

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400236

研究課題名(和文) 大型望遠鏡によるLy 輝線ガス雲の面分光観測から探る銀河形成進化

研究課題名(英文) Investigation on galaxy evolution based on an integral field spectroscopy of Ly\_alpha blobs using a large telescope

研究代表者

尾崎 忍夫(Ozaki, Shinobu)

国立天文台・TMT推進室・特任研究員

研究者番号：60532710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：銀河の形成進化過程において、銀河とその周囲のガスダイナミクスは星形成活動の維持や抑制に大きな役割を果たしていると考えられている。近年、すばる望遠鏡によるサーベイ観測で複数見つかった銀河形成の最も盛んであった時代の広がったガス雲は、銀河形成期のガスダイナミクスの研究に適した天体であると考えられている。本研究では、これらガス雲の詳細研究を推進させるために、すばる望遠鏡で稼働中の可視光撮像分光装置FOCASを用いて広がった天体の観測に適した面分光を可能にする面分光ユニットの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Gas dynamics in and around a galaxy plays an important role for galaxy evolution by supporting or suppressing star formation activities. Recently, many extended gas clouds have been discovered around the peak epoch of galaxy formation from survey observations using the Subaru telescope, and are expected to be suitable objects for investigations on gas dynamics in the galaxy evolution phase. In this study, we have developed an integral field unit enabling the existing optical spectrograph FOCAS to conduct an integral field spectroscopy which is a suitable observe method for extended objects.

研究分野：銀河天文学、装置開発

キーワード：光赤外線天文学 面分光 銀河進化 活動銀河中心核 すばる望遠鏡 次世代超巨大望遠鏡 Thirty Meter Telescope

### 1. 研究開始当初の背景

銀河形成進化の研究において、形成期にある銀河のガスダイナミクスを観測的に明らかにすることは本質的に重要である。最近の理論研究によると形成期の銀河で見られる活発な星形成活動は、従来考えられていた小さな銀河同士の合体衝突よりも、周囲を取り囲む暗黒物質の大規模構造に沿った継続的なガスのインフローで維持されていると考えられはじめている (Dekel et al. 2009, Nature, 457, 451)。一方で、激しい星形成活動による同時多発的な超新星爆発や大質量星からの強烈な輻射により、銀河内のガスが吹き飛ばされ星形成活動を抑制するという理論予想もある (Murray et al., 2005, ApJ, 618, 569)。またガスが銀河中心ブラックホールへ落ち込む際に開放する莫大なエネルギー放出現象 (活動銀河中心核; AGN) も大規模なガスアウトフローを引き起こし、その後の銀河進化やブラックホールの成長を抑制するという研究もある (銀河/AGN 共進化論) (Di Matteo et al., 2005, Nature, 433, 604)。このようにガスダイナミクスは銀河進化に密接にかかわっており、その観測的研究により銀河進化の理解が深まると期待できる。

### 2. 研究の目的

銀河形成進化が最も盛んであった赤方偏移 2-3(100-120 億年前) の時代に、形成期の銀河とその周囲のガスダイナミクスを観測するのに適した天体がすばる望遠鏡を用いた観測で複数見つかって来ている (図 1; Matsuda et al, 2011, MNRAS, 410, L13)。この天体は水素の Ly 輝線で大きな広がりを持つことから Ly 輝線ガス雲と呼ばれている。このような広がりを持った天体には面を一度の露出で分光できる面分光観測が最適である。インフローやアウトフローは非等方的に広がっていると考えられているが、スリット分光ではスリットを当てた一部の情報しか得られないために、このような現象を見逃す可能性がある。しかし、面分光を用いれば Ly 輝線ガス雲の全体構造を把握することができる。本研究の目的はすばる望遠鏡で稼働中の可視光撮像分光装置 FOCAS に

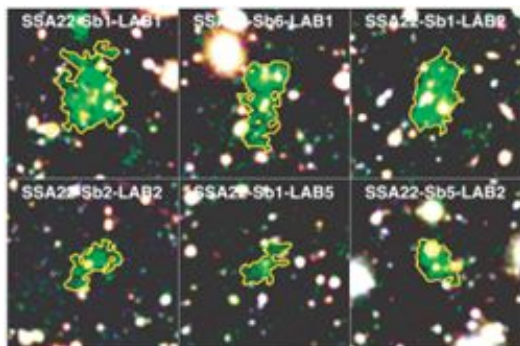


図 1 すばる望遠鏡で見つかった Ly 輝線天体 (Matsuda et al, 2011)。各イメージのサイズは 40 x 40 arcsec<sup>2</sup> である。

面分光機能を付加するための面分光ユニットを開発し、形成期銀河のガスダイナミクス観測に基づく銀河形成進化の研究を行うことである。

さらにこの開発は、次世代超巨大望遠鏡 Thirty Meter Telescope (TMT) に搭載予定の可視光撮像分光装置 Wide Field Spectrograph (WFOS) に組み込み可能な面分光ユニット開発の実証試験も兼ねており、面分光ユニット開発技術の確立も大きな目的の一つである。

### 3. 研究の方法

本研究ではイメージスライサー型面分光ユニットを採用することにした。他のレンズレットアレイ型やファイバーバンドル型に比べて、イメージスライサー型は一度の露出で得られる情報量が多いので、広い視野あるいは広い波長範囲を一度の露出でカバーできるのが特徴である。また既に稼働中の FOCAS を利用し、なおかつ FOCAS を改造することなく面分光ユニットを組み込むので、短期間・低コストで面分光機能を得られる。

図 2 が FOCAS 用面分光ユニットの概念図である。望遠鏡からの光はピックアップミラーで 90 度折り曲げられ、拡大光学系によりイメージが拡大される。細長いスリット状のミラーが並んだ光学素子 (スライサー) によりイメージが分割され、対応する瞳ミラーとスリットミラーによって一列に並び替えられたあと、FOCAS へと光が導かれ、分光される。表 1 に FOCAS 用面分光ユニットの装置パラメータを示した。

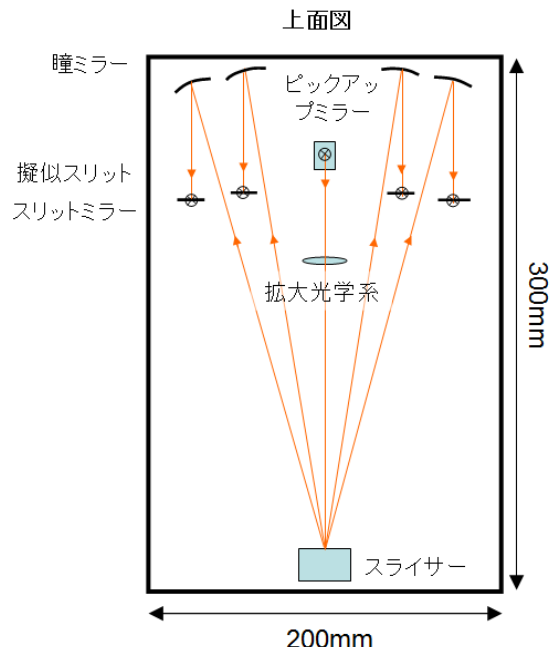


図 2 FOCAS 用面分光ユニットの概念図。望遠鏡からの光は紙面上方からピックアップミラーに当たり、90 度折り曲げられる。スリットミラーでは紙面下方に光が折り曲げられ、FOCAS へと光が導かれる。

**表1 FOCAS 用面分光ユニットのパラメータ**

視野	13.5 × 9.89 arcsec <sup>2</sup>
スライス幅	0.43 arcsec
スライス数	23

この面分光ユニットは暗い Ly 輝線ガス雲の観測を考慮して以下のような特徴を持たせている。

- 反射面に高反射率誘電体多層膜ミラーを採用することで高いスループット(面分光ユニット単体で 80%以上)を持つ。
- Ly 輝線ガス雲の典型的サイズ 10 arcsec 程度を一度の露出でカバーできる。
- 光を多く取り込むために空間サンプリングを少し粗く(0.4 arcsec)している。(ハワイでのベストシーイング程度なので、これでも空間構造の議論は可能である。)
- スカイスpekトルを対象天体と同時に取得することができる。これにより精度良くスカイ引きを行うことができるので、暗い天体の分光に有利になる。

#### 4. 研究成果

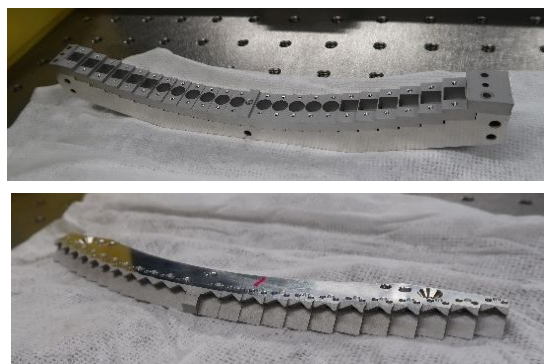
本研究においてスライサー型面分光ユニットの開発技術を確立できたことが大きな成果である。以下に詳細を記載する。

本研究期間前に光学設計を終えていたが、分散素子の効率の波長依存性を考慮して、Ly 輝線ガス雲を最も効率良く観測できるように調整した。

一部のミラーで軸外し放物面を用いなければ収差を抑えきれない。そのミラーは約 6mm と小さなものであるため、その製作は技術的困難を伴うと予想された。そこで試作を行い、加工工程を確立させた。また試作した軸外し楕円面ミラーを光学的に検査したところ、期待通りの結像性能を示すことも確認した。

イメージスライサー型面分光ユニットは非常に多くの小さなミラーを持つため、それらのアライメント方法が技術課題となる。FOCAS 用面分光ユニットの場合、スライサー部、瞳ミラー部、スリットミラー部はそれぞれ 2-3 個の小さなミラーからなっている。スライサー部の組立では組立治具を精度良く製作することで、2-3 個のスライスミラーの相対位置精度を確保するようにした。また、瞳ミラー部とスリットミラー部はミラーホルダーを精度良く製作し、そのホルダーにミラーを入れるだけで、相対位置精度を確保できるようにした。試作の結果、このような方針で要求相対位置精度を満たせることを確認した。

高反射率誘電体多層膜ミラーは高い反射率を実現するために非常に多くの誘電体膜を積層させている。その場合、多層膜の張力のために反射面形状が歪む可能性がある。厚さと表面サイズが異なる複数のガラス基板



**図3 完成した瞳ミラーホルダー(上)とスリットミラーホルダー(下)**



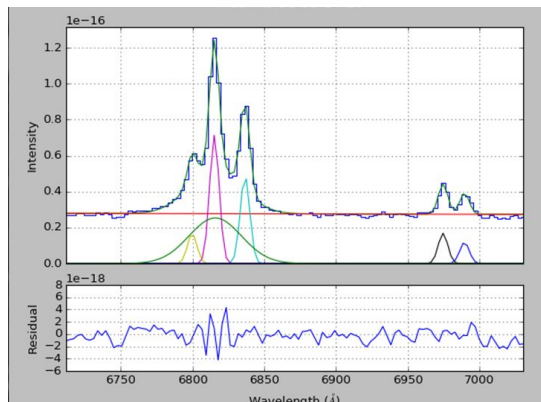
**図4 光学素子ホルダーと筐体**

に高反射率誘電体多層膜を施し、面形状変化を測定することで、面形状変化を抑えるための表面サイズと厚さの関係を求めた。これを基に、使用される各ミラーのサイズから必要な厚さを求めた。

スライスミラーの製作においては、本研究期間開始前に行った試作経験を基に、製作工程の見直しを行うことにより、製作精度を上げることに成功した。

光学素子と光学素子ホルダー・筐体(図3, 4)は既に完成している。仮組みを行い、FOCAS への組み込み試験を行った結果、問題ないことも確認した。

面分光ユニットの開発と並行して、解析ソフトの開発も進めた。「研究開始当初の背景」に記載したように、進化過程にある銀河ではガスのインフロー・アウトフローや銀河回転



**図5 速度成分分離ソフトの使用例**

といった複雑なダイナミクスが予想される。このように複雑なガスダイナミクスがある場合、そこから放射される輝線のプロファイルは複雑になる。逆に複雑なプロファイルを各速度成分に分離することで、どのようなガスダイナミクスが起きているかを探ることができる。我々は輝線プロファイルを速度成分に分離するソフトの開発を行った。このソフトは既に既存の面分光装置で取得したデータ解析に利用されている(図5)。

#### 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 1件)

Ozaki, S., Tanaka, Y., Hattori, T., Mitsui, K., Fukushima, M., Okada, N., Obuchi, Y., Tsuzuki, T., Miyazaki, S., and Yamashita, T., "Development of a slicer integral field unit for the existing optical spectrograph FOCAS: progress", 2014年, Proc. SPIE, Vol. 9151, 91514, 査読なし  
DOI: 10.1117/12.2054838

[学会発表](計 2件)

尾崎忍夫、服部堯、Chien-Hsiu Lee、福嶋美津広、三ツ井健司、岩下光、田中陽子、都築俊宏、岡田則夫、宮崎聡、山下卓也、大淵善之、「FOCAS用イメージスライサー型面分光ユニットの開発7」日本天文学会、2016年9月14~16日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

尾崎忍夫、田中陽子、服部堯、宮崎聡、山下卓也、岡田則夫、福嶋美津広、三ツ井健司、大淵善之、都築俊宏、「FOCAS用イメージスライサー型面分光ユニットの開発 進捗状況」、日本天文学会、2015年3月18~21日、大阪大学(大阪府・大阪市)

[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  
[http://atc.mtk.nao.ac.jp/TMT/index\\_IFU.html](http://atc.mtk.nao.ac.jp/TMT/index_IFU.html)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

尾崎 忍夫 (OZAKI, Shinobu)  
国立天文台・TMT推進室・特任研究員  
研究者番号：60532710

(2)連携研究者

服部 堯 (HATTORI, Takashi)  
国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員  
研究者番号：40450192

岡田 則夫 (OKADA, Norio)  
国立天文台・先端技術センター・主任研究技師  
研究者番号：20311178

松田 有一 (MATSUDA, Yuichi)  
国立天文台・チリ観測所・助教  
研究者番号：20647268

斎藤 智樹 (SAITO, Tomoki)  
兵庫県立大学・天文科学センター 西はりま天文台・研究員  
研究者番号：90450189

川口 俊宏 (KAWAGUCHI, Toshihiro)  
尾道市立大学・経済情報学部・准教授  
研究者番号：60433695

宮崎 聡 (MIYAZAKI, Satoshi)  
国立天文台・先端技術センター・准教授  
研究者番号：20290885

山下 卓也 (YAMASHITA, Takuya)  
国立天文台・TMT推進室・教授  
研究者番号：00211631