

令和 2 年 5 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02162

研究課題名(和文) 新技術次世代分光器の開発およびAGN距離梯子構築

研究課題名(英文) Development of a new technology spectrograph and connection of the distance ladder of AGN

研究代表者

岩室 史英 (Iwamuro, Fumihide)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80281088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：京大が岡山に建設した口径3.8mせいめい望遠鏡用の近赤外分光器を、従来の装置にはない方針で設計し、通常の近赤外分光器の1/4程度の予算で完成させる予定で開発を開始した。最終的には予算不足で分光器は7～8割程度までしか完成しなかったが、電子ビーム溶接による大型真空容器の製作、大曲率非球面鏡の製作と検査法、冷却真空で使用可能な安価な傾斜センサとアクチュエータ、ファイバー面分光器で取得された画像の解析ソフトウェア等に関して新たな知見が得られた。分光器本体は、今後は他の経費を用いて開発を継続する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発が行われた分光器は、従来利用されてきた回転対称な反射鏡とは異なり、対称な軸を持たない特殊な形状の鏡を6枚用いたものである。これにより、従来の方式に対し半分の枚数の鏡で目標性能が達成できるため、特に個々の光学素子の価格が高額になる大型の装置に対しては、コストダウンと反射面数の減少による効率の増加が見込まれる。また、量産品を分解・再組立てして冷却真空用に用いる方法は、動作の信頼度は落ちるが必要なモーター数が多い場合には劇的に製作コストを抑えることが可能である。

研究成果の概要(英文)：We designed a new near-infrared spectrograph for the 3.8m Seimei telescope built by Kyoto University in Okayama. The design is based on a non-conventional concept, and its development was started with a budget of about quarter for the usual near-infrared spectrograph. In the end, due to lack of budget, the spectrograph was completed up to about 70 to 80%, but new knowledge was obtained regarding: the fabrication of a large cryostat by electron beam welding, the production and inspection method of a large-curvature aspherical mirror, the low-cost tilt sensors and actuators for cooling vacuum use, and reduction software for images acquired by a multi-fiber spectrograph. Development of the spectrograph will be continued using other budgets.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：光学赤外線天文学 分光器 クェーサー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

京都大学では汎用望遠鏡としては東アジア最大となる口径 3.8m 望遠鏡(せいめい)を国立天文台岡山天体物理観測所敷地内に設置する計画を平成 17 年に開始した。本研究開始年度の平成 28 年度にはドーム棟および観測棟を建設、その後仮設ドーム内に組み立てられている望遠鏡本体を解体してドーム棟内に移設し光学系と多数のセンサ類を取り付け調整後、平成 30 年度の観測開始という予定で準備が進められていた。また、望遠鏡本体の準備と並行して取り付ける観測装置の検討も行われており、幾つかの研究プロジェクトがそれぞれに必要な観測装置を開発するという形で可視光や近赤外線での撮像装置・分光器の仕様検討が進められつつあった。せいめい望遠鏡開発の過程において、超精密研削加工機を用いて非球面鏡を加工する技術が(有)アストロエアロスペースにより開発されたが、この技術により従来の方法では製作が困難であったバイコニック鏡(縦断面と横断面の形状が異なる 2 次曲面鏡)を軸外して加工することが容易に可能となった。申請者は、この技術を最大限に利用することで新しいタイプの分光器が製作できることを着想し、本研究開始前の平成 27 年度中に具体的な光学設計を完了させて実現可能であることを確認した。具体的には、入射スリットとして 50 本のファイバーを約 2mm 間隔で等間隔に並べた離散スリットを用い、バイコニック鏡のみを用いた色収差のない反射光学系により隣のファイバーとの隙間の部分に次数分離をしたスペクトルを生成することで、プリズムによる弱い直交分散でもスペクトルが重なることなく分離できる(図 1)というものである。この分光器によりある程度の広がりを持つ 2 天体の非常に広い近赤外波長帯のスペクトルを一度に観測可能となる。

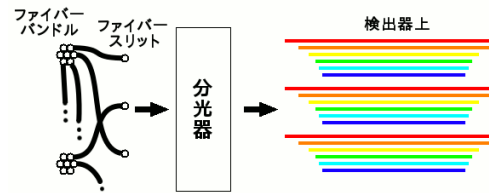


図 1 : 離散ファイバースリット

一方で近年、銀河中心にある超巨大ブラックホールへの物質の降着により巨大な放射が発生する活動銀河核 (Active Galactic Nuclei, 以下 AGN) と呼ばれる天体の研究が進み、初期宇宙での標準光源にできる可能性が報告され始めた。AGN ではブラックホール周囲に形成された降着円盤から紫外可視連続光が、それを取り巻くように分布する電離ガス雲やダストオーラスからは降着円盤からの放射を吸収して広幅輝線や赤外線を放射しており、内側にある降着円盤成分の変光に対する外側のガスやダスト成分の変光の遅延時間を測定することで放射領域の大きさを求められる(反響マッピング法)。この放射領域の大きさは、近傍の AGN の観測では明るさの平方根と良い相関があり、その関係を遠方宇宙で逆に適用することで反響マッピング法によって求めた放射領域の大きさから AGN の光度を推定でき、これにより AGN の距離を光度から求めることが可能となる。特に、CIV 輝線は $z>2$ では赤方偏移により可視光で観測できるため、現在まだ報告数は少ないものの注目を集めている。しかし、この輝線は近傍宇宙では紫外域にあり、地上から観測できないため反響マッピングの観測例が少なく、放射領域半径と光度の関係があまり良く定まっていない。可視光で CIV 輝線がモニタ観測されている $z>2$ の AGN に対し近傍での観測の多い H β 輝線の近赤外モニタ観測を行い、光度と CIV 輝線の放射領域の大きさの関係を較正して「距離梯子の接続」を行うことが、今後の CIV 輝線を用いた初期宇宙での宇宙膨張計測のために必要である。

2. 研究の目的

本研究では、平成 30 年度に観測を開始する京都大学のせいめい望遠鏡のための近赤外分光器を開発し、既に CIV 輝線のモニタ観測が行われている幾つかの遠方 AGN に関して近赤外波長域で H β 輝線強度変化のモニタ観測を行う事で、近傍での観測例の多い H β 輝線領域の半径 - 光度関係から遠方 AGN での CIV 輝線領域 光度関係を較正することを最終的な目的とする。本研究で使用する近赤外分光器として、せいめい望遠鏡開発により発展した技術を用いた従来にない新方式の分光器を開発し、その性能を実証することも主たる目的の 1 つとなる。また、開発経費を抑えるために様々な工夫を行い、安価に装置を開発する道筋を作ることも小目的となる。

3. 研究の方法

本研究で製作する近赤外分光器(図 2)は、非常に広い波長範囲を 2 天体同時に測光分光できるもので、これまでに、1 天体を非常に広い波長域で分光する装置(通常のスリット分光で測光性能はない)、複数天体を同時に測光分光する装置(一度に観測できる波長範囲が狭い)は存在するが、両方の長所を併せ持つ装置として世界初の分光器である。本装置は、以下の新しい設計コンセプト・加工技術に基づき、非常にシンプルにその性能を達成している。1) 50 本のファイバーを 2.2mm 間隔で約 11cm に並べた離散スリットで光を導入し、ファイバー間に次数の異なる複数のスペクトルを結像させる、2) 次数分離の直交分散をプリズムで行うことで、非常に広い観測波長範囲と高い効率を確保する、3) 回折格子とプリズムを一体化した素子で主分散と次数分離の直交分散を同時にかかけ、光学収差を減らすとともに分光器の構造をシンプルにする、4) 色収差を無くす必要から新加工技術を利用したバイコニック鏡 6 面による高効率反射光学系とする、5) 姿勢一定の据え置き型かつ単一の観測モードのみのシンプルな構造とし、観測中

の高い装置安定性を得る、6) 50本の入射ファイバーを25本ずつのバンドル(図3)とし、参照天体との2天体同時の測光分光を行うことで天候や大気の状態の影響を補正し、長期モニタ観測に必要な長期信頼性を確保する。平成27年度中に行われた光学設計結果(図2)では、波長 $0.85 \sim 2.45 \mu\text{m}$ のスペクトルを回折格子の7~3次の次数で観測し、検出器のほぼ全ての領域でスポットサイズが1ピクセル以下、波長分解能は4000と夜光輝線を十分に分離できる分解能を持つ。

6面ある反射鏡は全てバイコニック鏡と呼ばれる、光学面の縦方向と横方向で曲率半径と非球面定数がどちらも異なる鏡を使用しており、従来の非球面の2倍の自由度(球面に対しては4倍の自由度)を持っている。そのため、わずか6面の反射面でありながら通常の光学レンズ12枚分に相当する役割を果たし、かつ色収差の無い光学系となっている。調整の自由度が増すことが欠点であるが、低温の真空容器内でも多くの自由度で微調整できる機構を設けることで調整可能であると考えている。また、隣り合った2枚の鏡を加工機の機械精度で同一の鏡材上に加工することで調整の自由度を減らし、調整しやすくする。

本分光器は平成28年度から以下の順に開発を進め、平成30年度までに完成させ、最終年度にモニタ観測を行う。

H28年度：反射鏡2枚、真空容器、回折格子基盤、直交分散プリズム、ミラーホルダの製作、

H29年度：反射鏡4枚、真空容器内部、回折格子、検出器読み出し回路の製作、組み立て

H30年度：ファイバーステージ、ファイバーバンドルの製作、分光器調整と試験観測

R1年度：初年度の定常観測、試験観測結果や他の装置による過去の観測結果との比較研究

製作したバイコニック反射鏡は、以前より開発を進めている拡張フォーコート法を用いて形状を光学的に計測し、その他の機械的計測方法による部分的な形状測定結果と併せて光学面全体としての形状を確認する。また、通常であれば最も費用のかかる検出器部分は、すばる望遠鏡で既に利用を終了している遊休の近赤外検出器の再利用交渉を行い、公募による競争を経て獲得する予定である。

4. 研究成果

新方式の分光器開発により得られた成果を順に示す。

- (1) 天文観測機器の大型の真空容器は、軽量強固な円筒形のものが多く用いられている。しかし本研究で開発する装置はファイバー分光器で重量制限がないため、メンテナンス性を重視して直方体形状とし、かつ全方向から容易にアクセスできるように底面以外の部分を一体化して製作した。また、産業用真空容器製作で用いられている電子ビーム溶接により容器を製作することで、真空漏れの心配の全くない堅牢な容器が完成した(右写真)。
- (2) 上記真空容器に対する外部からの熱流入量を計算し、それに見合った冷却能力を持つ冷凍機を取り付けてクライオスタットとした。内部8か所に温度計を、16ヶ所にヒーターを取り付け、昇温・冷却試験を行い設計通りの性能(50K以下)が出ることを確認した。
- (3) 大曲率のバイコニック反射面6面を製作し、並行して開発を進めてきた拡張フォーコート法により光学的に形状確認を行った。これにより、計測を行った2面に関して概ね $1 \mu\text{m}$ 以内の形状誤差に収まっていることが確認でき、仕様通りの形状が出ていることが判明した(右写真)。
- (4) 反射型回折格子に2種類のプリズムを張り合わせた透過・反射型の回折格子プリズムを製作した。最も効率が悪いと予想される波長 $1 \mu\text{m}$ 以下でも効率43%あることが確認でき、ほぼ問題なく張り合わせ一体化ができたことがわかった。また、クライオスタット内に入れて50Kまで冷却した後昇温しても、材質の膨張率の違いによる破壊は起きないことも確認できた(右写真)。

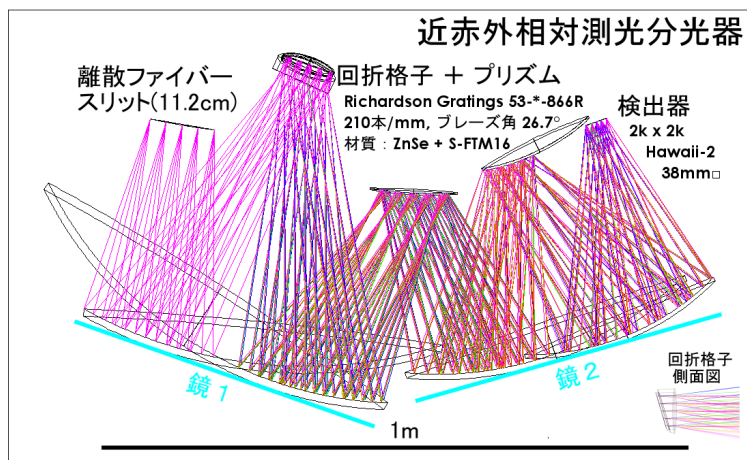


図2：近赤外相対測光分光器光学設計

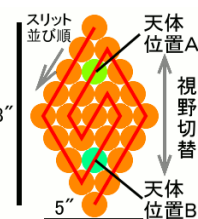
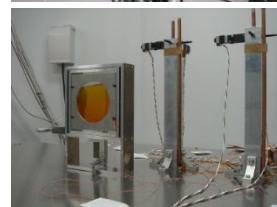
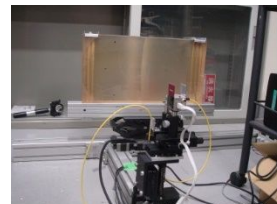
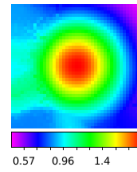


図3：ファイバーバンドル配置(2本の内の片方)



- (5) ホール素子を用いた真空冷却用傾斜センサを開発した。振り子の先端に小型のネオジウム磁石を取り付け、ホール素子で最接近位置を検出するもので、次に述べる低温用アクチュエータの動作確認試験では、2つのアクチュエータを用いて振り子の傾斜角を 0.01° ずつ2方向に変えながらホール素子の出力電圧をモニタし、低温環境下でもこの変化を検出できることが確認できた(右図)。
- (6) 市販の安価なステッピングモータを用いたアクチュエータを分解して、洗浄して機械油を除去し、モーター内部のベアリングを交換することで、真空冷却中でもアクチュエータとして機能することを上記傾斜センサと組み合わせたの試験で確認した。これにより、通常では非常に高価な部品が必要となる部分を全て市販の量産品で代用でき、冷却真空中での多軸の調整作業を行うことができることが確認できた(右写真)。
- (7) 上記の他、大型バイコニックミラーの保持部品やバッフル、内部光学ベースの製作、内部放射シールドの製作と内面の塗装、本分光器と同タイプの可視面分光器(KOOLS)の解析ソフト開発などを完了しており、全体としては7~8割程度までの分光器製作を行う事が出来たが、開発経費が不足し、現在非常にゆっくりとしか開発が続けられない状況にある。検出器に関しては、4個以上あるハワイ観測所の近赤外遊休検出器の内の1つ目の公募が行われ、本分光器からも利用希望申請を提出したが、採択されるには至らなかった。



本分光器の開発に関連して公開している Web ページは以下の通り。

近赤外相対測光分光器

<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/NIS/index.html>

拡張フォーコーテスト

<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/Kyoto3m/foucault3.html>

KOOLS 画像解析

<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/KOOLS/index.html>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Koshida Shintaro, Yoshii Yuzuru, Kobayashi Yukiyasu, Minezaki Takeo, Enya Keigo, Suganuma Masahiro, Tomita Hiroyuki, Aoki Tsutomu, Peterson Bruce A.	4. 巻 842
2. 論文標題 Calibration of AGN Reverberation Distance Measurements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa7553	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 Czerny Bozena, Beaton Rachael, Bejger Michal, Cackett Edward, Dall'Ora Massimo, Holanda R. F. L., Jensen Joseph B., Jha Saurabh W., Lusso Elisabeta, Minezaki Takeo, Risaliti Guido, Salaris Maurizio, Toonen Silvia, Yoshii Yuzuru	4. 巻 214
2. 論文標題 Astronomical Distance Determination in the Space Age	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-018-0466-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 T.Okumura, 他24名中15番目	4. 巻 68
2. 論文標題 The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). IV. New constraint on gravity theory from redshift space distortions at $z \sim 1.4$	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Publ. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 id 38, 24pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psw029	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 -
1. 著者名 H.Okada, T.Totani, M.Tonegawa, M.Akiyama, G.Dalton, K.Glazebrook, F.Iwamuro, 他10名	4. 巻 68
2. 論文標題 The Subaru FMOS Galaxy Redshift Survey (FastSound). II. The Emission Line Catalog and Properties of Emission Line Galaxies	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Publ. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 id 47, 17pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psw043	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 -

1. 著者名 A.Seko, K.Ohta, K.Yabe, B.Hatsukade, M.Akiyama, F.Iwamuro, 他2名	4. 巻 819
2. 論文標題 Properties of the Interstellar Medium in Star-Forming Galaxies at $z \sim 1.4$ Revealed with ALMA	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astrophys.J.	6. 最初と最後の頁 id 82, 18pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/819/1/82	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 -

1. 著者名 A.Seko, K.Ohta, K.Yabe, B.Hatsukade, M.Akiyama, N.Tamura, F.Iwamuro, G.Dalton	4. 巻 833
2. 論文標題 Constraint on the Inflow/outflow Rates in Star-forming Galaxies at $z \sim 1.4$ from Molecular Gas Observations	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astrophys.J.	6. 最初と最後の頁 id 53, 5pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/833/1/53	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 -

1. 著者名 H.Noda, T.Minezaki, 他25名	4. 巻 828
2. 論文標題 X-Ray and Optical Correlation of Type I Seyfert NGC 3516 Studied with Suzaku and Japanese Ground-based Telescopes	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astrophys.J.	6. 最初と最後の頁 id 78, 15pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/828/2/78	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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Kokubo, M; Minezaki, T.
2. 発表標題 Rapid Reformation of the Innermost Dust Distribution in the Changing-Look AGN Mrk 590
3. 学会等名 TORUS 2018: The many faces of the AGN obscuration, Puerto Varas, Chile (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 越田進太郎, 吉井讓, 小林行泰, 峰崎岳夫 ほか
2. 発表標題 MAGNUM プロジェクト: ダスト反響法による活動銀河核距離測定の Ia 型超新星による較正
3. 学会等名 日本天文学会2017年春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小久保充, 峰崎岳夫
2. 発表標題 3.4 μm /4.6 μm ダスト反響法によるクエーサーダストトラスのサイズ測定
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 和田一馬、岩室史英、他
2. 発表標題 SDSSのStripe 82領域のクエーサーの 変光観測
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takeo Minezaki
2. 発表標題 Extragalactic distances based on AGN dust reverberation
3. 学会等名 Astronomical Distance Determination in the Space Age (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takeo Minezaki
2. 発表標題 Dust reverberation of AGNs and its cosmological application: recent results from the MAGNUM project
3. 学会等名 AGN Reverberation Mapping: the pc Scale Garden of Massive Black Holes (招待講演)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

近赤外相対測光分光器 http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/NIS/index.html 拡張フーコーテスト http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/Kyoto3m/foucault.html http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/Kyoto3m/foucault2.html http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/Kyoto3m/foucault3.html KOOLS 画像解析 http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/KOOLS/index.html
--

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	峰崎 岳夫 (Minezaki Takeo) (60292835)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	柳澤 顕史 (Yanagisawa Kenshi) (90311183)	国立天文台・光赤外研究部・助教 (62616)	