

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400216

研究課題名(和文) 近赤外線面分光で探る星形成と活動銀河中心核のつながりと銀河進化

研究課題名(英文) Exploring the Connection between Star Formation and Active Galactic Nucleus Activity and the Evolution of Galaxies with Near-Infrared Integral-Field Spectroscopy

研究代表者

石垣 剛 (Ishigaki, Tsuyoshi)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：40312384

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)：銀河と活動銀河中心核の共進化について探るため、すばる望遠鏡の近赤外線観測装置 MOIRCS用の面分光ユニットを製作するとともに、面分光観測の対象天体選定に向けて北黄極領域で抽出した銀河のスペクトルエネルギー分布(SED)解析を行った。面分光ユニットをMOIRCS焦点部に取り付ける筐体に組み込み冷却試験を行ったところ、冷却下でも安定した性能を確認できた。また本研究で行ったSED解析により、深く隠されたコンプトン厚AGNの候補天体を選定できることなどが確かめられた。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the co-evolution of galaxies and active galactic nuclei (AGN), we have built an integral-field unit (IFU) for MOIRCS, near-infrared spectrograph for SUBARU telescope. We have also analyzed spectral energy distributions (SEDs) of galaxies found in the north ecliptic pole field to select targets for integral-field spectroscopy. Cooling tests of the IFU were made using the focal plane box of MOIRCS and we confirmed the stability of the optics. The SED analysis in this study enables us to select heavily obscured Compton-thick AGN candidates.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：光赤外線天文学 銀河天文学

### 1. 研究開始当初の背景

銀河中心のブラックホール質量と銀河のバルジ質量との密接な相関や、ブラックホールへの質量降着率と銀河の星形成率(SFR)の赤方偏移依存性の類似は、銀河と活動銀河中心核(AGN)の共進化を強く示唆している[1]。さらに、色質量図における2系列化の形成にもAGN活動が深く関与していると考えられている[2]。銀河の質量集積・形態進化の背景には様々な物理過程(銀河衝突や冷却流によるガス供給など)が関わっている。中でも、AGNによって引き起こされる銀河スケールのアウトフローは、銀河からのガス放出や星間ガスの加熱をもたらし、星形成の抑制に重要な役割を果たすと考えられている[3]。回転運動やアウトフロー、衝突による速度場の乱れなどを分離し、その空間的広がりを明らかにするためには、二次元的に空間を分解する面分光が不可欠である。高赤方偏移の宇宙では、星形成領域やAGNの多くはダストに深く覆われており、そのエネルギーは赤外線として再放射される。アウトフロー速度は全エネルギーに対するAGNの割合やAGN光度と相関しているという報告もあり[4]、銀河とAGNの共進化を明らかにするためには、ダストに隠された本来のSFRやAGNの活動性を正しく評価することも極めて重要となる

### 2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究は、(1)研究代表者が中心となり開発を進めているすばる望遠鏡近赤外線広視野分光器(MOIRCS)の面分光モードを完成させること、(2)波長連続性に優れた赤外線天文衛星AKARIのデータを含む、X線から赤外線にわたるスペクトルエネルギー分布(SED)に基づき、星形成活動とAGNの混在する銀河を選定し、これらの銀河の面分光による速度場観測を行い、両者のつながりとそれが銀河進化に与える影響について新たな知見を得ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) MOIRCS 用面分光ユニットの開発

MOIRCSはすばる望遠鏡の近赤外線撮像・多天体分光装置であり、近赤外線観測装置としてはトップクラスの広い視野と多天体分光機能を持つ。MOIRCSの機能を強化するため、検出器の交換による感度向上と面分光機能の追加からなるアップグレード計画が進められている。(検出器交換は2015年に終了した。)本研究ではそのうちの面分光機能の追加に関連して、マイクロレンズアレイ(MLA)を用いる面分光ユニットを開発する。

MLAを用いる面分光ユニットは高空間・高波長分解能のケーススタディに適しており、すばる望遠鏡の優れた結像性能とMOIRCSに備わったボリュームフェイズホログラフィック(VPH)回折格子の高波長分解能とを組み合わせ、高赤方偏移銀河の速度場観測に威力を発揮すると期待される。

面分光ユニットの開発においては、光学素子のホルダー製作を岩手大学の高度試作加工センターで行い、光学系の調整を岩手大学の実験室で行う。製作した光学系の冷却実験は国立天文台先端技術センター(ATC)で行う。そのために、ATCに真空冷却実験装置mini-Labを整備する。これにより、MOIRCS本体の共同利用を止めることなく、光学系の冷却実験を行うことができる。

国内での冷却実験を経た後、面分光ユニットをハワイ観測所に輸送し、山麓施設での最終調整を行った後、面分光ユニット用に増設されたMOIRCS焦点部の筐体へと組み込む。最後にMOIRCS本体にこの筐体を取り付けて、面分光モードを完成させる。

#### (2) SED 解析による星形成活動とAGNの混在する銀河の選定

AKARIの深探査領域である北黄極(NEP)領域について、u-bandからK-bandの撮像データとAKARIによる撮像データから構築したSEDカタログを基に、様々な赤方偏移の天体について、スターバーストモデルとAGNモデルとを混合したSEDによる中間赤外線SEDフィッティングを行い、ダストに覆われた星形成活動とAGNを分離する(図1)。この手法については先行研究でその有効性を確認しているが[5]、本研究では新しく加わったHerschel/PACSの遠赤外線データも加え、使用するSEDテンプレートモデルをさらに注意深く選択して分離の精度を高め、AGNと星形成活動が様々な割合で混在した $z=0.4-2$ のサンプルを選定する。

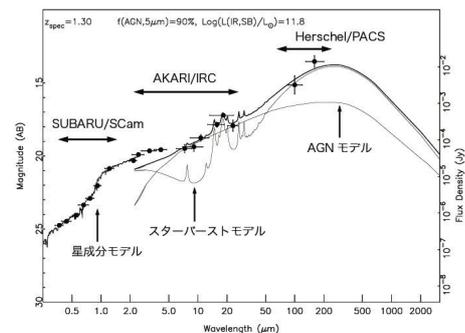


図1: 中間赤外線域のスペクトルエネルギー分布(SED)のフィッティング例。AGNのテンプレートとスターバーストのテンプレートを組み合わせてフィッティングを行っている。

さらに本研究ではX線観測衛星ChandraによるX線データ、ジャンスキー大型電波干渉計(JVLA)による1.5GHz電波連続光データを加えることにより、AGNについても様々な活動性を持つサンプルの抽出を試みる。

以上のようにして選定したサンプルについて、面分光観測を行い、AGNと星形成活動の割合やAGNの活動性の違いと、母銀河の運動状態の関連を調べる。

### 4. 研究成果

#### (1) MOIRCS 用面分光ユニットの開発

本研究で開発した MOIRCS 用 MLA 面分光モードのパラメータを表 1 にまとめた。また、図 2 には製作したユニットの全体像を示した。

表 1：MLA 面分光モードのパラメータ

拡大光学系の拡大率	30 倍
MLA1 レンズのサイズ	3 mm/lens
MLA のフォーマット	9 x 31 lenses
空間サンプリング	0.2 arcsec/lens
視野	1.8 x 6.2 arcsec <sup>2</sup>
スペクトル長	1400 pixels
波長分解能	R = 800 (HK500 grism) R=4000-5000 (VPH grism)

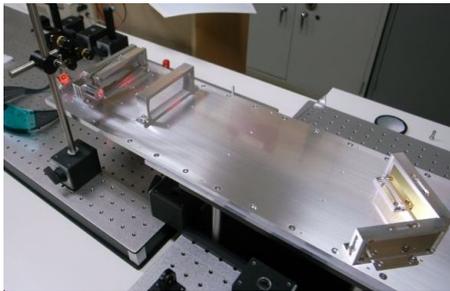


図 2：製作した MLA 面分光ユニット

面分光ユニットの常温下での光学性能を岩手大学の実験室で評価した結果、拡大光学系の結像性能は図 3 に示したように、光学評価ソフトウェアによる理論値と一致した。また、マイクロピューピル像の一様性を測定したところ、像のサイズのばらつきは 2%程度に収まっており、これは MLA の曲率半径のばらつき 1% (要求仕様、実測でも確認) から予想される値と一致していることを確認した。

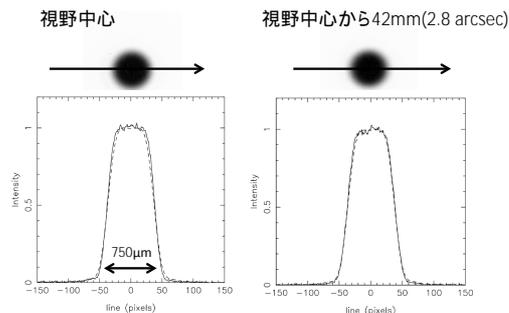


図 3：常温下、可視光 (550nm) での面分光ユニットによる 25 μm ピンホールの拡大像。実線は測定プロファイル、破線が光学評価ソフトウェアによる理論値。

面分光ユニットは国内での試験を経た後、ハワイ観測所へ輸送し、山麓施設においてユニット全体の冷却試験を行った。この試験では実際の観測に使用する MOIRCS 焦点部の筐体を用いて (図 4) 観測時の温度に近い 109K まで光学系を冷却することに成功した。マイクロピューピル像の半径方向のプロファイルを常温時と比較したところ、ほとんど変化は見られず (図 5)、また光束のケラレも生じて

いないことが確認でき、冷却下においても安定して光学系を保持できていることがわかった。



図 4：ハワイ観測所に設置した面分光機能追加のための MOIRCS 焦点部筐体。この筐体を用いて、面分光ユニット全体の冷却試験を行った。

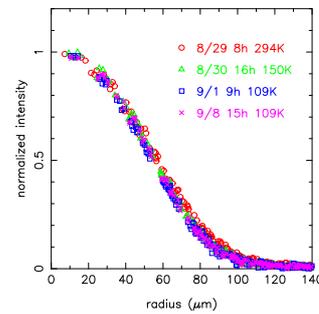


図 5：冷却時と常温時のマイクロピューピル像の比較。半径方向にプロットしたプロファイルにほとんど変化は見られない。

本研究の結果、MOIRCS 用 MLA 面分光ユニットはほぼ完成した。今後は MOIRCS の共同利用装置としての利用状況を考慮しながら、試験観測の早期実現に向けて準備を進めていく。

## (2) SED 解析に基づく研究成果

面分光観測の対象天体選出のための SED 解析の過程で以下のような研究成果を得た。

### コンプトン厚 AGN 候補の選定

中間赤外線域の波長連続性に優れた AKARI のデータを含む SED を解析することにより、ダストに深く覆われた AGN についてもその活動性を定量的に評価することができる。その結果得られる AGN 光度と X 線光度とを比較すると、X 線が強く吸収されたコンプトン厚 AGN の候補を選定できると期待される。

本研究では NEP 領域のすばる望遠鏡主焦点カメラによる可視光画像により抽出した約 60000 個の銀河について、中間赤外線から遠赤外線までの SED をスターバーストモデルと AGN モデルとを混合したテンプレートによりフィッティングして、AGN 光度を求めた。それらを X 線観測衛星 Chandra による X 線光度と比較したところ、X 線光度の AGN 光度に対する比が、水素柱密度  $10^{24} \text{cm}^{-2}$  から予想される値よりも小さい、コンプトン厚 AGN の候補が見つかった。その結果、赤方偏移  $z=0.4-2$

の銀河のうち、AGN による成分が赤外線光度の大部分をしめる銀河の約 30%がコンプトン厚 AGN 候補であることがわかった[6]。

X 線が強く吸収されたコンプトン厚 AGN には相互作用の形態を示す銀河が多いという報告があり[7]、銀河衝突によって引き起こされるガス供給によってブラックホールが急激に成長中であることが示唆される。ブラックホールと銀河の共進化を探る上で、コンプトン厚 AGN を持つ銀河サンプルは本研究の主要なターゲットと言える。

#### 超高輝度 X 線源 (ULX) の SED 解析

ULX は恒星質量のブラックホールと活動銀河中心核の中間の X 線光度を持つ天体であり、そのエネルギー源は不明だが、中間質量のブラックホールなどが提唱されている。本研究では NEP 領域で見つかった赤方偏移  $z=0.027$  の ULX に対して、可視域の SED フィッティングを行い、ULX が属する星の集団の物理量を推定した。その結果、星団の年齢は 0.1-2Gyr、SFR は 0.02-0.16 太陽質量/年、質量はおおよそ  $10^7$  太陽質量であることがわかった。また、分光観測から得られた輝線比は、それが純粋な星形成領域とは異なることを示しており、ULX へのガス降着が電離に寄与していることを示唆する結果となっている[8]。

#### 赤方偏移 $z\sim 3$ のライマンブレイク銀河の電波スタッキング解析

本研究で作成した NEP 領域の銀河 SED カタログから、B-band 以上の長波長域に比べて、u-band で急激に明るさが減少している天体約 1300 個を抽出した。これは 912 のライマン端が u-band より長波長に赤方偏移した  $z\sim 3$  の銀河を多く含むサンプルとなっていると考えられる(ライマンブレイク銀河と呼ばれる)。この  $z\sim 3$  のライマンブレイク銀河サンプルに対して、ジャンスキー大型電波干渉計 (JVLA) の 1.5GHz 電波連続光データを調べ、1.5GHz 電波が未検出の銀河サンプル約 400 個についてスタッキング解析を行った。

今後は、スタッキングで得られた電波光度の情報と、可視光域のデータを平均して得られた紫外線光度とを比較して、 $z\sim 3$  のライマンブレイク銀河について、星形成活動やダスト吸収についての議論を進めていく。

以上のような解析を通して、様々な活動性を示す銀河サンプルが得られたので、今後は開発した面分光ユニットなどを用いた個別の銀河の詳細観測を進めていく予定である。

#### <引用文献>

- [1]Shankar, NewAR 53, 57(2009)
- [2]Hickox et al., ApJ 696, 891(2009),
- [3]Hopkins et al., ApJS 161, 1(2006),
- [4]Veilleux et al., ApJ 776, 27(2013),
- [5]Hanami et al., PASJ 64, A70(2012),
- [6]Krumpe et al., MNRAS 446, 911(2015)

- [7]Kocevski et al., ApJ, 814, 104(2015)
- [8]Diaz Tello et al., A&A 604, A14(2017)

#### 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2件)

High excitation emission line nebula associated with an ultra-luminous X-ray source at  $z = 0.027$  in the AKARI North Ecliptic Pole Deep Field, J.Diaz Tello, T.Miyaji, T.Ishigaki, M.Krumpe, Y.Ueda, H.Brunner, T.Goto, H.Hanami, Y.Toba, Astronomy & Astrophysics, Vol. 604, 2017, A14, 7 pages, 査読あり  
DOI: 10.1051/0004-6361/201730611

Chandra survey in the AKARI North Ecliptic Pole Deep Field - I. X-ray data, point-like source catalogue, sensitivity maps, and number counts, M.Krumpe, T.Miyaji, H.Brunner, H.Hanami, T.Ishigaki, T.Takagi, A.G.Markowitz, T.Goto, M.A.Malkan, H.Matsuhara, C.Pearson, Y.Ueda, T.Wada, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.446, 2015, 911-931, 査読あり  
DOI: 10.1093/mnras/stu2010

[学会発表](計3件)

「MOIRCS用マイクロレンズアレイ面分光ユニットの開発: IFUの冷却試験」石垣剛 他, 日本天文学会春季年会, 2018年

「MOIRCS用マイクロレンズアレイ IFUの開発」石垣剛 他, 面分光研究会 2016-面分光で解き明かす銀河の形成と進化-, 2016年

「MOIRCS用マイクロレンズアレイ面分光ユニットの開発: 進捗状況」石垣剛 他, 日本天文学会春季年会, 2015年

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

石垣 剛 (ISHIGAKI, Tsuyoshi)  
岩手大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 40312384

##### (2)連携研究者

岩田 生 (IWATA, Ikuru)  
国立天文台・ハワイ観測所・准教授  
研究者番号: 40399275

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