夫, 本原頭太郎, 小西真広, 他、「近赤外多天体分光カメラ SWIMS における面分光ユニットの開発 II」、日本天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学、2014/3/19~22
2. 北川祐太郎, 尾崎忍夫, 本原頭太郎, 小

西真広, 他、「近赤外多天体分光カメラ SWIMS における面分光ユニットの開発」、日本天文学会 2013 年秋季年会、東北大学、2013/9/10~12

3. 館内謙, 本原頭太郎, 小西真広, 高橋英則, 他、「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 III」、日本天文学会 2013 年秋季年会、東北大学、2013/9/10~12
4. 館内謙, 本原頭太郎, 小西真広, 高橋英則, 他、「近傍高光度赤外線銀河におけるバルジの構造と星形成活動の関係」、日本天文学会 2013 年秋季年会、東北大学、2013/9/10~12
5. Tateuchi, K., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., et al., "Distributions of Dusty Star Forming Region in Local Starburst Galaxies", "New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory", Hakone, Japan, 2012/12/3~8
6. 館内謙, 本原頭太郎, 小西真広, 高橋英則, 他、「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」、日本天文学会 2012 年秋季年会、大分大学、2012/9/19~21
7. Konishi, M., Motohara, K., Takahashi, H., Tateuchi, et al., "Design and development of SWIMS: a near-infrared multi-object spectrograph for the University of Tokyo Atacama Observatory", SPIE "Astronomical Telescopes and Instrumentation 2012", Amsterdam RAI Convention Centre, Amsterdam, Netherlands, 2012/7/1~6
8. Ozaki, S., Kitagawa, Y., Motohara, K., Konishi, M., et al., "Development of an integral field unit for a near-infrared multi-object imaging spectrograph SWIMS", SPIE "Astronomical Telescopes and Instrumentation 2012", Amsterdam RAI Convention Centre, Amsterdam, Netherlands, 2012/7/1~6
9. Tateuchi, K., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., et al., "Paschen Alpha Survey of Local LIRGs by using mini-TAO/ANIR", "IAP-Subaru Joint International Conference Stellar Populations across Cosmic Times", IAP, Paris, France, 2012/6/25~29
10. 館内謙, 本原頭太郎, 小西真広, 高橋英則, 他、「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」、日本天文学会 2012 年春季年会、龍谷大学、2012/3/19~22
11. 小麥真也, 館内謙, 本原頭太郎, 小西真広, 他、「衝突銀河 TaffyI における分子ガスと星形成」、日本天文学会 2012 年春

季年会、龍谷大学、2012/3/19~22

12. Tateuchi, K., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., et al., “miniTAO/ANIR Paschen Alpha Survey of Local LIRGs”, “The Second AKARI Conference: Legacy of AKARI: A Panoramic View of the Dusty Universe”, Ramada Plaza Hotel, Jeju, Korea, 2012/2/27~29,
13. 館内謙、本原顕太郎、小麦真也、伊王野大介、金子紘之、植田準子、小西真広、他、「miniTAO/ANIR Pa α 輝線で探る初期衝突銀河-TaffyI-の星形成活動」、日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学、2011/9/19~22

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本原 顕太郎 (Motohara, Kentaro)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：90343102

(2) 連携研究者

尾崎 忍夫 (Ozaki, Shinobu)
国立天文台・先端技術センター・研究員
研究者番号：60532710

(3) 連携研究者

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