

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06000

研究課題名(和文) 高解像度近赤外線多天体分光で探る銀河形成におけるフィードバック過程

研究課題名(英文) Probing the feedback process in galaxy formation with novel high-resolution near-infrared multi-object spectroscopy

研究代表者

美濃和 陽典 (Minowa, Yosuke)

国立天文台・ハワイ観測所・准教授

研究者番号：60450194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、星形成銀河を空間分解し、銀河内部の星形成領域からのアウトフローを検出する事で、ガスの流出量を見積もり、星形成活動におけるフィードバック過程について制限を与える事を目指し、すばる望遠鏡の補償光学装置、及び近赤外線分光装置と共に用いる多天体スリットモジュールの開発を行った。多天体スリットモジュールは、デジタルマイクロミラーデバイスを用いて、任意の星形成銀河について、内部の星形成領域の位置に合わせてスリット形状を作るものである。本研究では、多天体スリットモジュールの製作を完了し、実験室において、銀河内部の星形成に伴うアウトフローを検出するのに十分な結像性能を有している事を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、デジタルマイクロミラーデバイス(DMD)を用いた新しいコンセプトの多天体分光を行うための装置開発を行い、これまでの観測に比べて高い効率での観測を可能にした。今後は、本研究で開発した装置を用いた観測研究を進めると共に、装置をすばる望遠鏡の持ち込み装置として広くコミュニティに公開する。本研究で用いたDMDは、天文学研究の用途としてはまだほとんど使われていないが、従来の多天体分光器で用いられてきた可換型スリットに比べて、格段に安価でコンパクトであるため、将来の広視野多天体分光装置への応用が期待されている。本研究で得られた知見は、このような将来の大型装置の開発で応用する事ができるであろう。

研究成果の概要(英文)：This research is aiming to reveal the role of the feedback process due to star formation in galaxy formation. To detect outflowing gas from the star-forming clumps in star-forming galaxies, we developed a novel multi-object slit module to install in between an adaptive optics system and a near-infrared spectrograph on board the Subaru telescope. By using a commercial digital micro-mirror device, the multi-object slit module is able to configure the slits at any location where the star-forming galaxies are located and acquire spectra from multiple objects simultaneously. It can also configure the slits at the several locations in the galaxies to acquire the spectra from the star-forming clumps. In this research, we have fabricated, assembled, and tested the multi-object slit module in a laboratory, and confirmed that the performance of the slit module is enough to detect the outflow from the star-forming clumps inside the star-forming galaxies.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：銀河形成 銀河進化 光赤外線天文学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙における銀河進化の歴史の中で、今から約 100 億年前 (赤方偏移 ~ 2) は、宇宙全体において星形成活動が最も活発に行われた時期であり、この時期に進化が最も激しく進んだと考えられている。これまでの観測により、この時期には、星形成を激しく行っている青いディスク状の銀河 (星形成銀河) と、星形成が終了し古い恒星種族からなる赤いコンパクトな銀河 (受動的銀河) の 2 つのタイプの銀河がいる事が分かっている。星形成銀河については、星形成活動を行うのに必要なガスが多く含まれているものが観測されており、その多くで星形成が活発なクランプ状の構造がある事が明らかにされている。一方で、受動的銀河については、近傍の楕円銀河に似た形状を持っているが、そのサイズは 1kpc 程度であり、同じ質量の近傍銀河に比べて 1 桁程度小さく、星密度が非常に高いことが観測的に明らかになっている。これらの銀河の進化の系列としては、青い星形成銀河が星形成を終了し、赤いコンパクトな受動的銀河になったと考えられるが、その過程はまだ明らかにされていない。この進化シナリオの中で、遠方銀河のガスを多く含む星形成銀河が、内部のガスを消費し、星形成を止める過程が重要な鍵を握ると考えられている。先行研究では、星形成銀河内部のクランプからのアウトフローを検出し、それにより星形成活動が抑制されるというフィードバック過程が明らかにされた^[1]。しかし、このような観測は巨大な星形成銀河 (星質量 $>10^{10}$ 太陽質量) での幾つかの例に限られており、銀河形成のシナリオの中で、どの様な質量の銀河が、星形成活動を抑制するフィードバック過程がどの程度効いているのか統一的に明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、銀河内部の星形成活動に伴うアウトフローに着目し、星形成銀河におけるガス流出量を見積もる事で、銀河進化の過程の中で、自身の星形成活動を抑制するかを明らかにする事を目的としている。我々は、星形成銀河の形成、進化が、銀河の質量、また銀河の存在する環境によってどの様に変化するかを観測的に明らかにするべく、すばる望遠鏡の近赤外線装置 MOIRCS による星形成銀河の大規模サーベイ観測で得られた赤方偏移 ~ 2 の星形成銀河のサンプルを、すばる望遠鏡のレーザーガイド補償光学システム AO188 と近赤外線装置 IRCS を用いて、ハッブル宇宙望遠鏡に匹敵する 0.2 秒角の解像度での観測を行った。この観測では、星形成領域の電離ガスから出る水素のバルマー系列の $H\alpha$ 輝線 (静止系波長 6,563 Å) に着目し、赤方偏移した $H\alpha$ 輝線 ($\sim 2.0 \mu\text{m}$) に合わせた狭帯域フィルターを使った撮像観測により、銀河内部の星形成領域と、恒星種族を分離し、銀河内部の星形成領域の分布とその質量、環境依存性を明らかにした^[2]。本研究では、これまでの狭帯域撮像による観測を発展させ、星形成銀河を高解像度で分光する事で、銀河内部の星形成領域からのアウトフローの有無を検証し、星形成におけるフィードバック過程の質量、周辺環境による依存性を明らかにするべく、すばる望遠鏡の AO188+IRCS を用いて、銀河内部の星形成領域に合わせた複数のスリットで分光観測を実現する「多天体スリットモジュール」の開発を行った。

3. 研究の方法

本研究により開発を行った「多天体スリットモジュール」は、市販のデジタルマイクロミラーデバイス (DMD) を用いた新しいコンセプトのスリット分光を実現する (図 1)。このスリットモジュールの特徴は、焦点面のマイクロミラーの傾きを任意に変える事で、スリット幅、スリット位置を視野内で自在に変えることができることである。この特徴により、観測天体に合わせてスリットを任意に変更できるだけでなく、星形成銀河内部を複数の場所に分けたスリット分光を行うことができる。これまでの星形成銀河の高解像度の分光観測は、1 天体毎の面分光に頼っていたが、本研究で提案する新しいコンセプトの多天体スリットモジュールと、高解像度を実現する補償光学 (AO188) を組み合わせることで、複数天体、複数星形成領域が同時に観測できるようになり、大幅な観測効率の向上が期待できる。

本研究の当初の目的は、多天体スリットモジュールにより、赤方偏移 ~ 2 の星形成銀河からの $H\alpha$ 輝線を観測する事であったため、多天体スリットモジュールを冷却する事で、装置自身からの熱放射を減らす設計を考えていた。しかし、申請した予算が減額されて採択されたため、限られた予算内で冷却光学系を実現できず、将来的に冷却光学系に変更できる可能性を残した上で、非冷却で装置を製作する事とした。それに合わせ、当初想定していた観測対象を、遠方の星形成銀河 (赤方偏移 ~ 2) の $H\alpha$ 輝線から、近傍の星形成銀河 (赤方偏移 ~ 0.1) からの水素のパッシェン系列の $Pa\alpha$ 輝線 (静止形波長 $\sim 1.875 \mu\text{m}$) とし、装置自身からの熱放射の影響の少ない波長

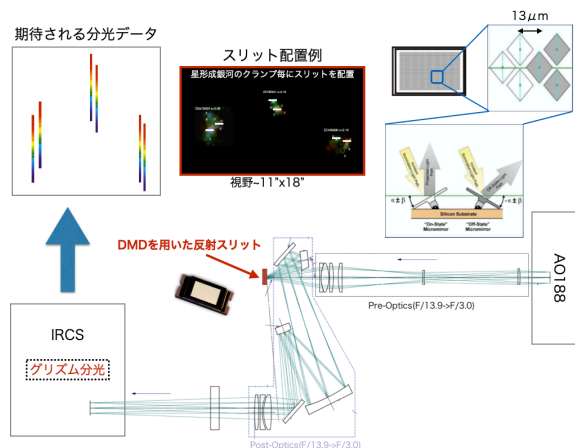


図 1: 補償光学系 (AO188) と近赤外線分光装置 (IRCS) の間に搭載する、DMD を用いた多天体スリットモジュールと、それにより得られる星形成銀河のスペクトルの模式図。

域で高解像度の観測を行うこととした。図2に、Pa α に強い輝線を示す近傍の星形成銀河の例を示す。

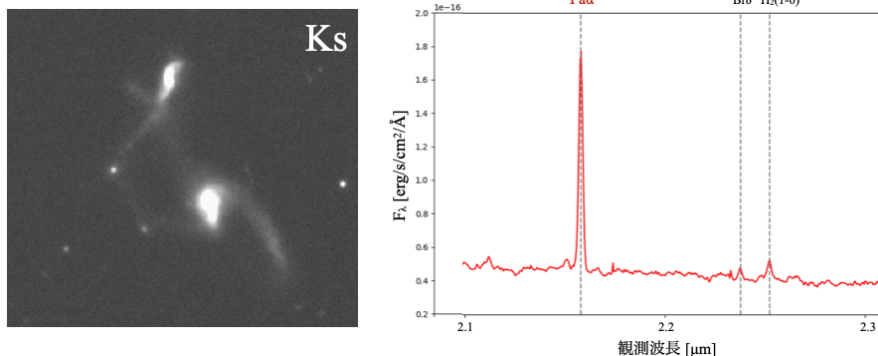


図2：すばる望遠鏡に搭載された近赤外線撮像分光装置 SWIMS により取得された赤方偏移 ~ 0.1 の星形成銀河と、そのPa α 輝線の分光データ (Kushibiki et al. 2020 in prep.)。

4. 研究成果

本研究により製作した多天体スリットモジュールの光学系、機械系の設計の概要を図3に示す。多天体スリットモジュールは、すばる望遠鏡の赤外ナミス焦点にあるA0188とIRCSの間に、A0188の試験用カメラのプラットフォームを用いて搭載され、補償光学により大気揺らぎの補正がされた後の光線のうち、視野の一部をスリット形状に切り出し、後段のIRCSへと送る。スリット形状に切り出すデバイスとしては、Texas InstrumentsのデジタルマイクロミラーデバイスDLP7000BFLPを用い、そのコントローラーとしてはViALUX V-7000 Controller boardを用いた。多天体スリットモジュールがカバーする視野は、IRCSの高解像度モードに相当する20x20平方秒角とした。カバーする波長範囲は非冷却で装置自身の熱放射の影響の少ない1.0-2.0 μm としたが、将来的に冷却化で使用し波長範囲を2.5 μm まで拡張する事を考慮し、光学系の最適化は1.0-2.5 μm の範囲で行った。それに伴い、DLP7000のウィンドウガラスをボロシリケートガラス(Corning 7056)から、フッ化カルシウムに交換した^[3]。多天体スリットモジュールでは、望遠鏡からA0188を経由して届く光を、DLP7000上に結像し、視野をスリット形状に切り取る。しかし、DLP7000で用いられているマイクロミラーのピッチは13.7 μm と非常に細かく、A0188から射出される光(F/13.9)の焦点部にDLP7000を置いた場合、点像分布関数(PSF、波長2.0 μm で約30 μm)よりもマイクロミラーの方が小さくなり、マイクロミラーの回折により像がボケてしまう現象が起きる。このため、多天体スリットモジュールでは、前置光学系でF変換を行い、F/3.5程度まで落とす事で、PSFのサイズをマイクロミラーよりも小さくし、回折の影響を避ける設計とした。DLP7000によりスリット形状に切り取られた光は、後置光学系により、F比を13.9に戻し、後段のIRCS内に再結像する。後置光学系としては、軸外し非球面鏡を用いたTMA(Three Mirror Anastigmat)光学系と3枚構成のレンズにより、F変換とIRCSへの結像位置の調整を同時に行なっている。

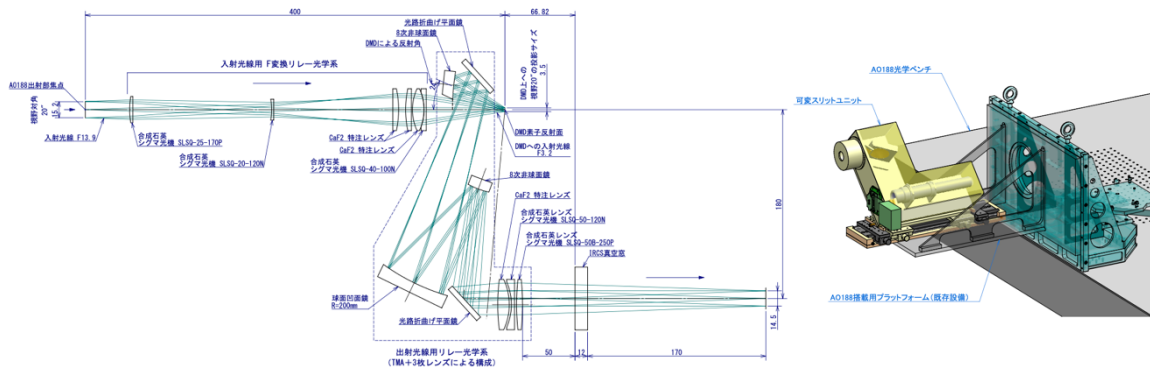


図3：多天体スリットモジュールの光路図(左)と、A0188に搭載された状態の機械系概要(右)

多天体スリットモジュールは、2018年度末に製作を完了し、光学性能の試験を行った。その結果、前置光学系、後置光学系ともに、単体では設計通りの良好な結像性能を示す事を確認した。図4に、多天体スリットモジュールの組み上げ完成図と、前置光学系、後置光学系の結像性能を示す。DLP7000を含めた全体を通した結像性能については、想定よりも悪く、非点収差が残っている事が確認された。この収差は、DLP7000の交換したウィンドウガラスの厚みが、想定よりも厚い事に起因しており、TMA光学系の配置を変更する事で残収差を取り除く事ができる事がわかった。そのため、2019年度の中頃に、TMA光学系に改修を加え、再度性能評価を行ったところ、想定通りの光学性能が達成できている事を確認した。図5に改修後の多天体モジュールの結像性能と、実際に得られたDLP7000のマイクロミラー像を示す。

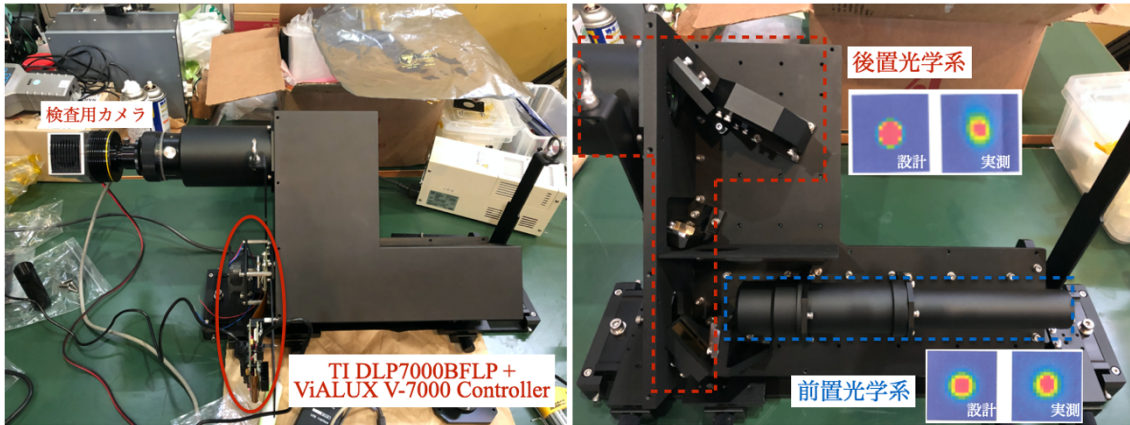


図 4: 多天体モジュールの完成図。検査用カメラにより、前置光学系、後置光学系それぞれの結像性能を検査し、設計値と遜色ない事を確認した。

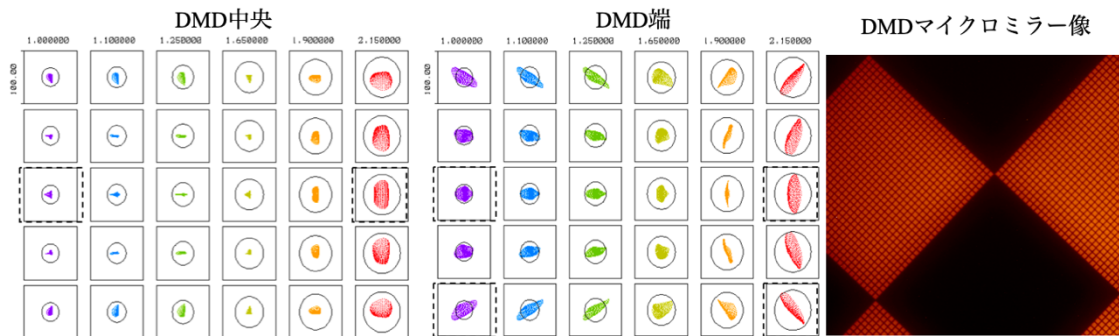


図 5: DMD (TI DLP7000) を含む多天体モジュール全体を通した結像性能 (TMA 配置改修後) と、検査カメラにより取得した DMD マイクロミラー像。DMD 全体 (視野全体) において、各波長のエアリーディスク (黒丸) を下回る結像性能を達成しており、実際の光学性能検査においても、視野全体にわたりボケのない良好な結像性能を得た。

多天体スリットモジュールは、すばる望遠鏡に搭載するべく、国立天文台ハワイ観測所に輸送され、実験室において再度性能評価を行った後、A0188 への搭載に向けて待機している状態である。今後、A0188 に多天体スリットモジュールを搭載し、人工光源による性能評価、及び近傍星形成銀河からの $\text{Pa}\alpha$ 輝線を用いた試験観測を行う予定である。また、試験観測により性能が確認された後、すばる望遠鏡の持ち込み装置の一つとして、広くコミュニティに公開し、公募観測により、星形成領域からのアウトフロー検出による、銀河形成におけるフィードバック過程の研究を進める。

<引用文献>

- [1] Genzel, R., Newman, S., Jones, T., et al., “The Sins Survey of $z \sim 2$ Galaxy Kinematics: Properties of the Giant Star-forming Clumps”, The Astrophysical Journal, Volume 733, Issue 2, article id. 101, 30 pp. (2011)
- [2] Suzuki, T., Minowa, Y., Koyama, Y. et al., “Extended star-forming regions within galaxies in a dense proto-cluster core at $z = 2.53$ ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 71, Issue 4, id.69 (2019)
- [3] Barkhouser, R., Robberto, M., Smee, S., et al., “The optical design of GMOX: a next-generation instrument concept for Gemini”, Proceedings of the SPIE, Volume 9908, id. 990852 17 pp. (2016).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Rigaut Francois, Minowa Yosuke, Akiyama Masayuki et al.	4. 巻 10703
2. 論文標題 A conceptual design study for Subaru ULTIMATE GLAO	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1070324 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2314085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Suzuki Tomoko L., Kodama Tadayuki, Onodera Masato, Shimakawa Rhythm, Hayashi Masao, Tadaki Ken-ichi, Koyama Yusei, Tanaka Ichi, Sobral David, Smail Ian, Best Philip N., Khostovan Ali A., Minowa Yosuke, Yamamoto Moegi	4. 巻 849
2. 論文標題 The Interstellar Medium in [O iii]-selected Star-forming Galaxies at $z \sim 3.2$	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 39 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8df3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Suzuki T. L., Kodama T., Sobral D., Khostovan A. A., Hayashi M., Shimakawa R., Koyama Y., Tadaki K.-i., Tanaka I., Minowa Y., Yamamoto M., Smail I., Best P. N.	4. 巻 462
2. 論文標題 [Oiii] emission line as a tracer of star-forming galaxies at high redshifts: comparison between H and [Oiii] emitters at $z=2.23$ in HiZELS	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 181 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stw1655	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 美濃和 陽典
2. 発表標題 Subaru/IRCS+A0188で分解する z 2のフィールド銀河の星形成領域
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 美濃和陽典
2. 発表標題 すばる観測装置の現況 + IRCS用多天体分光モジュールの開発
3. 学会等名 第6回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小山 佑世 (Koyama Yusei)		
研究協力者	高遠 徳尚 (Takato Naruhisa)		