

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01249

研究課題名(和文) 3次元分光で探る星形成活動研究のための近赤外波長可変狭帯域フィルターの開発

研究課題名(英文) Development of Near-Infrared Tunable Filter for Research of Star-formation Activity by 3D Spectroscopy

研究代表者

高橋 英則 (Takahashi, Hidenori)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：80361567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の課題である銀河系内外の大規模星形成領域の物理状態の解明のために近赤外線波長走査型フィルターの開発を進めた。1. 近赤外線波長全域でフラットな反射特性を低温で実現する多層膜素子(ファブリ・ペローエタロン)の設計と製作、2. 2枚のエタロンの平行度を保持しつつ、微小距離の走査するための圧電素子(ピエゾ素子)の選定と入手、3. 光学素子のギャップ間の測定、光学素子間隔調整フィードバックのための静電容量センサーの選定と入手、4. これらを組み合わせた試作モデルの製作、5. 測距と駆動をクロースドループで制御し、常にエタロンの間隔・平行性を維持しながら波長走査を行う制御系の設計も進められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大規模星形成領域の物理状態を銀外系内の星団レベルから近傍・遠方銀河までの広い空間ダイナミックレンジを、近赤外線波長全域に渡って連続的に高空間分解能の観測を行い、星形成活動の物理過程を調査、大質量星や銀河の進化を解明するための本研究では、様々な天文学の研究分野から強い要請がありながら、世界的に見てもこれまで実用例がない赤外線観測用波長走査型フィルターを開発、その実用可能性の一步を踏み出したと言える。さらに、チューナブルフィルターの基礎技術開発およびその実証、パイロット的なサイエンスプロジェクトの推進としての位置付けにおいても大きな意義があり、我が国のモノ作りと天文学の発展に欠かせない。

研究成果の概要(英文)：A near-infrared wavelength-scanning filter has been developed to elucidate the physical conditions of large-scale starforming regions in the Galaxy and extra-galaxies. 1. Design and fabrication of a multilayer device (Fabry-Perot etalon) to realize flat reflectivity across the wide near-infrared wavelength range at low temperatures; 2. Selection and acquisition of piezo actuators to scan fine distances while maintaining the parallelism of the two etalons; 3. Selection and acquisition of capacitance sensors for measuring the gap between 2 etalons and for feedback of optical element spacing adjustment, 4. Fabrication of a prototype model combining these components, 5. and a control system was also designed to perform wavelength scanning while maintaining the spacing and parallelism of the etalon by controlling the ranging and driving in a closed loop.

研究分野：赤外線天文学、観測機器開発

キーワード：チューナブルフィルター 近赤外線 3次元分光 星形成活動 大質量星クラスター

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、様々な天文学の研究分野から強い要請がありながら、世界的に見てもこれまで実用例がない赤外線観測用波長走査型フィルター（チューナブルフィルター）を開発し、大口径望遠鏡の観測装置の前置光学モジュールとして搭載、その実用可能性を示すことが主目的である。科学的には、大規模星形成領域の物理状態を銀外系内の星団レベルから近傍・遠方銀河までの広い空間ダイナミックレンジを近赤外線波長全域に渡って連続的に高空間分解能の観測を行い、星形成活動の物理過程を調査し、大質量星や銀河の進化を解明することである。

3次元分光観測（注：データ処理あるいは波長走査などの後、最終的に2次元空間情報+連続的な波長情報が得られるもの）は、その放射環境の物理状態（温度、圧力、放射場強度、速度など）の空間情報を直接知り得る観測手法である。昨今、視野内の空間情報を保持したまま、波長情報も同時に取得できる面分光（Integral Field Spectroscopy）を用いた観測が行われているが、数秒角程度と視野が狭くその観測対象は限られている。複数の狭帯域フィルターを用いる方法もあるが、フィルターの数によって観測波長が制限される。赤外線波長域においてチューナブルフィルターの開発例もあるが（JWST-FGS など）、定常運用に至っているものはない。これは冷却による構造体の変形、光学素子面の多層膜の熱収縮による変形などにより、面全体の面精度が悪化し、広い波長範囲に渡って必要な光学性能を満たすことが難しいからである。このような現状を受け、本研究では、研究代表者によってこれまで進められてきた分光器の基礎的な技術開発を進展させ、現存する赤外観測装置の分光モジュールを完成させることを目指す。これは今後開発が進むであろう広視野赤外線撮像装置のチューナブルフィルターの基礎技術開発およびその実証、パイロット的なサイエンスプロジェクトの推進としての位置付けにおいても大きな意義があり、我が国のモノ作りと天文学の発展に欠かせない研究課題である。

2. 研究の目的

- (1) サイエンス目的は、「様々な空間スケールでの大規模星形成活動の様子を探る」ことである。
- ① 物理的大きさ、年齢、環境、金属量など異なる状況にある大質量星星団の構成メンバーを空間的に分解し、その個々の分光診断結果から、種族・タイプを同定することで、大規模星形成領域を形作る大質量星の誕生とクラスターの形成・進化についての系統的な情報を得る。これらは銀河系の内のエネルギー収支や、ダスト生成や強い紫外光の放出等、星間物質への影響の情報になり得る。
  - ② 塵によって内部が隠された近傍スターバースト銀河の内部で、星形成がどのような空間分布でどの程度行われているのか？そしてガスの消費により星形成が終了した後、どのように「受動的銀河」へと変化していくのか？を探る。
  - ③ 宇宙全体で最も星形成が活発に行われていた時期（赤方偏移  $z=1-3$ ）を中心に、遠方銀河における星形成の引き金となっている物理プロセス（星形成銀河同士の合体なのか銀河間空間におけるフィラメント状の冷たいガスの銀河内部への降着なのか等）とその時間進化を空間分解することで明らかにする。

上記3つの対象はスケールが異なるものの共通するのは、どのような環境で星形成活動が誘発され、発展していくのかという点である。これらは現状の空間分解能や観測波長の制限から未だ明らかにされていない研究テーマであり、本研究では異なるスケールでの現象を相補的に捉えることで、このテーマの解決を目指す。

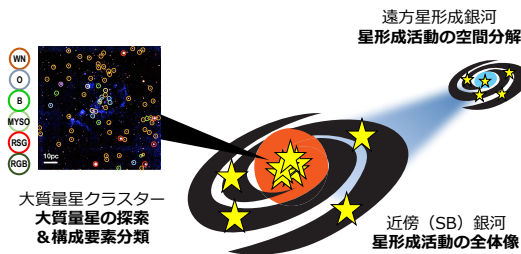


図1: チューナブルフィルターによる様々な空間スケールの分光撮像観測ターゲット。対象は異なるが、大規模星形成活動を探るという意味で相互リンクしている。

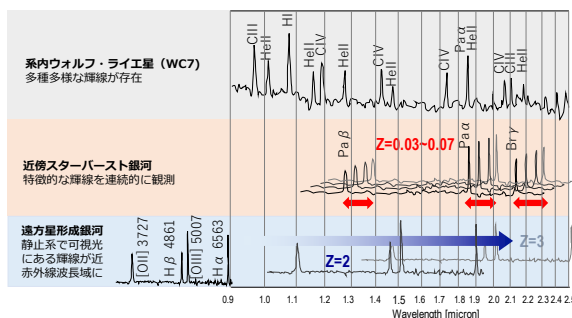


図2: 近赤外線全域を網羅することで、あらゆる距離、空間スケールの星形成活動を調査できる。

(2) その観測手段として3次元面分光モジュールを製作し、実際に既存の赤外線観測装置に搭載・分光観測を行うことで、科学的目的を達成する。前述したように広い赤外線波長域で任意の波長の分光撮像を行うことができる分光モジュールはほとんど存在しない。それは真空・低温環境で高い精度で波長走査する駆動機構および測距機構が確立していなかったためである。本研究では、将来の広視野面分光観測に向けたチューナブルフィルターの要素技術を確立するとともに、これを実現する分光システムを構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 機器開発 (分光モジュール製作)

本研究開発で想定しているファブリ・ペロー (FP) 型分光器は高い反射率を持った2枚平行平面基板間 (エタロン) の干渉を利用した分光器で、光束を面として利用するため、エタロン間隔を可変にすることで空間情報を保持したまま、任意の波長のイメージを取得することができる。但し、このエタロン間隔は極めて高い平行度で制御しなければならない。そのため必要な精度・距離を真空・冷却状態で走査可能な駆動素子は少なく、観測機器として実運用の例はない。そこで本研究ではこの技術を確立し、さらにエタロン間の絶対距離を測定し、これを駆動回路にフィードバックさせる機構を装備することで、極めて高い平行度を達成する。具体的な開発要素と技術的詳細は以下の通りである。

- ① 光学素子：近赤外線波長全域(1-2.5 $\mu$ m)に渡ってフラットな反射特性を低温で実現する大口径(光束で50mm以上)の多層膜を有した素子を製作する。基板としては赤外線での透過率が高く、放射率が低いものでなければならない。
- ② 駆動素子：平行におかれた2枚のエタロンの平行度を保持しつつ、微小距離(最小駆動距離 $\sim$ 10nm)を変化させるための駆動素子を選定・入手する。駆動素子は光束面内に対象に3か所配置し、独立に制御することで、エタロンの平行性を維持しつつ、間隔を変位させる。これらは真空・低温下で駆動・制御が必須となる。
- ③ 測距センサー：透過波長の制御にはエタロン間隔の絶対値測定が必要である(最小測距間隔 $\sim$ 10nm)。またエタロンの平行性の維持のためには、ギャップを駆動素子へフィードバックする必要がある。そのための測距センサーを選定・入手する。駆動素子と同様、真空・低温下での動作が必要である。
- ④ 制御系：駆動素子と測距センサーによる測定値をクローズドループ制御し、常にエタロンの間隔・平行性を維持しながら波長走査を行うための制御ボードなどを設計、製作する。また、これら进行操作する制御ソフトの開発も行う。
- ⑤ 筐体(モジュール化)：これらのコンポーネントを組み合わせた機械性能および分光性能評価試作モデルと最終的な分光モジュールを製作する。

#### (2) 観測計画

- ① 銀河系内の大質量星クラスター：大質量星はその寿命が短いため観測にかかる確率が低くなる。特に主系列星後の滞在期間はその星の寿命の1/10程度しかなく、理論的な大質量星の進化シナリオを確認するだけのサンプル数が少ないのが現状である。大質量星星団は構成天体が空間的に密に分布しており、スリット分光観測では効率が悪い。一方チューナブルフィルターでは撮像と同様の観測形態であることから観測効率が高く、広視野撮像と相俟ってサンプル数を増やすことができる。また種族・タイプによって特徴的な輝線が異なるため波長方向に連続的にサンプリングできる。また撮像イメージ(の比較)からその空間分布を知ること容易となる。特に大質量星に特徴的な輝線は近赤外線波長域に多数あり(HeII, CIV, NII, Pa $\alpha$ , etc...)、可視光では減光で見えない赤外線で観測することで新たに発見数が増大することが期待される。実際に今世紀に入ってから赤外線による探索観測でWRの同定数は倍増している。本研究では、近赤外マルチ輝線撮像観測により、大質量星の進化シナリオを明らかにするばかりでなく、異なるタイプ毎に存在時間が短い大質量星の特質を用いることで星団の年齢や進化過程にも強い制限を与えることができると期待される。

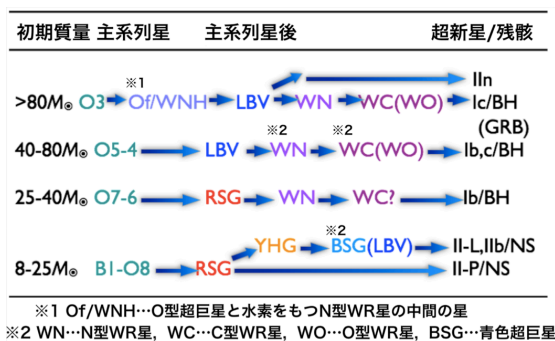


図3：大質量星の進化シナリオ。理論的な進化過程はあるが、観測的に証明されていない。本研究でサンプル数を増やすことで、系統的な進化シナリオを構築する。

- ② 近傍宇宙のスターバースト銀河：スターバースト銀河は大量の塵に覆われており、紫外線や可視光の観測では星形成活動がもっとも高まっている領域（＝本来もっとも興味深い領域）を直接調べることができない。そこで本研究では、減光の影響を受けにくい近赤外線のパα輝線（静止系波長  $1.875\ \mu\text{m}$ ）を利用する。パα輝線は星形成領域から放たれる水素の再電離線であり、銀河内部の星形成活動を描くための最良のツールとなる（図4左）。パα輝線の静止波長  $1.875\ \mu\text{m}$  は大気吸収に阻まれて地上からは観測できないことから、これまでスターバースト銀河についてパα輝線探査が系統的に行われた例はない。しかし我々は、わずかに赤方偏移（ $0.03\sim 0.07$ ）した銀河に狙いを定め、本研究で開発するチューナブルフィルターを用いて近傍宇宙のスターバースト銀河の系統的なパα輝線探査を実現し、スターバースト銀河内部の物理状態を詳細に描き出すとともに、スターバーストを引き起こす物理過程とその周辺環境の関係を探る。
- ③ 遠方宇宙の星形成銀河：銀河は進化とともに、その形態を変化させてきた。しかしその形態変化を引き起こすメカニズムは明らかにされていない。その原因の一つは、これまで遠方銀河は基本的に「点源」として観測され、「銀河内部において、いつ・どこで星が作られたか」という重要な情報を失っていたことにある。そこで本研究では、可変透過波長フィルターを用いて遠方銀河のHα輝線（静止系波長  $6563\ \text{\AA}$ ）、[OIII]輝線（静止系波長  $5007\ \text{\AA}$ ）等の強いガス輝線を空間分解することを目指す。過去に近赤外線の狭帯域フィルターを用いた赤方偏移 $\sim 2$ の時代の星形成銀河内部の星質量・星形成率の分布の報告があるが、この手法では狭帯域フィルターに輝線が入る限られた赤方偏移の天体しか観測できない。本研究で開発するチューナブルフィルターは、近赤外線の任意の波長域で狭帯域撮像を可能にし、これを用いて銀河進化の最盛期前後（赤方偏移  $z=1\text{--}3$ ）の幅広い時代の星形成銀河を網羅的に観測することで、銀河進化のプロセスを時系列で明らかにできる。

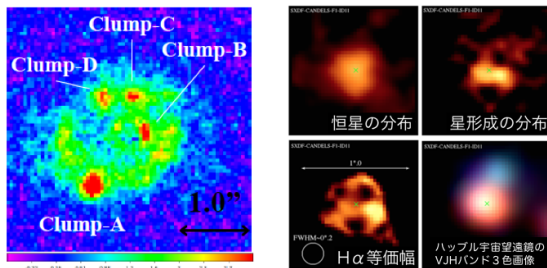


図4：実際にすばる望遠鏡のIRCS+A0観測で取得した近傍銀河のパα画像（左；北川，小山，本原他2016）と遠方銀河（ $z\sim 2$ ）の星形成銀河（右；美濃和，小山他2016）。チューナブルフィルターによりかつてない規模の銀河サンプルについて、銀河内部の星形成活動を炙り出すことが可能になる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 機器開発（分光モジュール製作）

- ① 光学素子：本研究の科学的目的を達成するには、図2にあるように近赤外線波長全域に渡って分光観測を行う必要がある。また分光観測性能を維持するため広い波長範囲に渡ってフラットな反射特性を有し、大口径（光束で  $50\text{mm}$  以上）の多層膜素子の製作が必須である。また赤外線観測の特性上、装置を冷却しなければならない。本研究では誘電体多層膜製作のパラメータの調整・最適化を繰り返し行い、まずは  $1.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$  で一定の反射率（ $96\pm 1\%$ ）を維持した光学素子の製作に成功した。

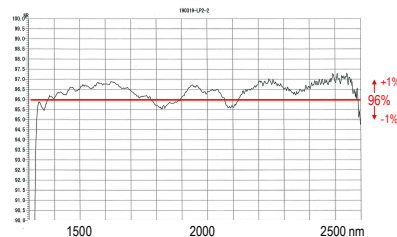
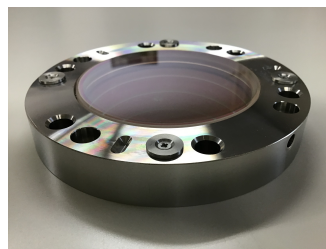


図5：ファブリ・ペローエタロン（中央の光学素子：左）と反射率特性（右）

- ② 駆動素子：分光性能維持のためには、平行におかれた2枚のエタロンの平行度を保持しつつ、微小距離（最小駆動距離 $\sim 10\text{nm}$ ）を変化させなければならない。1 Free Spectral Rangeの波長走査をする場合は、大凡観測波長程度エタロン間隔を真空・冷却環境下で変化させる必要がある。精度はさらにその1/100程度が必要である。候補として電磁石やピコモータを用いた機構も検討したが、低温での安定性や精度に問題があるため、今回の開発においては除外した。最終的にはピエゾ素子を用いたアクチュエータが最適であると判断し、駆動距離や精度、発生する力、低温での使用など条件を満たすタイプを入手した（図6）。常温ではあるが単体での動作試験を行い、本開発の仕様を満たす性能を有していることを確認した。

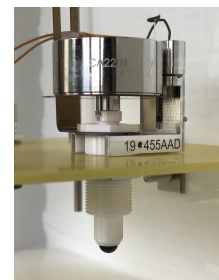


図6：ピエゾアクチュエータ

- ③ 測距センサー：光学素子のギャップ間隔を測定し（最小測距間隔～10nm）、駆動素子へフィードバックするための測距センサーの検討を行なった。機械式あるいは光学式のエンコーダーを用いる方法があるが、モジュールは冷却して使用されるため、その熱変形が問題になる。また検出分解能も要求を満たさない。そこで非接触で真空・低温環境でも機能し、必要な分解能を有する静電容量センサーを採用した。これは他の観測機器にも使用されている実績があり、信頼がおけるものである。 piezo素子と組み合わせた状態で変位試験を行い、問題なく測距できることを確認した。

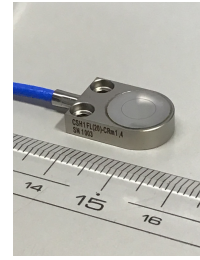


図7: 静電容量型ギャップセンサー

- ④ 制御系：静電容量センサーによる測定値をpiezo素子の駆動系に反映させるクローズドループ制御系を設計した。これにより冷却の際の熱収縮による2枚のエタロンの平行度の悪化や観測時の望遠鏡の位相（方向）による形状変化に対してリアルタイム制御を行い、常にエタロンの平行性を維持しながらの波長走査を実現できる。

### Conceptual Diagram of Fabry-Perot Unit

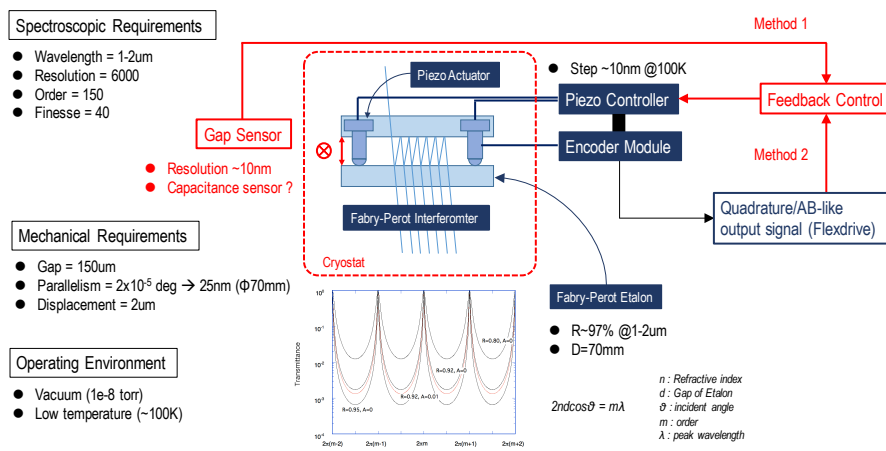


図8：分光器制御系の概念図と仕様（要求値）

- ⑤ 筐体の製作（モジュール化）：まず駆動素子と測距センサーを組み合わせたアルミニウム製試作モデルを設計・製作した。ある程度構造の最適化は計っているが、モジュールの方向による変形や実際に冷却した際の変形を設計値通りに補正できるかどうか、実際の実験・測定で確認するためのモデルである。その他各コンポーネントの効率的な最適配置も確認する。

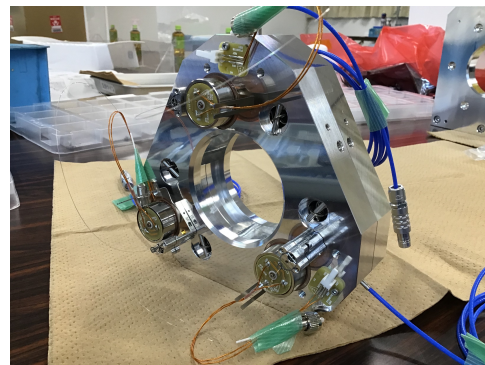


図9（左）：分光器試作モデル。アクチュエータ、測距センサーが取り付けられている。

- ⑥ 分光モジュール化：試作モデルを元に最終的な分光モジュールの製作を進める。光学素子は金属に比して熱収縮の小さい石英ガラスが母材になっており、冷却下での筐体の熱収縮によるエタロンの破損の可能性がある。これを防ぐために、筐体の素材に熱収縮量の小さい材料（インバーなど）の導入も考えている。それに伴い、軽量化のための肉抜きやハニカム化、光学素子の熱伝導・固定方法の最適化なども検討している。

### (2) 観測計画

本研究は新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受け、分光モジュールの開発が中心になったが、装置が完成した後に速やかに観測を行うために、具体的な観測計画の検討を共同研究者と共に進めた。大質量星形成クラスターのメンバー構成要素を決定する分光観測、近傍スターバースト銀河の系統的な Pa $\alpha$  輝線探査計画、遠方銀河での星形成活動については、銀河進化のプロセスを時系列で明らかにするため、最盛期前後（赤方偏移  $z=1-3$ ）の幅広い時代の星形成銀河の網羅的な観測について、各々具体的な領域やターゲット選定を進めた。さらに相補的データとなる撮像、測光観測計画の検討も進められた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究分担者	美濃和 陽典  (Minowa Yosuke)  (60450194)	国立天文台・ハワイ観測所・准教授   (62616)	
研究分担者	児玉 忠恭  (Kodama Tadayasu)  (80343101)	東北大学・理学研究科・教授   (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関