

平成 30 年 9 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05021

研究課題名(和文) 南アフリカ IRSF の可視 近赤外同時化による SED 測定の革新

研究課題名(英文) Innovation of SED-measurement through simultaneous multi-colour photometry on IRSF

研究代表者

佐藤 修二 (Sato, Shuji)

名古屋大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：50025483

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000 円

研究成果の概要(和文)：目標は、可視から近赤外にわたる7色同時測光/偏光装置の IRSF1.4m 望遠鏡への導入であった。

そのためには、撮像部(検出器の大型化および読み出し部)の小型化が必須であった。この自力開発が頓挫して、小型の市販カメラ QHY を代用とする迂回路を見いだした。これは未だ実現していない。また本研究の基礎となった TRIPOL(3色同時測光/偏光装置)の論文も、校正データが不十分なため到達限界が不定で受理されていない。他方、TRIPOL 搭載の機会を求めて、アジア諸国と連携を進め、望遠鏡の新たな光学系を探究した結果、木野解を見つけた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the research is to realize the simultaneous 7-colour imaging camera by combination of TRIPOL with the existing SIRIUS on IRSF. The key is to develop the read-out system for a larger format CCD. However, we could not attain the miniaturization, so we searched for several bypasses, 1) Expansion of the Cassegrain focus box, b) Availability of alternative commercial CCDs, and 3) Planning to construction new telescopes. There are still not open routes to the satisfied solution. In the course of the search, we found a new optics: Aplanatic optics with spherical 1ry and 2ry mirrors. We also developed the method of the fabrication and measurement of the 4th aspheric mirror. Publication of TRIPOL to academic journals has been unsuccessful, because of the premature of the instrumental calibration, that is, the limit of the accuracy as the instrument was uncertain. Although TRIPOLs were distributed to several observatories and commissioned but still not fruitful.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：多色同時可視 近赤外 CGH 干渉計 球面主鏡副鏡望遠鏡 色放射温度計

1. 研究開始当初の背景

多色同時撮像に基づく時間変動は、『本質的』な重要性を有するものであり、本装置はこの研究分野を一新するであろうと期待した。

IRSFは、近赤外 JHKs のみのデータで、可視域データを欠いたために論旨もまた迫力を欠いた。多色撮像によるスペクトルエネルギー分布 SED のモニター、多色偏光による強偏光天体 SED、銀河と星形成の磁場構造の研究にわたって革新をもたらすであろうことは衆目の一致するところであった。提案した『可視-近赤外 7 色』フィルター系は、(SDSS-II)に準拠した可視域(*griz*)を、近赤外域は『標準』の[JHKs]システムと結合することである。それをいかに実現するか？が課題であった。

2. 研究の目的

可視から近赤外域にわたる波長域(0.4~2.5 μm)を、7つのフィルターで分割し、それぞれの色の『強度』と『偏り』を測定できる多色撮像偏光装置を製作する。南アフリカ・IRSF 望遠鏡に搭載して、7色(*grizJHKs*)測光/偏光の『同時』データを取得する。

装置という面から、この装置は光子に関するすべての属性(エネルギー=色: / 空間分布: =像/ 偏り: p)を、同時(時系列 t_i / 時間分解能 δt)に取得する装置である。

3. 研究の方法

1年目6色撮像同時化、2年目7色撮像同時化、3年目 偏光機能付加、最終的に『7色同時撮像偏光装置』を完成する。

各年次で、前 1/4 半期(3ヶ月間)に組込搭載、続いて IRSF のユーザーコミュニティに公開、残りの 3/4 半期(9ヶ月間)に観測、およびデータ解析を行い科学成果に実現する。CCD 読出回路と冷却のコンパクト化が必要になる。そのために1年要する。実績がある TRIPOL(可視域3チャンネル)を SIRIUS に組み込んでまず6色から次に7色化、と順に進める所以である。

4. 研究成果

目標は、可視から近赤外にわたる7色同時測光/偏光装置のIRSF1.4m望遠鏡への導入であった。そのためには、撮像部(検出器の大型化および読み出し部)の小型化が必須であった。この自力開発が頓挫したため迂回路を探した。これはいまだに未開通である。また本研究の基礎となったTRIPOL(3色同時測光/偏光装置)の論文化も、校正データが不十分なため到達限界が不定という理由で受理されていない。他方、TRIPOLを搭載する望遠鏡を求めて、アジア諸国と連携を進め、また望遠鏡の新たな光学系を探究した結果、木野解を見つけた。

I. 基礎となったTRIPOL(3色同時測光/偏光装置) TRIPOL(Triple Range Imager and POLarimeter)は、この研究課題の基礎にあたるもので、コンパクトかつ軽量で、可視3バンド(*g, r, i*)が同時に測定でき、先端に偏光ユニット(波長板+偏光板)を装着すれば3色同時偏光データが得られる。光学素子(ダイクロイックミラー+バンドパスフィルターおよび波長板+偏光板)はすべて、薄い板状であるために、収差をほとんど発生させない。

TRIPOL自体は、2015年以前に開発は済んでいて(TRIPOL #1: 南アフリカ・サザーランド75cm望遠鏡 / 同 #2: 台湾鹿林1m望遠鏡 / 同 #3: 安八0.7cm 韓国1m望遠鏡)において実用に供されていた。しかしながら、このシリーズでは、検出器部に市販のCCD(Santa Barbara IG: CCDはST-9で、ピクセルサイズは20 μm 、素子数は512x512。現在製造中止)を使用しており、512x512ピクセルでは素子数サイズとしても不足である。そこで、CCDの機種を選択して搭載できるように3色分岐箱を大きくしたTRIPOL改良型とした(TRIPOL5 レポート: ささご(株))。そのTRIPOL改良型 #4は、STT3200MEを搭載してマウント・ジョン0.6m望遠鏡、同 #5はSTX-8300を搭載して中国・興隆1.26m望遠鏡、において稼働し、

いくつかのデータが科学論文として発表されている。

TRIPOLの考えは、開発する余裕が無く資力も乏しい観測者がプロ-アマを問わず学術的に意義のある観測データをもたらす簡易な装置を狙ったものである。この装置自体を論文として学術誌に投稿したが、掲載拒否の憂き目にあった。拒否された理由；『装置としての能力の限界が十分に検証されていない』は自分にも納得できるもので、何とかして信頼できるデータを積んでその限界を明らかにして、近い将来にInstrumentation関連の雑誌に投稿したいと考えている。

撮像部の改良；CCDの大型化および読み出し部の小型化

IRSF 1.4m望遠鏡のカセグレン焦点部には、SIRIUS(近赤外3色撮像装置)が搭載されて稼働中であり、TRIPOLと取り合うスペース(空間)は巾120mmのスキマしか許されていない。そこで、検出素子はできるだけ大型(コダックKAF1001:ピクセルサイズは $24\mu\text{m}$ 、素子数は 1000×1000 素子)に、読み出し回路はコンパクト($\sim 100\text{mm}$)にする計画であった。鹿児島大学において2年間にわたり開発した。一通りの性能:暗電流、変換因子、読み出し雑音、の評価を行ったが、最終結果は、コダック社の仕様に及ばなかった。というよりも、まだ回路として安定した動作が確認できていないと見るべきかと思われる。

上記のように、読み出し回路の開発が達成できなかったために回避策を探すことに奔走した。3つのルート； SIRIUS焦点部の拡幅、

代替CCDの入手、新規望遠鏡建設、を検討した。は、焦点距離の延長は球面収差の増大を招くこと、および、稼働中のIRSFの運用休止を来たすこと、として、中国で市販されている「小型可視光カメラ:QHY-9SM」で代替する。しかしこれに用いられている素子(コダックKAF-8300)は、ピクセルサイズ/ $5.4\mu\text{m}$ 、素子数サイズ/ 3358×2536 、と小さ

く、IRSF 1.4m望遠鏡カセグレン焦点の焦点スケール~倍率にはミスマッチであり、開発意欲を削がれるものである。は、現在の中小望遠鏡が世界と伍してゆくには最も相応しい分光測光専用の望遠鏡を新規に建設することである。IRSFの展開として、大掛かりになるが将来性がある『急がば回れ』である。この迂回ルートも検討した。しかし、当初の計画書に書いた通り、『小型可視光カメラの実用化』が本計画の『鍵』であり、2年間では間に合わなかったとしても、その後なぜ完成へ向けて更にひた推す努力がなされなかったか悔やまれる。

II. IRSF 後継機としての新規望遠鏡の試案：球面の主鏡-副鏡を用いた測光分光専用望遠鏡：a) 試作40cm b) 1.5m c) 4.5m複合鏡。迂回ルート模索の試行錯誤の中で様々な考察を行った中の一つが、新規望遠鏡建設の試案である。観測装置と望遠鏡の一体化-観測装置が主として占有でき望遠鏡はむしろ従、となるべきである。

分光測光専用の意味は、空間解像力は0.5秒角程度、視野は10分角程度、集光力は、IRSF 1.4m口径を一桁上回ることである。逆にいえば、広視野-高空間分解は二義的に考える。そのような分光測光専用望遠鏡のフィージビリティの考察を行った。

A. 光学系 球面主鏡・副鏡によるアプラナティックな望遠鏡：木野解

主鏡・副鏡を含む3枚の球面鏡と1枚の非球面鏡を組み合わせることで球面収差とコマ収差を取り除き、実用的な光学性能(典型的には視野 10分角にわたって結像性能0.5秒角)をもつ望遠鏡を、木野勝氏(京大理)と協力して考案した。

天体観測用途ではリッチー・クレチアン式、もしくはクラシカル・カセグレン式がよく使われる。これらの望遠鏡では、主鏡に、双曲面や放物面などの非球面を使用するため、現在の巨大な主鏡の製作(加工や測定)には労

力がかかり、望遠鏡の入手しやすさを妨げている一因となっている。また、副鏡の非球面の製作および測定も同様である。提案する望遠鏡の光学系は、巨大な主鏡と凸形状の副鏡に球面鏡を用いることによって上記の問題を回避している。主鏡と副鏡の曲率中心が共に入射瞳付近に位置するコンセントリックなカセグレンとなっていて、大きな球面収差が発生するが、コマ収差はゼロとなる。本方式では、第3鏡を用いて入射瞳の縮小された実像を形成して、その位置に高次の非球面の第4鏡を置くことで、球面収差を補正する。同時に第3鏡と第4鏡との間隔を適当に選ぶことでコマ収差の発生も抑制して4面望遠鏡全体として、球面収差とコマ収差が無い光学系を実現する。この系は、主鏡、副鏡、第3鏡が球面であるために非常に研磨しやすいことに加えて、きわめて高精度の面精度検査が単独でできる。第4鏡の形状は、高次（6次関数で表される）の非球面となる。円錐曲面よりも複雑な形状ではあるが、直径が主鏡の1/10と小さくなることに加えて、近年の非球面加工・計測技術の進展によって、十分に射程内にあると考えており、その実証のための試験加工を進めている。リッチー・クレチアン式と比較して、視野角 \times 空間分解能（視野10分角にわたって結像性能0.5秒角）は、やや劣る-かもしれないが、通常の観測ではほとんど差が生じない。コストは数分の一～1億円程度に下がるものと期待している。

B. 光学素子の創成と検査：非球面光学素子の超精密研削加工とCGH干渉計

上記の球面アプラナート光学系の課題は、1) 第3鏡と第4鏡の面間隔の設定および、2) 第4鏡の非球面の加工と検査、の2点である。1) は、10 μ mオーダーであるから注意すればクリアーできる。2) は、ナガセ研削盤（N2C-1300D）に、ビトリファイド（セラミックス）ボンド砥石（#8000）を取り付けた「超」精密研削である。100mm のクリアセラムZを試作

した結果、面形状精度：71nm-pv/12nm-rms を得た。波長600nmに対してpv /8、rms /50であった（木野解を巡って研究会10/06(2016)-発表資料）。この技術は、大阪電通大と所仁志によって開発されたものである。

第4鏡非球面の検査法として、CGH

（Computer Generated Hologram）干渉計を採用する。これは、木野勝と栗田光樹夫によって開発され、すでに実用化されて実績を上げている。この干渉計は、検査光と参照光に対してほぼ等しい光路を使うメリットがある。良くない環境条件でなされた現在の測定精度でも「球面の主鏡-副鏡を用いたアプラナート反射望遠鏡」の第4鏡の面精度の測定は達成できる。

最終目標として、 $\lambda/100 \sim 5$ nmを達成できれば、高い価値をもたらすであろう。その可能性は残されていると思う。これを実証するために以下の方法を提案する。1) 口径10cmのクリアセラムZ（2面）を、ビトリファイド（セラミックス）ボンド砥石（#8000）をナガセ研削盤（N2C-1300D）に取り付けて「球面」加工を施し、2) ザイゴ干渉計でその形状を測定する。球面は変曲点をもつから「非球面」であっても難度の事情は同等である。3) $\lambda/50 \sim 10$ nmの精度までは測定可能である。ここまでは2面を試作、測定するが、最終目標 $\lambda/100 \sim 5$ nmの精度に向けては多数回試行が必要になる。

C. 軽量架台：トラス構造による架台 = 栗田架台

市販のトラスを組んで、下方から直接鏡面を支える、軽量かつ熱容量や耐荷重（風）に強く、また市販の軸受け（R-ガイド）を使って、きわめて安定したかつ安価な架台構造である。これも、栗田光樹夫（京大理）が創案し実現したものである。

これらの4つの要素技術は、われわれが自力で考案して試作したオリジナルなものとし

ている。全工程としての望遠鏡建設の実績はまだ無い。

そこで、上記の構想と開発をもとに、安価で安定した測光分光望遠鏡を構想している。以下、口径40cm試作、1.5m単一鏡、4.5m複合(7面：中心1+外6)面鏡の3ステップで、測光分光望遠鏡を実現してそれらの焦点面に2k x 2k、可視-近赤外7色同時撮像カメラを搭載する。

口径D=0.4mの試作機で視野 10分角にわたって結像性能0.5秒角の光学系の望遠鏡としてa)一通りの工程を踏むこと、b)光学解の性質を知ること、次の口径D=1.5mは実証機でこの口径であれば、集光力x観測時間を活かして研究に資することができる。また架台を軽快に設計しトラック搭載可搬にすることによって、手間暇コストを要する天文台設置を省略することが可能である。傾斜計とGPSそして補正ソフト『T-ポイント』を組み合わせれば、30分以内に『観測READY』になるであろう。さらにいえば、架台自体も鏡筒と分離できトラック荷台に搭載できるであろう。3番目の口径D=4.5mは本格的な測光分光望遠鏡として最前線の研究に資することができる。再来年でIRSF 20年目を迎えるにあたってIRSF後継機として相応しい。

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 4 件)

1) Near-IR Imaging Polarimetry toward a Bright-Rimmed Cloud: Magnetic Field in SFO 74

Kusune, Takayoshi; Sugitani, Koji; Miao, Jingqi; Tamura, Motohide; Sato, Yaeko; Kwon, Jungmi; Watanabe, Makoto; Nishiyama, Shogo; Nagayama, Takahiro; Sato, Shuji

The Astrophysical Journal, Volume 798, Issue 1, article id. 60, 16 pp 1/2015

2) Magnetically Confined Interstellar Hot Plasma in the Nuclear Bulge of Our Galaxy
Nishiyama, Shogo; Yasui, Kazuki; Nagata, Tetsuya; Yoshikawa, Tatsuhito; Uchiyama, Hideki; Schodel, Rainer; Hatano, Hirofumi; Sato, Shuji; Sugitani, Koji; Suenaga, Takuya; Kwon, Jungmi; Tamura, Motohide

The Astrophysical Journal Letters, Volume 769, Issue 2, article id. L28, 5 pp. 06/2013

3) Magnetic Field of the Vela C Molecular Cloud

Kusune, Takayoshi; Sugitani, Koji; Nakamura, Fumitaka; Watanabe, Makoto; Tamura, Motohide; Kwon, Jungmi; Sato, Shuji

The Astrophysical Journal Letters, Volume 830, Issue 2, article id. L23, 7 pp. (2016). 10/2016

4) Grism and immersion grating for space telescope

Ebizuka, N, K. Oka, K. Kodate, S. Sato, M. Iye.

Proceeding of SPIE 10568 pp.743-749 2017

{ 学会発表 } (計 1 件)

球面主鏡・副鏡をもつアプラナティックな望遠鏡

木野勝、佐藤修二、成相恭二
日本天文学会 春期学会 2017

{ 図書 } (計 0 件)

{ 産業財産権 }

出願状況 (計 1 件)

名称：カセグレン式望遠鏡

発明者：木野勝、佐藤修二、成相恭二

権利者：国立大学法人京都大学、株式会社清原光学

種類：

番号：2017-026942

出願年月日：平成 29 年 2 月 16 日

国内外の別：国内

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤修二 (SATO Shuji)
名古屋大学大学院・理学研究科・名誉
教授
研究者番号： 50025483

(2) 研究分担者：なし

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

中島康 (NAKAJIMA Yasushi)
一橋大学・情報基盤センター・准教授
研究者番号： 40469606

永山貴広 (NAGAYAMA Takahiro)
鹿児島大学・理工学研究科・准教授
研究者番号： 00533275

(4) 研究協力者

金田英矩 (KANEDA Hidehiro)
名古屋大学大学院・理学研究科・教授
研究者番号： 30301724

田村元秀 (TAMURA Motohide)
東京大学大学院・理学系研究科・教授
研究者番号： 00260018

長田哲也 (NAGATA Tetsuya)
京都大学大学院・理学研究科・教授
研究者番号： 80208016

面高俊広 (OMODAKA Toshihiro)
鹿児島大学・理工学研究科・名誉教授
研究者番号： 50129285