

近紫外線カメラ SCUID の開発と東広島天文台かなた望遠鏡における運用

秋田谷 洋^{*1,2,3}, 諸隈 智貴^{*2}, 川端 弘治^{*3}

Abstract

我々は、近紫外線波長域における装置効率を追求した撮像装置として近紫外線カメラ SCUID の開発・製作を進めてきた。2024 年春に東広島天文台口径 1.5m かなた望遠鏡に装着し、初の天体光を入れての試験観測を実施した。その結果、結像性能、装置効率等の装置性能が想定通りであることを確認した。また、東広島天文台における近紫外線における大気透過率と空輝度は、本装置が目指す科学研究にとって支障がないことを確かめた。2026 年秋には遠隔操作可能な焦点面交換機構とフィルターホイールとともに装置を望遠鏡焦点に常駐させ、定常運用を開始した。

1. はじめに

近紫外線 (本研究では波長 300–400 nm の範囲を指す) は、地上から天体観測が可能な波長帯、いわゆる「大気の窓」のうち、最も短い波長帯を占める。地上からの観測天文学においては、かつて測定器として写真乾板や光電子増倍管が主に用いられていた時代から頻りに観測されていた波長帯の一つである。しかし、1980 年代以降、CCD 検出器や近赤外線アレイ検出器の普及とともに検出器の感度ピークは長波長側に遷移し、可視光長波長帯や近赤外線を用いた観測研究への関心が高まった。また、それらの波長帯と同時に近紫外線をも含めた広い波長帯にまんべんなく対応できる観測装置の設計や製作は一般に難しい。そのため、近年は、十分な感度で近紫外線波長帯の観測を行うことができる装置が少なくなっている。

さて、重力波現象 GW170817 の電磁波対応天体として発見された中性子星連星合体にともなうキロノバ放射 (Utsumi et al. 2017) は、 r プロセス過程による重元素合成の起源として注目されており、その解明のために同様の天体の発見と観測が切望されている (田中 2021)。キロノバ放射は、特に近紫外線で連星合体後数日のスケールで急激に減光される特長が知られており、その振る舞いを今後も近紫外線で観測することが、キロノバ放射の理解を深める上で必須である (Villar et al. 2017, Evans et al. 2017)。また、超新星や新星などの時間変動天体の観測においても、高温の初期の状態を強く反映することから近紫外線の観測が重要である。さらに、生命の起源の候補として注目される C 型小惑星には近紫外線に含水の指標となる吸収帯があることが示唆されており、そ

の有無を測定することから、この種の小惑星の含水・脱水の過程を理解することができる (Tatsumi et al. 2022)。このように、最新の観測天文学において近紫外線による観測研究は重要でありつづけている。

そこで我々は、改めて今の時代に近紫外線に再注目し、この波長帯における地上観測研究を再興すべく、近紫外線カメラ SCUID を開発・製作することとした。開発においては、極力、近紫外線の装置効率の向上のために資源を集中して投入する方針とし、その分、迅速かつ低コストに装置を製作して手近な地上望遠鏡に装着することで、早期に観測に供することを目指した。

2. SCUID の開発

我々は、2022 年から本装置の初期構想を練り、基礎検討を進めてきた。その後、2024 年 3 月に、検出器と収差補正光学系、手動交換できるフィルター群を揃えた上で、東広島天文台口径 1.5m かなた望遠鏡の第二ナミス焦点に装置を装着し、初めての天体光を用いた試験観測を実施した (Akitaya et al. 2024)。これにより、結像性能や限界等級、装置効率等が、およそ設計の想定通りであることを確認した。その後、装置を望遠鏡焦点に常設して、定常的に観測に供するために、リモート操作可能な焦点面装置交換機構、および、フィルター交換機構それぞれを製作した。これらを 2025 年 11 月に、かなた望遠鏡第二ナミス焦点に設置した。これにより、望遠鏡・装置併せて、インターネット環境を有する場所からは常にリモートで運用できるようになった。

2.1 基本設計

光学系の各素子について、それぞれの効率が近紫外線で最大化するように設計ないし選定を行った。収差補正

*1 千葉工業大学天文学研究センター

*2 千葉工業大学惑星探査研究センター

*3 広島大学宇宙科学センター

E-mail of corresponding author: akitaya.hiroshi@chibatech.ac.jp

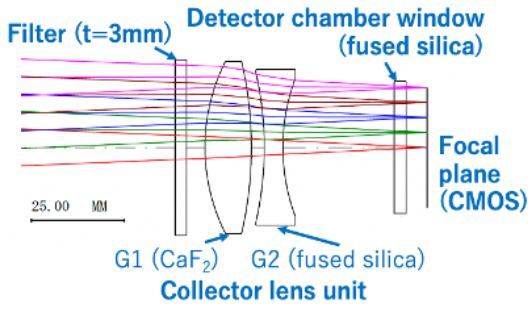


Fig. 1 (上)SCUIDの収差補正光学系設計. (右)補正光学系と検出器モジュールを組み合わせたSCUID本体.

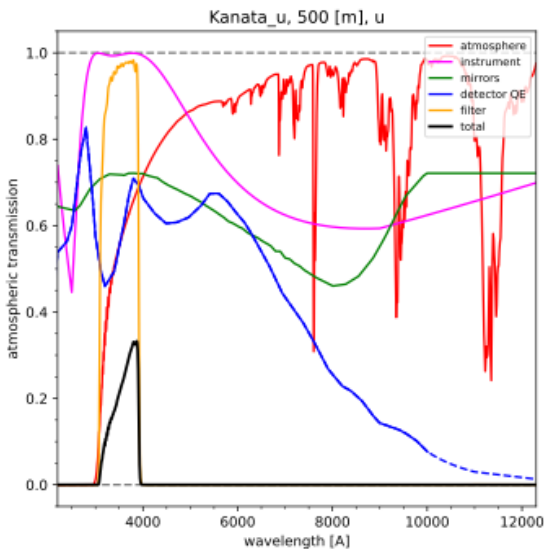


Fig. 2 装置構成要素の分光効率(細線)と u -band フィルター併用時の総合分光効率(黒太線). 大気透過率は、東広島天文台における典型的な条件を想定.

光学系は、望遠鏡の F 比を変換せず収差のみを補正することとし、蛍石および熔融石英からなる 2 枚レンズ構成とした (Fig. 1(上)). また、それぞれのレンズには近紫外線波長帯に最適化した AR コーティングを施し、この波長帯で一面あたりの反射率が 0.2%以下となるようにした.

なお、現状の検出器と光学系の組み合わせでは、検出

器上で視野が 5 分角 \times 5 分角、サンプリングスケールが 0.14 秒角/ピクセルであり、典型的に想定される星像サイズ 1-3 秒角に対してかなりオーバーサンプリングとなる. すなわち、暗い天体に対して検出器の読み出しノイズが効き易く、視野が限定される点で不利である. しかし、これを解消するには縮小光学系とする必要があるが、そのためにはレンズ枚数が多く複雑な構成となり、かつ、製作コストが増大する. これは、低コスト・迅速な観測実現を謳う本装置のコンセプトから外れるため、あえて上記設計のままとした.

バンドパスフィルターとしては、主に用いる SDSS u -band フィルターを朝日分光による特注品として製作した. 透過波長帯内の最大透過率は約 99%である. その他に、近紫外線波長帯を 2 分割する目的で Edmund 社の市販品フィルター 2 枚 (300–350 nm 透過、および 350–410nm 透過. それぞれ u -short, u -long と呼称), Baader Planetarium 社 SDSS g' , r' フィルターを備えた. また、対物分光の試行のために、Edmund 社の 400 gr/mm の透過型回折格子も用意した.

検出器には、入手可能な市販の冷却 CMOS カメラモジュールのうち、近紫外線における量子効率が 40–70% と比較的高い CMOS センサー Gpixel 社 GSENSE400 BSI UV を搭載した FLI 社 KL400-UV を選んだ (Fig. 1(下)). 検出器フォーマットは、2028 \times 2048 ピクセル、ピクセルサイズは 11 μ m である. 検出器の真空窓には、標準ではコーティングなしの溶解石英が装着されていたが、これについても、近紫外線における透過効率を 99%以上とする AR コーティングを独自に施した.

このように、装置構成要素の近紫外線における効率を最大化する工夫を施した上で、望遠鏡反射率(アルミ鏡 3 枚)、典型的な大気透過率も含めて u -band フィルター併用時の装置の総合分光効率を推定したところ、観測波長帯のピーク値で約 32%となった (Fig. 2). Apache Point Observatory における SDSS u -band 観測時、airmass1.3 の大気透過率込み総合分光効率のピークが約 10%であること (Doi et al. 2010) と比較すると、本装置では、各素子の効率を近紫外線に特化することで高い総合装置効率を達成できたといえる. なお、効率は若干低下するが、SDSS g' -band および r' -band の波長帯でも一定の装置効率を有しており観測は可能である.

2.2 定常運用に向けた機器開発

SCUID 装置をかなた望遠鏡に常設して定常的に運用するために、遠隔操作可能な焦点面装置交換機構とフィルターホイールを設置した (Fig. 3).

SCUID はかなた第二ナスマス焦点に設置して用いる



装置交換機構

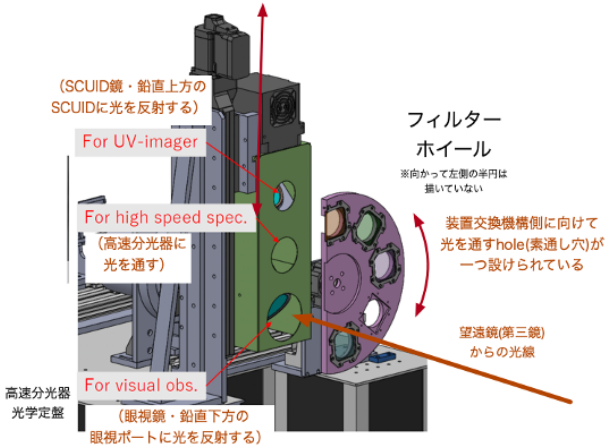


Fig. 3 かなたナスミス焦点に装着した SCUID 本体と焦点面装置交換機構, フィルターホイール (図面クレジット: PhotoCross).

が、この焦点では、従来から、高速分光器 (第三鏡からの望遠鏡高度軸に沿った直進光路上), および、観望会用の眼視接眼鏡 (高速分光器前面に斜鏡を挿入し鉛直下方に折り曲げた光路) の 2 つの装置がともに常設されており、光路切り替えの上で頻繁に使用されている。そのため、SCUID を追加で常設するためには、従来の機器群への光路切り替えを遠隔操作で行えるようにする必要があった。そこで、リニアステージを用いた焦点面装置交換機構を設計・製作し、高速分光器の前面に新たに設置した。

焦点面装置交換機構では、鉛直方向に駆動するリニアステージによって、光路を 3 つの装置に振り分ける。上から、(1) 鉛直上方に光路を折り曲げる平面斜鏡と SCUID 本体、(2) 高速分光器に光路を導く素通し穴、(3) 鉛直下方に光路を折り曲げ眼視鏡に光路を導く平面斜鏡の順に配置した。リニアステージは、計算機を通じて遠隔操作が可能である。また、フィルターを遠隔で切り替える

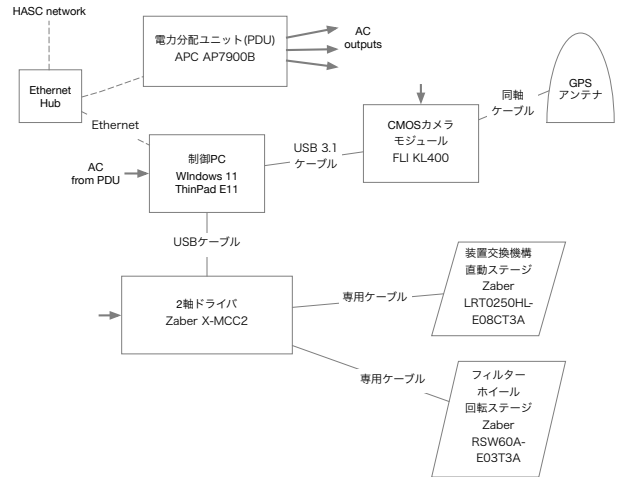


Fig. 4 SCUID 機器群のブロックダイアグラム.

ために、回転ステージを用いたフィルターホイールを設計・製作して設置した。フィルターホイールは素通し穴を含めて 8 つのスロットを有しており、2.1 節で述べたフィルター・回折格子群を設置してある。フィルターホイールは、焦点面装置交換機構より望遠鏡側に設置した。SCUID 以外の機器を用いる場合は、フィルターホイールを素通し穴に設定することで、光路を遮らないように設定できる。

SCUID 機器群の全体構成を Fig. 4 に示した。これらの機器群は、全てインターネット・ローカルネットワークを経由して遠隔操作することができる。また、かなた望遠鏡本体もすでに遠隔操作が可能となっている。よって、ネットワーク環境が整った場所からは、常時 SCUID を用いたリモート観測を実施する環境が整った。

3. 初期観測

3.1 結像性能・限界等級

結像性能と点光源天体の限界等級を評価するために、予めメンバー星の SDSS カタログ等級が分かっている散開星団について *u*-band による撮像観測を行ない、設計から予想される限界等級と比較した (Fig. 5, 6)。観測時は雲のない安定した快晴、月のない暗夜であった。

星像は、視野全体にわたってシーイングサイズ約 3 秒角に相当する一様な形状を示しており良好であった。また、検出した点源のカタログ等級は、積分時間 (ここでは 60 秒) で期待される設計上の限界等級で期待されるものと同程度とみられた。今後、様々な空条件における観測データを蓄積し、実効的な限界等級の定量評価を進める。

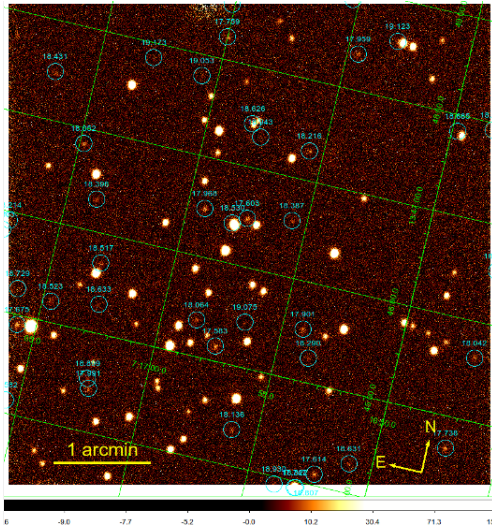


Fig. 5 (上) 散開星団 NGC2355 の u -band 画像. 積分時間 60 秒. 数値は SDSS カタログによる u -band 等級.

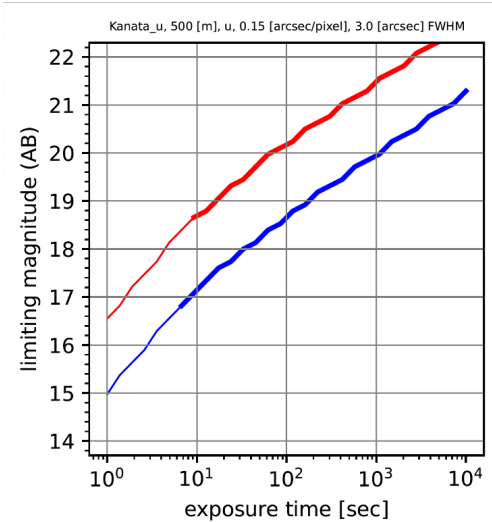


Fig. 6 設計上の限界等級計算. 赤実線は $S/N=5$, 青実線は $S/N=20$ を示す. 実線のうち, 細い実線は読み出しノイズが優勢, 太い実線は光電子のポアソンノイズが優勢であることを示す. 標高 500m (東広島天文台), 星像サイズ 3 秒角を想定.

3.2 近紫外線の大気透過率・空輝度評価

近紫外線による高効率の観測を実現するには, 大気透過率や空輝度などの観測環境を定量評価したうえで観測計画を練ることが重要である.

u -band における大気透過率の評価のために, 安定した快晴時にカタログ等級が既知である恒星群を異なる airmass で測光し, 単位 airmass あたりの大気減光率を測定した. これをもとに天頂における大気透過率を求めたところ約 50%であった. これを, 先行研究による既存天文台の大気透過率実測値, および, LOWTRAN 7 大気モデル (Kneizys et al. 1988) による予測透過率計算と比較

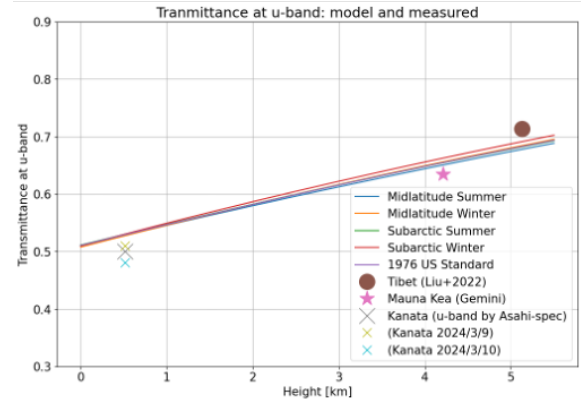


Fig. 7 近紫外線の大気透過率の実測値 (各点) と LOWTRAN 7 大気モデルからの推定値 (実線群) の比較. 東広島天文台における実測値は \times 点 (2 夜それぞれ測定値とその平均)

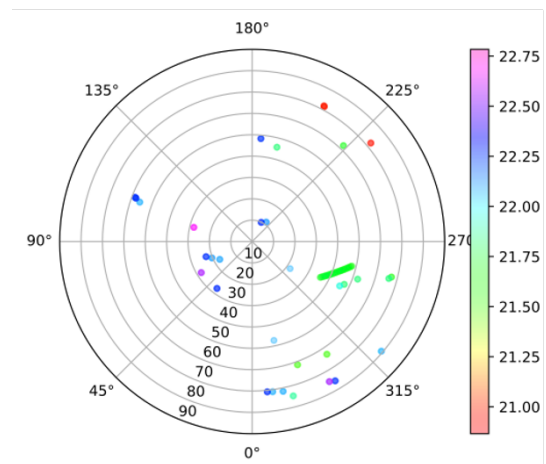


Fig. 8 東広島天文台の快晴・暗夜時における u -band 空輝度測定. 単位は $\text{mag}/\text{arcsec}^2$. 方位角は南を原点として東方向に向かって増加する. 北西方向 (方位角約 225° の方向) に近隣の市街地 (西条) がある.

した (Fig. 7). 既存天文台であるマウナケア山およびピットアリ山観測所 (Liu et al. 2022) の実測大気透過率は, それぞれ LOWTRAN 7 大気モデルの予測とよく一致しているが, 我々が測定した東広島天文台における大気透過率も, やはりモデルの予測とほぼ一致する. これらから, 条件の良い空であれば, 東広島天文台のような日本の低標高でも, モデルから期待される大気透過率が得られていることを実証した.

また, 大気透過率を実測した月のない快晴時に, 東広島天文台における様々な天域における u -band 空輝度を測定した (Fig. 8). 市街地がある北西方向低空は若干空輝度が高いものの, その他のほとんどの天域の空輝度は $21\text{--}22 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ であり, 主要な観測対象に比べて充分暗い.

これらより, 東広島天文台における u -band 観測環境は, 条件の良い夜においては観測に支障がないものであ

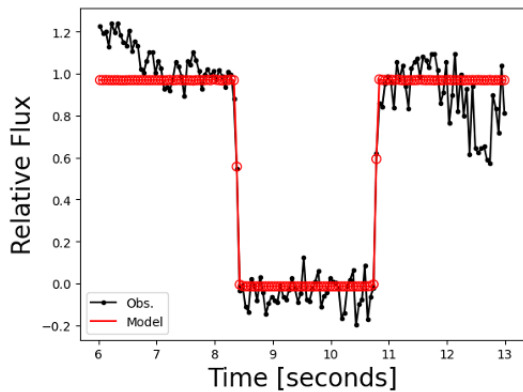


Fig. 9 恒星 UCAC4 381-086128 の小惑星 (1023)Thomana による掩蔽現象. フィルターなし, 50 ミリ秒連続撮像による測光結果 (黒点・実線) と, 掩蔽現象のモデルフィッティング (赤丸点・実線). 時刻は基準時刻 UT 2025 年 10 月 8 日 9 時 56 分からの差分. 減光時刻と復光時刻はそれぞれ基準時刻に対して 8.384 ± 0.005 秒, および 10.781 ± 0.006 秒であり, 掩蔽継続時間は 2.397 ± 0.008 秒であった.

ることが分かった. 今後様々な条件による空環境の測定を行い, 条件の変動幅や出現頻度などの統計的な評価を進める.

3.3 高速・高時間精度観測

SCUID で用いている CMOS カメラモジュールは, 最大 48fps の高頻度で撮像を行うことが可能である. また, GPS アンテナを併用することで, 正確なタイムスタンプを画像に付与することができる. これらの特性を活かすことで, 高速・高時間精度の撮像観測を実施することができる.

高速・高時間精度観測の試行として, 小惑星による掩蔽現象 (恒星食) の観測を行った (Fig. 9). 東広島天文台を含む西日本地域において, UT 2025 年 10 月 8 日 9 時 56 分付近に, 直径約 52km の小惑星 (1023)Thomana が g-band 9.8 等級の恒星 UCAC4 381-086128 の手前を横切る掩蔽現象が予報された. 掩蔽の最大継続時間は約 2.6 秒と予報され, 東広島天文台は掩蔽帯のほぼ中央に位置していたことから同程度の時間の減光が捉えられると期待した. この現象をフィルターなしの条件で, 正確な時刻記録とともに 50 ミリ秒 (20fps) 連続撮像を行ったところ, 掩蔽モデルフィッティングとの併用により, 減光・復光および掩蔽継続時間をミリ秒の精度で決定することができた. これらの観測結果は, 同じ現象を観測した他の観測者の観測結果とともに国際掩蔽観測者協会東アジア (IOTA/EA; Yoshida et al. 2025) を通じて International Occultation Timing Association (IOTA) 本部へ集約され, 小惑星の形状・軌道要素の決定・改善に活かされる.

この機能は, SCUID が特に注目している近紫外線には限定されない, CMOS 検出器の能力を活かしたものであるが, 1-2m 級の望遠鏡において新たに高精度・高時間精度の撮像観測が実施できる拠点を創出したという点で画期的である.

4. まとめと将来計画

我々は, 近紫外線の効率を追求した近紫外線カメラ SCUID の開発・製作を行ってきた. 2025 年秋には装置を東広島天文台口径 1.5m かなた望遠鏡に常時リモート操作可能な状態で設置し, 定常的な運用を開始するに至った. 今後, 重力波現象対応天体の探査や超新星・新星などの突発天体観測, 小惑星の近紫外線吸収バンドの測定, 太陽系内小天体による掩蔽現象の観測などの科学研究を推進する. また, 近紫外線における観測環境の定量評価を進める.

また, 新たな観測機能として, 直線偏光観測機能を追加する. 任意方位に回転可能な半波長板と方位固定したワイヤグリッド偏光子を, それぞれ装置入射部の光路上に挿入することを想定しており, 現在, 設計・製作を進めている.

謝 辞

本研究は東レ科学技術研究助成 (課題番号 22-6310, 代表: 諸隈), および, JSPS 科研費 基盤研究 (C) 25K07355 (代表: 秋田谷) の助成を受けた. 光学素子の効率測定には, 国立天文台先端技術センター施設利用の制度により, 同センターオプトショップの測定器群を使用した.

文 献

- Akitaya, H., et al. 2024, Proc. SPIE, 13096, 130963G.
- Doi, M., et al. 2010, AJ, 139, 1628.
- Evans, P. A., et al. 2017, Science, 358, 1565.
- Kneizys, F. X., et al. 1988, Users Guide to LOWTRAN 7. Interim scientific report. Air Force Geophysics Lab, Hanscom AFB, Massachusetts.
- Liu, W., et al. 2022, Journal of Instrumentation, 17, P01022.
- 田中雅臣, 2021, 天文月報, 114, 1.
- Tatsumi, E., et al. 2022, A&A, 664, A107.
- Utsumi, Y. et al. 2017, PASJ, 69, 101.
- Villar, V. A., et al. 2017, ApJL, 851, L21.
- Yoshida, F., et al. 2025, Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 383, 2291.